REVISIÓN CRÍTICA DE HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES PARA LA GESTIÓN DE LAS REDES ELÉCTRICAS ANTE LA INCORPORACIÓN DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA

PAUL SEBASTIAN MELO MOLINA

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
SANTIAGO DE CALI
AÑO 2020

REVISIÓN CRÍTICA DE HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES PARA LA GESTIÓN DE LAS REDES ELÉCTRICAS ANTE LA INCORPORACIÓN DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA

PAUL SEBASTIAN MELO MOLINA

Trabajo de grado presentado para optar por el título de:
INGENIERO ELECTRICISTA

DIRECTORES: **ING. EDUARDO MARLÉS SÁENZ, M.Sc.**
Universidad del Valle

ING. EDUARDO GÓMEZ LUNA, PhD
Potencia y Tecnologías Incorporadas S.A. (PTI)

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
SANTIAGO DE CALI
AÑO 2020

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, en especial a mi madre Lucy Adriana Molina a su esposo Iván Ortega Bravo, mi hermana Daniela Alejandra Ortega por darme todo su amor, compresión, apoyo y la fortaleza necesaria durante mi carrera universitaria y elaboración de mi trabajo de grado.

A Gheraldynn Leitón por ese amor y apoyo incondicional durante gran parte de mi carrera. Gracias por ser esa persona quien me motivo a continuar adelante y estuvo ahí en los momentos buenos y en los no tan buenos.

A mis directores Eduardo Marlés Sáenz y Eduardo Gómez Luna por hacer parte de este proceso. Gracias por su acompañamiento, disponibilidad y paciencia para dirigir y supervisar este trabajo de grado y ser parte importante en esta etapa final de mi proceso de formación en el pregrado.

A mis compañeros y colegas que fueron parte fundamental de este logro. Gracias por su amistad.

A la Universidad del Valle y a la empresa Potencia y Tecnologías Incorporadas, PTI-S.A. por su colaboración durante mi formación y culminación de mis estudios.

RESUMEN

El sistema eléctrico de potencia colombiano se encuentra en una transición energética acelerada; la inclusión masiva de DER, el desarrollo e implementación de nuevas regulaciones, la digitalización de la infraestructura, la inclusión de prosumidores en el sistema y los nuevos modelos de negocios, requieren de nuevas herramientas que permitan al operador de red, la gestión, operación y control de sus activos de forma segura y confiable. Es por esta razón que la evaluación de herramientas computacionales que permiten gestionar las redes eléctricas modernas ayuda a tener una visión más clara de cuales herramientas pueden implementarse para administrar y controlar las características técnicas, operativas y económicas al contar con una alta penetración de DER.

Por otra parte, las empresas de servicios públicos o agregadores deben considerar aspectos como: cuál es su finalidad, sus necesidades y especificaciones, el orden de prioridades y el referenciamiento como aspectos importantes al momento de la selección e implementación de este tipo de herramientas. Lo anterior con el fin de contrastar las características y beneficios ofrecidos por cada proveedor en este tipo de tecnologías.

El presente trabajo de grado presenta una revisión y caracterización de herramientas computacionales para la gestión, operación y control de las redes eléctricas ante la incorporación de recursos energéticos distribuidos, siendo esto una necesidad actual de la industria.

Palabras clave: Redes Inteligentes (RI), Operador del Sistema, Recursos Energéticos-Distribuidos (DER), herramientas computacionales, Sistema de Gestión de Distribución Avanzado (ADMS), Sistemas de Gestión de Recursos Energéticos Distribuidos (DERMS), Plantas de Energía Virtual (VPP).

ABSTRACT

The Colombian power electrical system is in an accelerated energy transition; the massive inclusion of DER, the development and implementation of new regulations, the digitization of infrastructure, the inclusion of prosumers in the system and new business models, require new tools that allow the network operator, management, operation and Control your assets safely and reliably. It is for this reason that the evaluation of computational tools that allow the management of modern electrical networks helps to have a clearer vision of which tools can be implemented to manage and control the technical, operational and economic characteristics by having a high penetration of DER.

On the other hand, public service companies or aggregators should consider aspects such as: what is their purpose, their needs and specifications, the order of priorities and referencing as important aspects when selecting and implementing this type of tools. The above in order to contrast the characteristics and benefits offered by each provider in this type of technologies.

The present degree work presents a review and characterization of computational tools for the management, operation and control of the electrical networks before the incorporation of distributed energy resources, this being a current necessity of the industry.

Keywords: Intelligent Networks (RI), System Operator, Distributed Energy Resources (DER), computational tools, Advanced Distribution Management System (ADMS), Distributed Energy Resources Management Systems (DERMS), Virtual Power Plants (VPP).

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS 3
RESUMEN 4
ABSTRACT 5
CONTENIDO 6
INTRODUCCIÓN 11
1.1 REDES ELÉCTRICAS TRADICIONALES 14
1.1.1 Generación. 15
1.1.2 Transmisión. 15
1.1.3 Distribución. 15
1.1.4 Centro de control. 15
1.2 TRANSICIÓN DE LAS REDES ELÉCTRICAS 17
1.3 REDES INTELIGENTES O *SMART GRIDS* 17
1.4 TECNOLOGÍAS Y FUNCIONALIDADES DE LAS RI 19
1.4.1 Infraestructura de Medición Avanzada (AMI). 19
1.4.2 Automatización Avanzada de Distribución (ADA). 19
1.4.3 Recursos Energéticos Distribuidos (DER). 19
1.5 CENTRO DE CONTROL DE REDES INTELIGENTES 22
1.6 JERARQUÍA DE OPERACIÓN / CONTROL EN LAS REDES ELECTRICAS MODERNAS 24
1.6.1 Nivel de bahía. 24
1.6.2 Nivel central. 25
1.6.3 Nivel de red. 25
1.7 HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES 25
2. HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES PARA LA GESTIÓN INTELIGENTE DE LAS REDES ELÉCTRICAS ANTE LA INSERCIÓN DE DER 27
2.1 EVOLUCIÓN ENERGÉTICA A TRAVÉS DE LA INNOVACIÓN 28
2.1.1 Tecnologías habilitadoras. 29
2.1.2 Modelos de negocios. 29
2.1.3 Diseño de mercado. 29
2.1.4 Operación del sistema. 30
2.2 TENDENCIAS DE INNOVACIÓN 30
2.2.1 Descarbonización. 30
2.2.2 Descentralización. 31

2.2.3 Digitalización. 32
2.3 HERRAMIENTAS DE GESTIÓN DE LAS REDES ELÉCTRICAS MODERNAS 33
2.3.1 Sistema de gestión de distribución avanzada (ADMS). 35
2.3.2 Sistemas de gestión de recursos energéticos distribuidos (DERMS). . 35
2.3.3 Plantas de energía virtual (VPP). 36
2.4 DESCRIPCIÓN DE HERRAMIENTAS PARA LA GESTIÓN DE LA RED ELÉCTRICA ANTE LA INTEGRACIÓN DE DER 36
2.4.1 Compañía 1. 38
2.4.2 Compañía 2. 38
2.4.3 Compañía 3. 39
2.4.4 Compañía 4. 40
2.4.5 Compañía 5. 40
2.4.6 Compañía 6. 41
2.4.7 Compañía 7. 42
2.4.8 Compañía 8. 43
2.4.9 Compañía 9. 43
2.4.10 Compañía 10. 44
2.4.11 Compañía 11. 45
2.4.12 Compañía 12. 46
2.4.13 Compañía 13. 46
2.4.14 Compañía 14. 47
2.4.15 Compañía 15. 48
2.4.16 Compañía 16. 49
2.4.17 Compañía 17. 50
2.4.18 Compañía 18. 50
2.4.19 Compañía 19. 51
2.4.20 Compañía 20. 52
2.4.21 Compañía 21. 52
2.4.22 Compañía 22. 53
2.4.23 Compañía 23. 53
2.4.24 Compañía 24. 54
3. EVALUACIÓN DE LAS HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES PARA LA GESTIÓN INTELIGENTE DE LAS REDES ELÉCTRICAS MODERNAS 56
3.1 CONVERGENCIA DE LAS HERRAMIENTAS DE GESTIÓN DER 56
3.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS HERRAMIENTAS DE GESTIÓN DER 58

3.3 ASPECTOS IMPORTANTES PARA LA IMPLEMETACIÓN DE LAS HERRAMIENTAS DE GESTIÓN DER 60
3.3.1 Beneficios de las herramientas de gestión. 62
4. CASOS DE IMPLEMENTACIÓN Y ENERGY CLOUD 68
4.1 CASOS DE IMPLEMENTACIÓN A NIVEL MUNDIAL 68
4.1.1 Enbala Power Networks: proporcionando integración eólica a través de la gestión inteligente de carga [112], [113]**.** 68
4.1.2 Avista: Despacho económico de recursos energéticos distribuidos [114]**.**..... 69
4.1.3 Pepco Holdings, Inc: restauración mejorada del sistema durante los eventos principales [112]**.** 71
4.1.4 Next Kraftwerke: proporciona servicios de red al operador del sistema de transmisión en Bélgica [48]**.**..... 72
4.1.5 Colombia. 73
4.2 ENERGY CLOUD 74
5. CONCLUSIONES 79
6. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS 81
REFERENCIAS 82
ANEXOS 89

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de la red eléctrica tradicional..... 15
Figura 2. Esquema de una RI. 18
Figura 3. Recursos energéticos distribuidos DER. 21
Figura 4. Niveles jerárquicos de operación/control..... 24
Figura 5.Capacidad de potencia total instalada de DER por tecnología. Mercados del mundo: 2017-2026..... 32
Figura 6. Tendencias de innovación de la red eléctrica..... 33
Figura 7. Evolución de los sistemas eléctricos distribuidos ante la Integración DER..... 34
Figura 8. Solución DERMS Compañía 1. 38
Figura 9. Arquitectura Compañía 2. 39
Figura 10. Plataforma de la compañía 3. 40
Figura 11. Arquitectura EcoStruxure ADMS. 41
Figura 12. Componentes PowerOn Advantage ADMS. 42
Figura 13. Arquitectura ANM..... 43
Figura 14. Mercury DERMS. 44
Figura 15. ADMS compañía 11. 45
Figura 16. OATI webSmartEnergy DERMS. 46
Figura 17. Plataforma de soluciones PRIMS. 47
Figura 18. Plataforma DERMS..... 48
Figura 19. Spectra ADMS. 49
Figura 20. Arquitectura DERMS..... 49
Figura 21. Arquitectura ADMS. 50
Figura 22. Plataforma ADMS. 51
Figura 23. Utilities Network Management System (NMS)..... 52
Figura 24. Sistema de control NEMOCS. 53
Figura 25. Plataforma ACT. 54
Figura 26. DERMS una convergencia de las herramientas de gestión..... 57

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Diferencias entre la red eléctrica actual y la red inteligente 23
Tabla 2. Lista de herramientas de gestión de DER 54
Tabla 3. Caracterización de herramientas para la gestión DER 59
Tabla 4. Capacidad de gestionar DER de cada herramienta 60
Tabla 5. Beneficios de herramientas para la gestión DER 63
Tabla 6. Tabla consolidada 75
Tabla 7. Descripción de las fases del proyecto ADMS 91

INTRODUCCIÓN

Los sistemas eléctricos de distribución clásicos fueron diseñados para asegurar el suministro de energía de una forma centralizada, es decir con un flujo de energía unidireccional desde la generación hasta el usuario final. Con el aumento de la demanda energética producida por el incremento de la población, urbanización y rápida industrialización, los sistemas de energía incorporan recursos energéticos distribuidos (DER) como una solución al aumento de la demanda de forma localizada, es decir cerca de las zonas de consumo, permitiendo reducir las pérdidas, aumentar la confiabilidad y calidad de potencia en el sistema eléctrico.

Con la integración de DER la complejidad de los sistemas eléctricos de energía aumenta debido a que se genera un cambio con los actores que participan desde la generación hasta el consumo, donde se pasa de una red de distribución pasiva a una red de distribución activa. De esta manera se presenta una transición desde un sistema eléctrico centralizado hacia un sistema eléctrico distribuido contribuyendo con la mejora de confiabilidad, eficiencia y minimizando las pérdidas de la red.

En este escenario los operadores de red deben realizar una adecuada gestión del sistema eléctrico considerando los cambios producidos en las características de la red y la participación dinámica de los usuarios, debido a que son capaces no sólo de consumir energía sino también de producirla (prosumidor). Lo anterior, nos lleva a una revisión en la manera como se gestionan las redes eléctricas actuales, con el fin de optimizar los procesos de la cadena de la energía eléctrica, aumentando la confiabilidad, seguridad y resiliencia del sistema eléctrico.

Es por esto, que ante la modernización de los sistemas eléctricos se requiere el uso de herramientas computacionales que permitan mediante una adecuada gestión operar, controlar y acelerar los procesos de la cadena de la energía eléctrica permitiendo un uso óptimo de los recursos.

Con este trabajo de grado se presentan las principales características de la transición de las redes eléctricas ante la integración de DER (Redes Inteligentes o *Smart Grids*). Se trata la evolución tecnología que presentan los centros de control, y las herramientas utilizadas para la gestión, operación y control de los sistemas eléctricos con sus respectivas capacidades y limitaciones ante la integración de recursos energéticos distribuidos como la generación distribuida y el dinamismo que esto conlleva sobre el sistema.

La estructura que se plantea para el documento se presenta a continuación:

Capítulo 1: en esta etapa se presenta el concepto de red eléctrica tradicional, los principales cambios en la red ante su evolución hacia las redes inteligentes o *Smart Grid*. Se describen las principales responsabilidades operativas de los centros de control tanto para la red tradicional como para la red inteligente. Además, se definen los niveles de control/operación de la red considerando el concepto de red

inteligente. Finalmente se presenta el concepto de herramienta computacional y los beneficios que ha traído su uso en el sistema de potencia.

Capítulo 2: en esta etapa se presentan aspectos como la descarbonización, descentralización y digitalización que hacen parte de la transición energética de la red, se seleccionan de acuerdo con la literatura las herramientas de apoyo que permiten la gestión, operación y control de la red eléctrica ante el dinamismo que presenta la incorporación de DER con una breve descripción de cada una de ellas.

Capítulo 3: esta etapa se centra en caracterizar las herramientas computacionales seleccionadas, definir sus capacidades, funcionalidades, beneficios y limitaciones con el fin de determinar cuál de ellas es la que mejor se adapta a las necesidades del sistema.

Capítulo 4: en esta etapa se presentan algunos casos de implementación propuestos en la literatura, determinando los aspectos relevantes que se han logrado evidenciar ante la utilización de este tipo de tecnologías en un escenario real.

A continuación, se presentan los objetivos planteados para la realización del presente trabajo de grado.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Realizar una revisión crítica de herramientas computacionales para la gestión de las redes eléctricas ante la integración de generación distribuida.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir los criterios de las herramientas de cómputo existentes que permitan realizar una adecuada gestión de las redes eléctricas.
- Seleccionar y describir las herramientas de cómputo más acordes con la gestión de las redes eléctricas ante la integración de generación distribuida.
- Determinar los beneficios y desventajas de las herramientas computacionales seleccionadas.
- Realizar una tabla donde se consolide las herramientas computacionales existentes con sus respectivas características, beneficios y casos de implementación a nivel mundial.

1. REDES ELÉCTRICAS TRADICIONALES MIGRANDO HACIA LAS REDES ELÉCTRICAS INTELIGENTES

Considerando la red eléctrica como el conjunto de líneas, transformadores e infraestructuras que permiten llevar la energía eléctrica desde los centros de producción hasta los consumidores. Estas redes son las encargadas de transportar y distribuir la electricidad generada en la centrales (ya sean las tradicionales como nucleares, hidráulicas, de carbón, etc. o renovables como fotovoltaicas, eólicas, entre otras) hasta los puntos de consumo final [1], [2]. Sin embargo, el aumento de la demanda de energía eléctrica producido por un incremento en el consumo energético ya sea de tipo industrial, comercial, residencial, etc; ocasiona que el sistema de potencia se encuentre sobre exigido y su capacidad para administrar y controlar las características técnicas, operativas y económicas se haya disminuido a causa de este incremento.

Es así como la inserción de recursos energéticos distribuidos, de forma localizada, cerca de las zonas de consumo, permite al sistema eléctrico optimizar los procesos de la cadena de la energía (generación, transmisión y distribución), contribuyendo con la descongestión de la red y reducción de pérdidas, aumentando la confiabilidad, seguridad y resiliencia del sistema. Además, la evolución tecnológica y aumento de la demanda han traído consigo necesidades desde la incorporación de generación distribuida hasta la electrificación de otros servicios energéticos cambiando drásticamente funcionamiento tradicional del sistema de potencia.

Ante esta situación la gestión de la red eléctrica necesita un entorno operativo cambiante; tener la capacidad de gestionar, operar y controlar la dinámica producida por la alta penetración de recursos distribuidos, que le permitan al operador del sistema hacer uso eficiente de sus recursos de manera confiable y segura. Lo anterior significa que las redes eléctricas requieren de respuestas más rápidas, controles avanzados, análisis más sofisticados, operaciones automatizadas, nuevos modelos reguladores y modelos de negocios innovadores, tanto a nivel de transmisión como de distribución [3].

Dentro de este panorama el uso de herramientas computacionales más versátiles y robustas permitirán una mayor interacción entre los componentes del sistema, además de garantizar un control avanzado de los recursos distribuidos conectados en la red eléctrica y dar mayor flexibilidad ante la producción e interacción con los clientes.

Las herramientas computacionales (aplicación o recursos de software) se pueden definir como los medios utilizados para realizar un determinado fin; por medio de estas herramientas se facilitan los trabajos diarios en hábitos laborales de cualquier índole. Cabe señalar que desde hace décadas y hasta la actualidad las herramientas computacionales, han permitido agilizar los procesos y tareas que se presentan a nivel industrial, residencial, etc. Estas aplicaciones o recursos han

permitido una interacción más fluida entre las operaciones que se pueden ejercer en un sistema y el personal capacitado para realizar alguna maniobra sobre él.

En el contexto de las redes eléctricas, estas herramientas han permitido realizar una adecuada gestión de la red y obtener una información más detalla de las variables del sistema, permitiendo al operador del sistema agilizar la toma de decisiones y hacer uso adecuado de sus recursos de forma confiable y segura. A medida que las redes de eléctricas han incorporado herramientas más sofisticadas en su centro de control, han incrementado su capacidad de prevenir y solucionar situaciones dentro del sistema de forma más ágil y precisa.

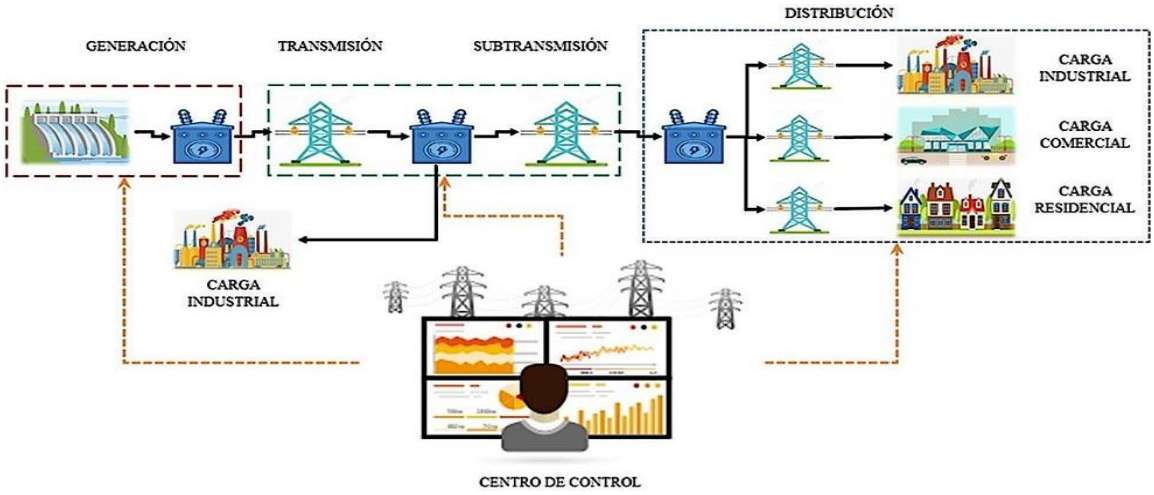
Sin embargo, la red eléctrica actual no fue diseñada considerando la incorporación de recursos energéticos distribuidos y no es posible gestionarla y operarla con las mismas herramientas que se han gestionado las redes eléctricas tradicionales. Por otra parte, con el acelerado avance tecnológico las redes eléctricas han evolucionado y la tendencia hacia la red inteligente o *Smart Grid* adquiere un papel importante al momento de gestionar, controlar y operar las redes eléctricas de forma eficiente y segura. Son múltiples las ventajas que puede tener una red eléctrica, tanto en tendencias de consumo, como en fiabilidad, eficiencia energética, etc [4].

En este capítulo se describen las etapas de la cadena de la energía eléctrica, considerando el centro de control y sus respectivas responsabilidades operativas tanto para una red tradicional como para el concepto de red inteligente o *Smart Grid*. Se presentan las tecnologías y funcionalidades de la red inteligente (AMI, ADA y DER), se describen los niveles de operación/control de la red y para finalizar se presenta el concepto de herramienta computacional y los beneficios que ha traído su uso en el sistema de potencia.

1.1 REDES ELÉCTRICAS TRADICIONALES

La red eléctrica tradicional se ha caracterizado por ser sistema unidireccional, es decir su diseño está encargado de tomar la energía de los niveles más altos de tensión y distribuirlo al usuario final con un flujo unidireccional en todo el sistema. A continuación, se presentan las etapas del sistema de potencia involucradas en los procesos de la cadena de la energía eléctrica (generación, transmisión y distribución) que permiten a la red realizar la entrega de energía hacia los usuarios finales. Así mismo se presenta el centro de control, el cual está encargado de garantizar un suministro de energía eléctrica seguro y de calidad.

Figura 1. Esquema de la red eléctrica tradicional.



1.1.1 Generación. La generación constituye el primer eslabón del sistema de suministro de energía eléctrica, en esta etapa se inicia el proceso de conversión de energía primaria a una que pueda ser mejor utilizada. Este proceso consiste en la transformación de cualquier clase de energía química, mecánica, térmica, hidráulica, solar entre otras en energía eléctrica [5], [6].

1.1.2 Transmisión. La segunda parte de la cadena de la energía eléctrica es la transmisión, esta consiste en el transporte de la energía eléctrica desde las centrales de generación hasta los grandes centros de consumo [5]. Las líneas de trasmisión son los medios de enlace o eslabones entre la generación eléctrica y los centros de utilización que se encuentran normalmente distanciados [6].

1.1.3 Distribución. La distribución, consiste en el transporte de energía desde los grandes centros de consumo hasta el usuario final, convirtiéndose este último en el eslabón final del sistema eléctrico de potencia [5]. En las redes de distribución la finalidad es transformar y aprovechar la energía eléctrica bien sea, en forma de luz, calor o energía mecánica para procesos industriales o en zonas urbanas y rurales [6].

1.1.4 Centro de control. El centro de control es considerado el componente central del sistema de potencia. Desde ahí se ajusta condiciones, coordina movimientos y proporciona protección al sistema de potencia ante eventos producidos en el mismo [7].

Las redes eléctricas tradicionales se han gestionado cuidadosamente desde el centro de control para garantizar el mantenimiento de un suministro de energía suficiente a pesar de los picos y valles de la demanda. Cada sección de la red tiene

un centro de operaciones que realizan y coordinan diversas funciones, como la vigilancia de sistemas, el control y la administración y expedición de cuadrillas. Se ha considerado tradicionalmente “el cerebro” del sistema eléctrico, desde el que se han dirigido las operaciones [8].

Además, el operador del sistema se encarga de supervisar toda la información proveniente de las variables del sistema, con el objetivo de mantener y controlar estas variables dentro de los valores establecidos en la regulación, y realizar la atención de la demanda de energía, de manera confiable, segura y económica, garantizando la continuidad y la calidad del servicio a los usuarios [9], [10].

En la actualidad los centros de control se han caracterizado por estar constituidos por: sistema de gestión de energía (EMS), el control de supervisión y adquisición de datos (SCADA), sistemas de gestión de distribución (DMS), sistema de gestión de interrupciones (OMS), entre otras. Estas herramientas se han caracterizado por ser sistemas independientes, además de necesitar de la participación activa de operadores capacitados para la toma de decisiones al momento de realizar una operación en el sistema [11].

De acuerdo con [11], las responsabilidades operativas del centro del control tradicional son principalmente:

- Gestión de energía.
- Control de la red eléctrica.
- Gestión dinámica de carga.
- Gestión de fallos.
- Gestión de cortes.

Por lo anterior la gestión en una red eléctrica puede interpretarse como el conjunto de operaciones que se realizan para administrar las tareas de la red, y que implica la coordinación entre los eslabones o elementos estructurales de la red, orientándose a dar respuesta a una serie de funciones específicas [12].

Por otro lado, las redes eléctricas están cambiando su forma de operar para atender la creciente demanda. Los sistemas tradicionales de supervisión, gestión y control no están preparados para atender estas exigencias de cambio dinámico y han aparecido en la red eléctrica nuevos generadores de electricidad, de diferentes tamaños y tecnológicas; todos estos aspectos generan retos para las redes eléctricas futuras [13].

Por lo cual la red eléctrica tradicional está evolucionando hacía una nueva perspectiva donde los recursos distribuidos como la generación distribuida basada en fuentes de energía renovable están adquiriendo un papel muy relevante. Esta modernización de nuestras redes de transporte y distribución se basa en la implementación de sistemas automáticos inteligentes, que permitan un uso eficiente de la energía eléctrica que se genera, a través de una comunicación bidireccional entre el consumidor y el generador de la energía [14].

1.2 TRANSICIÓN DE LAS REDES ELÉCTRICAS

En el último siglo, los sistemas eléctricos de potencia se han expandido de manera vertiginosa, creando necesidades y requerimientos cada vez más avanzados en áreas como generación distribuida, medición, comunicaciones, ciberseguridad, entre otros [13].

Actualmente, los recursos energéticos distribuidos (DER) están alcanzando un grado de penetración cada vez más importante, lo que hace necesario modificar la forma en que están planificados y operados los sistemas de transmisión y distribución, incluyendo un mayor nivel de automatismo e inteligencia en las redes eléctricas [1], [4]. Además, el comportamiento dinámico de los sistemas de distribución hace necesario involucrar un modelo de gestión que brinde soluciones versátiles y adaptables ante estos nuevos escenarios [15], que permita al operador de red y usuarios beneficios compartidos, optimizando los procesos de la cadena de la energía eléctrica, aumentando la confiabilidad, seguridad y resiliencia del sistema eléctrico.

Además, a medida que los sistemas de distribución evolucionan y se convierten en sistemas de distribución inteligentes, los centros de operaciones que los controlan están evolucionando para adoptar funciones nuevas para gestionar dichas redes. Los distintos sistemas utilizados en esos centros de control se están simplificando y se comunican con fluidez para proporcionar un sistema integrado de vigilancia, control y gestión. Las aplicaciones y el software analítico más avanzados están proporcionando análisis más sofisticados y operaciones automatizadas, dando como resultado un sistema más eficiente y confiable [8].

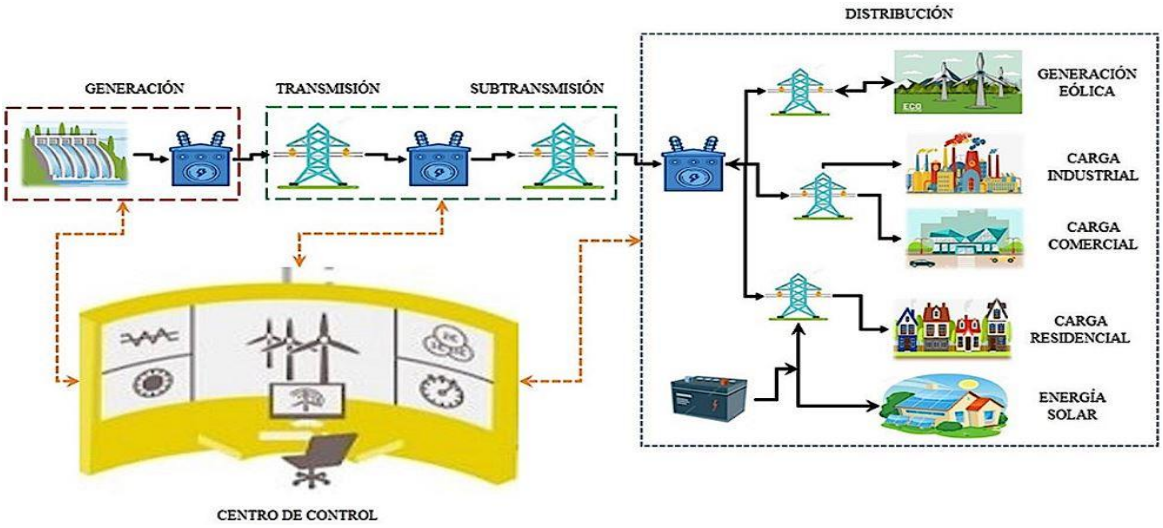
1.3 REDES INTELIGENTES O *SMART GRIDS*

Las redes inteligentes (RI) o también conocidas como *Smart Grids* (SG), surgen como una respuesta a la necesidad de modernizar la red eléctrica, articulando los procesos de operación, control y gestión con generación por medio de recursos distribuidos [16].

De acuerdo a [14], [16]–[18], el concepto de Red Inteligente o *Smart Grid* se define como un sistema de potencia capaz de integrar la generación (generación centralizada a través de grandes plantas generadoras, con la generación distribuida en pequeña escala de energías renovables), usuarios conectados a ella (quienes generan electricidad, quienes consumen y quienes realizan ambas acciones) y demás componentes del sistema eléctrico de forma inteligente (sistemas de control, ordenadores, comunicación, nuevas tecnología y equipos trabajando en conjunto) con el fin de proporcionar un suministro de electricidad seguro, económico y sostenible.

En la Figura 2, podemos observa un esquema de red Inteligente caracterizado por la incorporación de generación distribuida, almacenamiento de energia y flujo bidericcional, estas caracteristicas determinan la transición desde un sistema eléctrico centralizado hacia un sistema eléctrico distribuido. Además de un centro de operaciones capaz de incorporar nuevas herramientas para realizar funciones de manera eficiente y precisa, que respalden la confiabilidad de la red.

Figura 2. Esquema de una RI.



Una de las características más importantes que diferencia una red eléctrica inteligente de una tradicional es su capacidad de soportar un flujo de energía bidireccional, es decir, pasar del esquema en que el flujo de energía va solo desde las grandes plantas de generación hacia los usuarios finales, particulares o industriales a otro que incorpora y aprovecha la capacidad de los recursos distribuidos, con un rol activo para los usuarios, en el que son capaces de proveer energía a otros usuarios [19].

De acuerdo a lo anterior en [14], [20]–[22] se plantean que la finalidad de las redes inteligentes es:

- Garantizar óptimos niveles de fiabilidad, seguridad y calidad del suministro.
- Reducir el impacto medioambiental del sistema eléctrico de suministro.
- Proveer a los consumidores con más información para la elección de oferta y demanda.
- Permitir a los consumidores formar una parte importante en la optimización de la operación del sistema.
- Facilitar y administrar la conexión y operación de los generadores de energía no convencional, todo tipo de tamaños y tecnologías a gran escala.

1.4 TECNOLOGÍAS Y FUNCIONALIDADES DE LAS RI

Una RI requiere una visión integral del sistema eléctrico ya que se han desarrollado tecnologías y funcionalidades en búsqueda de logar la total inter-relación entre los diferentes componentes del sistema de potencia con el objetivo de lograr una interoperabilidad del sistema y con ello ampliar los beneficios.

1.4.1 Infraestructura de Medición Avanzada (AMI). Las aplicaciones de las RI necesitan información sobre el estado de la red, los consumidores y los generadores. La infraestructura de medida, junto con una red de comunicaciones adecuada, proporciona a la RI la información necesaria para la toma de decisiones y los medios adecuados para el envío y recepción de órdenes y consignas. AMI es un sistema de comunicación bidireccional que conecta medidores inteligentes y otros dispositivos de gestión energética, capaz de ofrecer información en tiempo real de la demanda, permitiendo la participación activa del usuario y el mercado eléctrico [14], [23]–[25].

1.4.2 Automatización Avanzada de Distribución (ADA). El objetivo del ADA es mejorar la confiablidad y la calidad de la energía, así como hacer más eficiente el sistema eléctrico en general, por medio de la automatización de los procesos de distribución, ejecutando análisis y toma de datos lo más cercano posible al tiempo real. El uso de la infraestructura de medida y la red de comunicación permiten optimizar la toma de decisiones del sistema, además maximizar la integración de los recursos energéticos distribuidos (DER), para mejorar la continuidad y calidad de suministro. Adicionalmente, la reconfiguración automática puede aportar mejoras en la eficiencia técnica de la red y controlar las operaciones de distribución, todo esto en coordinación con los sistemas de generación y transmisión [23]–[26].

1.4.3 Recursos Energéticos Distribuidos (DER). Los DER permiten al sistema la capacidad de proporcionar energía y flexibilidad cuando el sistema lo necesite. Estos sistemas pueden estar conectados a la red de generación eléctrica local o bien aislados de la red en aplicaciones autónomas [27]. A su vez el uso de tecnologías como la generación distribuida aportan cercanía de la generación al consumidor, lo que reduce las pérdidas técnicas asociadas al transporte y mejora de la red. Además, DER permite la participación activa de los usuarios como generadores (prosumidor), condición que proporciona beneficios compartidos entre la red y el usuario [22]–[24].

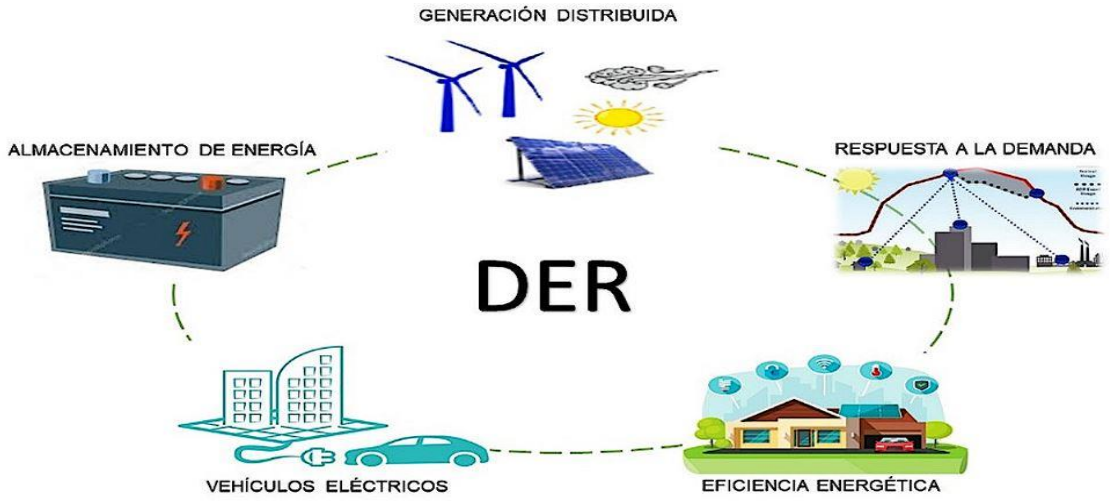
De acuerdo con la literatura el concepto de recursos energéticos distribuidos aun no es algo concreto y único, por el contrario, conllevan a una gran variedad de significados que llevan consigo una gran similitud teniendo en cuenta los diferentes aspectos y variantes que posee. A continuación, se presentan algunos significados relacionados con DER hallados en la literatura consultada.

- Los recursos energéticos distribuidos (DER) incluyen la generación distribuida descentralizada (eólica, fotovoltaica, módulo diésel entre otros) y el almacenamiento de energía distribuida (baterías) [4].
- Recursos energéticos distribuidos es un término que se aplica a una amplia variedad de tecnologías y productos de consumo, incluida la generación distribuida, inversores inteligentes, almacenamiento de energía de baterías distribuidas, eficiencia energética (EE), respuesta a la demanda (RD) y vehículos eléctricos (VE) [28].
- DER se definen como tecnologías de generación y/o almacenamiento de electricidad ubicadas dentro de los límites del área de una utilidad de distribución en particular, generalmente conectadas a unidades de consumo. DER contempla: i) generación distribuida (GD), ii) almacenamiento de energía, iii) vehículos eléctricos (VE) y infraestructura de recarga, vi) eficiencia energética y vii) gestión del lado de la demanda [29].
- Los DER son activos virtuales y físicos que se implementan en la red de distribución, por lo general cerca de la carga, y generalmente detrás del medidor, que se pueden usar individualmente o en conjunto para proporcionar valor a la red, clientes individuales o ambos. Un interés particular de la industria parece estar centrado en los DER, como la energía solar, el almacenamiento, la eficiencia energética y la gestión de la demanda, que pueden agregarse para proporcionar servicios a la red eléctrica [30].
- Tradicionalmente, los DER se refieren a recursos de generación pequeños y geográficamente dispersos, como la energía solar o CHP, ubicados en el sistema de distribución. Sin embargo, la definición de DER ha evolucionado para incluir no solo recursos de generación, sino también almacenamiento de energía, eficiencia energética y respuesta a la demanda [31].
- Los recursos energéticos distribuidos son tecnologías de generación y almacenamiento de energía pequeñas y modulares, conectadas principalmente a una red de media y baja tensión, que proporcionan capacidad eléctrica, energía y flexibilidad cuando hace falta. Estos sistemas pueden estar conectados a la red de generación eléctrica local o bien aislados de la red en aplicaciones autónomas. Las tecnologías DER incluyen principalmente las energías renovables de pequeña y mediana escala, la eficiencia energética, los sistemas físicos y virtuales de almacenaje, la gestión de la demanda y el vehículo eléctrico [27].

Como conclusión de las definiciones presentadas se puede decir que: el concepto de recursos energéticos distribuidos (DER) ha evolucionado a lo largo de los años, incluyendo un gran número de dispositivos y tecnologías de diferentes tamaños. El avance tecnológico y la digitalización de la red ha llevado a este concepto a pasar de una definición acotada que incluía únicamente la generación distribuida en la red a pequeña escala a un término más amplio que comprende un conjunto diverso de tecnologías que permiten generar y/o almacenar energía eléctrica. Para la finalidad de este trabajo DER contempla tecnologías como: generación distribuida (GD),

almacenamiento de energía (AA), vehículos eléctricos (VE), respuesta a la demanda (RD) y eficiencia energética (EE).

Figura 3. Recursos energéticos distribuidos DER.



A continuación, se describen las diferentes definiciones adoptadas para cada uno de los elementos que compone el concepto de DER:

1.4.3.1 Generación distribuida (GD).

- De acuerdo a la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía de México, la generación distribuida GD, es la generación y/o almacenamiento de energía eléctrica a pequeña escala, lo más cercana al centro de consumo, la cual tiene la opción de interactuar con la red eléctrica, comprando o vendiendo energía [17].
- La GD es la generación o el almacenamiento de energía eléctrica a pequeña escala, muy cercana al centro de carga, con la opción o alternativa de interactuar (comprar o vender) con la red eléctrica o eventualmente operar en forma aislada, del sistema de distribución al que potencialmente se puede enlazar [32].

1.4.3.2 Almacenamiento de energía (AA). De acuerdo con [22], [28], [33], el almacenamiento de energía se define como el sistema o dispositivo capaz de almacenar energía para su utilización ya sea a corto o largo plazo, sin tener perjuicio o pérdida de esta a lo largo del tiempo. Los diferentes tipos de almacenamiento se diferencian entre sí por las diferentes clases de energía almacenada, por las diferentes clases de energía recuperada, y por el diferente nivel de eficiencia del proceso y transformación de la energía.

1.4.3.3 Respuesta a la demanda (RD). RD hace referencia a los cambios en el uso de la electricidad por parte de los recursos de la demanda de sus patrones de consumo normales en respuesta a los cambios en el precio de la electricidad a lo largo del tiempo, o para incentivar los pagos diseñados para inducir un menor uso de la electricidad en momentos de altos precios del mercado mayorista o cuando la confiabilidad del sistema está en peligro [34]. La respuesta de la demanda es un elemento importante de la seguridad del suministro, favorece la integración de las energías renovables, la mejora de la competencia en el mercado y da mayor dominio al consumidor [27].

1.4.3.4 Eficiencia energética (EE). La eficiencia energética se refiere a las tecnologías y comportamientos ubicados en el cliente que reducen el consumo de energía de uso final del consumidor. La eficiencia energética puede dirigirse a clientes residenciales, comerciales e industriales, y generalmente se enfoca en la eficiencia de los edificios, como mejoras de iluminación o aislamiento, mejoras mecánicas de calefacción, refrigeración, electrodomésticos y sistemas industriales, o medidas pasivas que monitorean y controlan el consumo de energía [28].

1.4.3.5 Vehículo eléctrico (VE). El desarrollo del transporte eléctrico ha reducido la emisión de gases de efecto invernadero como resultado de la disminución del uso de combustibles fósiles. Estas tecnologías representan un importante desafío para las redes eléctricas del futuro, donde los usuarios de VE participan activamente con la red (recargando o descargando) las baterías por medio del sistema eléctrico. Un adecuado control de dichos procesos implica una capacidad de gestionar la demanda, posibilitando el aplanamiento de la curva de demanda [23], [24].

1.5 CENTRO DE CONTROL DE REDES INTELIGENTES

La información oportuna de la red se logra cuando estas logran hacer RI, es decir más inteligentes. La generación, transmisión, distribución y consumidores pueden tomar decisiones informadas en el momento más apropiado. El control inteligente de las RI es necesario para la programación óptima de las fuentes de energía, maximizar el transporte, estabilidad transitoria y el control de potencia [16], permitiendo una gestión adecuada de la cadena de la energía optimizando su generación.

En este contexto el centro de control es responsable de la operación coordinada en tiempo real de las instalaciones de generación y de transporte del sistema eléctrico. Con la información obtenida del sistema se comprueba su funcionamiento y se realiza la toma de decisiones que a través de la red de un uso óptimo de los recursos. La gestión del sistema de potencia debe de ser capaz de entregar energía eléctrica a todos los consumidores, sin que se produzcan interrupciones en el suministro garantizando la confiabilidad, seguridad y resiliencia del sistema [14].

Además, con la integración de DER, su funcionamiento y control operativo se hace más complejo. Por lo cual es necesario dotar a la red eléctrica tradicional de equipamiento que aumente las posibilidades de control. Los principales recursos corresponden con equipamiento electrónico de última generación, sistemas de comunicación y herramientas de gestión o manejo de la red [35].

De acuerdo a [11] el centro del control de redes inteligentes debe garantizar además de las responsabilidades operativas del centro del control tradicional, la operación y control de:

- Gestión de la demanda máxima.
- Gestión del programa de respuesta a la demanda.
- Gestión de calidad de energía.
- Gestión de potencia reactiva.
- Gestión de pérdidas.
- Gestión predictiva de la interrupción.
- Gestión de mantenimiento predictivo.
- Gestión de los recursos distribuidos.

En la Tabla 1, se presenta un resumen de las diferencias entre la red eléctrica tradicional y la red inteligente, considerando toda la cadena de la energía eléctrica y los centros de control.

Tabla 1. Diferencias entre la red eléctrica actual y la red inteligente.

Características	Red eléctrica actual	Red inteligente (RI)
Control e inteligencia	Sistema independiente. Toma de decisiones mediante operación manual (carencia de inteligencia).	Infraestructura de Medición Avanzada (AMI). Capaz de ofrecer información en tiempo real mediante sistemas inteligentes, plataformas operativas y software potentes, flexibles e intuitivas
Automatización	Escaso nivel de automatización. Carencia de elementos para la supervisión del sistema	Automatización Avanzada de Distribución (ADA). Maximiza la integración de los recursos energéticos distribuidos (DER)
Consumidor	La relación entre el sistema y los consumidores es nula, sin presentar participación de la generación eléctrica del sistema	Participación dinámica de los usuarios debido a que son capaces no solo de consumir potencia sino también de producirla (prosumidor)
Flujo de energía	Caracterizado por la presencia de flujo unidireccional desde la generación hasta el usuario final	Presenta flujo bidireccional producido por la incorporación de unidades de GD en la distribución del sistema
Autoajuste	Considera la protección de los dispositivos ante afectaciones en el sistema	Realiza detención automática de fallas y responde a problemas de distribución. Busca la prevención. Minimiza el impacto en el consumidor
Generación y almacenamiento	Grandes exigencias en el sistema ante la interconexión de nuevos generadores de electricidad	Recursos Energéticos Distribuidos (DER). Permite la integración rápida y eficiente de fuentes no convencionales y los sistemas de almacenamiento a la red
Vehículos eléctricos	Desafíos técnicos para la carga y descarga de baterías de vehículos	Vehículo eléctrico (VE) participan activamente con la red (recargando o descargando) las baterías por medio del sistema eléctrico. Se convierten en generadores eléctricos

Fuente: Adaptado de [14], [36]

1.6 JERARQUÍA DE OPERACIÓN / CONTROL EN LAS REDES ELECTRICAS MODERNAS

El control jerárquico ha sido aplicado en sistemas eléctricos de potencia por décadas y está usándose en RI con el fin de realizar una operación eficiente desde el centro de control. La jerarquía de la operación/control del sistema de potencia se basa en tres niveles los cuales realizan una determinada función diferente dentro de la operación y control del sistema.

A continuación, se presentan las características de los niveles de la jerarquía de operación y control de la red eléctrica. En la Figura 4 se puede observar el nivel de jerarquía de las RI en un centro de control.

Figura 4. Niveles jerárquicos de operación/control.

Fuente: Adaptado de [37], [38]

1.6.1 Nivel de bahía. El nivel bahía o también conocido como control primario, está encargado de simular comportamientos físicos del sistema respondiendo a su dinámica y garantizando que las variables del sistema (por ejemplo, voltaje y frecuencia) sigan sus puntos de ajuste con el fin de mantener el sistema estable conservando los niveles de generación y evitando las desviaciones de los parámetros básicos en los terminales. Además es el encargado de administrar la cantidad de potencia activa y reactiva entregada por cada generador distribuido en el punto de conexión [37]–[39].

En este nivel los operadores están encargados de realizar operaciones diarias del sistema con el objetivo de administrar las cargas (eliminación y gestión), la

interrupción y falla de la red de distribución, así mismo como la restauración de las mismas que permitan un funcionamiento confiable de la red [11].

1.6.2 Nivel central. El nivel central o también conocido como control secundario, es el responsable de garantizar la calidad de energía y estabilizar el sistema restableciendo los valores nominales de tensión y frecuencia. También puede incluir la sincronización con la red para conectarse y desconectarse de ésta [37]–[39].

En el nivel central los operadores están encargados de ajustar la demanda máxima del sistema, administrar la calidad de la energía y realizar predicciones de interrupciones, además de garantizar un buen perfil de tensión en la red [11].

1.6.3 Nivel de red. El control de red o también conocido como control terciario, es el nivel más alto de control y está encargado de controlar el flujo de potencia entre los generadores distribuidos y la red, ya sea de importación o exportación en un punto de conexión común, realizando a su vez un trabajo de optimización económica. En algunos casos también incluye el control de la generación eléctrica y es llevado a cabo mediante sistemas de manejo de la energía [37]–[39].

En el nivel de red los operadores se encargan de realizar programas de respuesta a la demanda y toma de medidas para ejecutar operaciones seguras confiables y eficientes que cumplan con las estrategias comerciales y de operación del sistema. En este nivel se controla las actividades de los niveles central y bahía del sistema, permitiendo realizar una acción global de las acciones que se realicen en los niveles inferiores [11].

La incorporación de aplicaciones y software más analíticos y sofisticados permiten al centro de control realizar adecuada gestión, operación y optimización de procesos de los sistemas eléctricos, es por ello que ante la modernización de las redes eléctricas es importante considerar las herramientas que permitan al operador de red agilizar los procesos de la cadena de la energía eléctrica y el uso óptimo de los recursos con el fin de mejorar la eficiencia, confiabilidad y resiliencia de la red.

1.7 HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES

Las herramientas computacionales se pueden definir como los medios utilizados para realizar un determinado fin, las cuales permiten la máxima calidad en su uso. Por medio de estas herramientas se facilitan los trabajos diarios en ámbitos laborales de cualquier índole. En este contexto una herramienta computacional se define como toda aplicación o recurso (software) que permite y ayuda a realizar un proceso de forma más ágil y eficiente.

En las redes eléctricas tradicionales herramientas como los Sistema de Gestión de Energía (EMS), el Control de Supervisión y Adquisición de Datos (SCADA),

Sistemas de Gestión de Distribución (DMS), Sistema de Gestión de Interrupciones (OMS) se han incorporado a los centros de control con el objetivo de brindar soluciones más versátiles para la gestión, operación y control de la red. Este tipo de herramientas han permitido al operador del sistema hacer frente a las operaciones diarias, fallas, cortes de energía y gestión de carga de la red garantizando la confiabilidad y calidad del servicio.

El control y operación de los sistemas eléctricos de potencia cumplen un papel primordial al momento de garantizar confiabilidad y calidad del sistema eléctrico. Con los avances tecnológicos y el uso herramientas computacionales más sofisticadas se busca brinda a la red eléctrica un mayor nivel de automatismo e inteligencia, además la capacidad de funcionar conjuntamente entre sus componentes y niveles jerárquicos que permita aumentar la confiabilidad, seguridad y resiliencia del sistema eléctrico.

Como se mencionó anteriormente la modernización y la aparición de las redes inteligentes con recursos activos como la generación distribuida, control de conmutación, automatización y cargas variables, produce que su operación sea cada vez más compleja y las herramientas utilizadas no sean capaces de gestionar de forma óptima el uso de los recursos del sistema [40]. Lo anterior debido a que las herramientas utilizadas actualmente por las redes eléctricas son insuficientes para su análisis y operación.

En los últimos años, se ha acelerado la inserción de DER, debido principalmente a la reducción de los costos de inversión y transacción, a la mayor difusión de las tecnologías de telecomunicación, control, y al papel más activo de los consumidores [29]. Al igual que las redes eléctricas, la definición de DER ha evolucionado para incluir no solo recursos de generación, sino también recursos de almacenamiento de energía, eficiencia energética y respuesta a la demanda [27].

Ante esta evolución la era digital ha transformado todos los sectores. La electricidad se fusiona con las tecnologías de la información y la comunicación, permitiendo a los centros de control hacer uso de herramientas capaces de obtener una mayor cantidad de información del sistema y de procesarla de manera eficiente, con el fin de permitir al operador del sistema realizar de manera ágil las operaciones de la red eléctrica de manera remota [41].

Es importante considerar una estructura que brinde unas condiciones apropiadas y las herramientas necesarias para la implementación de las redes inteligentes o *Smart Grids*, además de dar una mayor flexibilidad e interoperabilidad al sistema considerando las características y funcionalidades que presenta la transición de la red eléctrica tradicional hacia las redes inteligentes y la complejidad que esto conlleva al momento de operar y controlar esta nueva red.

2. HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES PARA LA GESTIÓN INTELIGENTE DE LAS REDES ELÉCTRICAS ANTE LA INSERCIÓN DE DER

Como se mencionó en el Capítulo 1, la incorporación de recursos energéticos distribuidos a la red eléctrica necesita de una estructura flexible que brinde soluciones versátiles y garantice la confiabilidad, seguridad y resiliencia en toda la cadena de la energía eléctrica. A su vez los centros de control deben adoptar herramientas innovadoras que permitan al operador del sistema una respuesta rápida a las situaciones que pueda presentarse ante la incorporación de DER y hacer uso adecuado de sus recursos de acuerdo con las necesidades presentes en el sistema en cada momento dado.

Un sistema eléctrico flexible brinda la capacidad de hacer frente a la variabilidad e incertidumbre generada ante la incorporación de recursos distribuidos, permitiendo garantizar que la generación y la carga permanezcan en equilibrio constante. La transición energética producida por la innovación tecnológica y elevada inserción de DER en el sistema, replantea la forma en la que se opera las redes eléctricas. Para ello, tendencias como la descarbonización, descentralización y digitalización están permitiendo conformar una estructura de red más resiliente y flexible capaz de operar, controlar y gestionar los recursos de la red de forma confiable y segura.

Por otra parte, las empresas de servicios públicos y los operadores de redes se enfrentan al desafío de administrar una gama de DER mucho más diversa, donde se requieren nuevas tecnologías y modelos de negocios que garanticen la operación confiable y segura de los recursos del sistema. Un factor crítico ante la adopción de altos niveles de recursos distribuidos es tener herramientas computacionales que permitan al operador del sistema respaldar la operación de una red más dinámica y flexible, con acciones como el pronóstico, gestión y optimización de carga, la agregación, análisis e integración de DER, entre otras.

Para enfrentar estos desafíos se han producido herramientas y plataformas digitales que van desde tecnologías que incluyen inteligencia artificial, blockchain, internet de las cosas hasta dispositivos de hardware y software cada vez más sofisticados que permitirán una mayor interacción entre los componentes del sistema y el control avanzado de los recursos distribuidos [42]. Y es que a medida que las penetraciones de DER en la red eléctrica aumentan; la innovación tecnológica permite el desarrollo e implementación de soluciones más versátiles y sofisticadas con la capacidad de monitorear, controlar y optimizar el flujo de energía a través de millones de DER conectados al sistema. Dentro de este panorama los sistemas de gestión de distribución avanzado (ADMS), los sistemas de gestión de recursos energéticos distribuidos (DERMS) y las plantas de energía virtual (VPP) proporcionan el software necesario para enfrentar estos desafíos.

Estas herramientas están diseñadas con el objetivo de permitir al operador del sistema comprender, planificar, operar y optimizar la cantidad creciente de DER que se encuentra en la red. Además, determinar cuáles son las empresas a la vanguardia y hacia donde se perfilan este tipo de tecnologías, presentará una amplia gama de posibilidades para convertir a DER en un recurso con el que se puede contar garantizando a las empresas de servicios públicos y al consumidor optimizar la eficiencia de la red, satisfacer la demanda cada vez mayor y minimizar los costos de energía. Es por esto, que conocer las soluciones prestadas por los proveedores de este tipo de herramientas y cómo pueden usarse para operar, controlar y optimizar los recursos distribuidos puede ser muy útil para su implementación en las redes eléctricas modernas.

En este capítulo, se presentan aspectos como la descarbonización, descentralización y digitalización que hacen parte de la transición energética de la red, se seleccionan de acuerdo con la literatura las herramientas de apoyo que permiten la gestión, operación y control de la red eléctrica ante el dinamismo que presenta la incorporación de DER con una breve descripción de cada una de ellas.

2.1 EVOLUCIÓN ENERGÉTICA A TRAVÉS DE LA INNOVACIÓN

La transición energética representa el alejamiento de una arquitectura de distribución y generación de energía centralizada, que consiste principalmente en grandes plantas de generación conectadas a los clientes mediante una extensa infraestructura de transmisión y distribución, hacia una red e infraestructura dinámica que integra tecnologías y capacidades de generación del lado de la demanda, así como recursos de energía distribuida junto con activos tradicionales. Además, representa una amplia gama de cambios estratégicos, operativos, tecnológicos, comerciales, ambientales y regulatorios que están transformando el modelo tradicional de la red [43].

Ante esta situación la transición energética requiere una “transformación del sistema eléctrico para incrementar su capacidad de respuesta y hacerlo más resiliente y eficiente. Esto implica un incremento en la utilización de recursos distribuidos, digitalización y refuerzo de las redes para que puedan funcionar como plataformas y facilitadores para los consumidores, ciudades y comunidades” [44].

De acuerdo con [43], [45], [46]; la transición energética está dada por cuatro factores claves como:

- Desarrollo e implementación de nuevas regulaciones en torno la generación distribuida, la medición neta, etc.
- La transición hacia una arquitectura de red cada vez más descentralizada como resultado de un aumento dramático en DER.
- Digitalización de la infraestructura al borde de la red eléctrica, gracias a un crecimiento sólido en la infraestructura de redes inteligentes.

- Inclusión de prosumidores, clientes que desean controlar su consumo y gasto de electricidad.

Por lo anterior, la alta participación de DER requiere innovaciones en todos los componentes del sistema de energía, incluidas las nuevas operaciones del sistema, regulaciones del mercado y la infraestructura; que permita al sistema de potencia integrar estos recursos de manera confiable y segura [47]. Para ello la red eléctrica debe convertirse un sistema más flexible e integrado que le permita aprovechar eficazmente la alta inserción de recursos distribuidos, además de mantener el equilibrio de la oferta y demanda del sistema.

En el contexto de las redes eléctricas, la innovación abarca los cambios que ayudan a superar las barreras y dan como resultado un despliegue acelerado los recursos distribuidos. De acuerdo con [47]–[49], la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA) ha identificado las sinergias y soluciones para la integración de un mayor número de DER. Como resultado la innovación del sistema de potencia se ha agrupado en las siguientes dimensiones:

2.1.1 Tecnologías habilitadoras. Las tecnologías que desempeñan un papel clave para facilitar la integración de DER. Donde la innovación tecnológica mejora las tecnologías existentes o introduce nuevas tecnologías.

El almacenamiento de energía, la gestión de la demanda y las tecnologías digitales están cambiando el sector energético, abriendo las puertas a nuevas aplicaciones que desbloquean la flexibilidad del sistema. La electrificación de los sectores de uso final está surgiendo como un nuevo mercado para las energías renovables, pero también podría proporcionar formas adicionales de flexibilizar la demanda, si se aplica de manera inteligente [48], [49].

2.1.2 Modelos de negocios. Los modelos innovadores que crean el caso de negocios para nuevos servicios, mejorando la flexibilidad del sistema e incentivando una mayor integración de DER.

Los modelos de negocios innovadores son clave para monetizar el nuevo valor creado por estas tecnologías y, por lo tanto, permiten su implementación. Para el consumidor, están surgiendo numerosos modelos de negocios innovadores, junto con esquemas innovadores que permiten el suministro de electricidad renovable en lugares con opciones limitadas, como áreas fuera de la red o áreas densamente pobladas [48], [49].

2.1.3 Diseño de mercado. Nuevas estructuras de mercado y cambios en el marco regulatorio para fomentar la flexibilidad y los servicios de valor necesarios en un sistema de energía eléctrica basado en DER, estimulando nuevas oportunidades de negocios.

Se necesita innovación en la regulación y el diseño del mercado, pero debe haber un equilibrio entre una regulación estable y predecible que pueda garantizar las inversiones del sector privado y una regulación flexible que permita la innovación. Al mismo tiempo, la velocidad de la innovación regulatoria debe alinearse con la velocidad del modelo de negocios y la innovación tecnológica. Adaptar el diseño del mercado a las nuevas instalaciones se vuelve crucial para acelerar la transición energética, permitiendo la creación de valor y flujos de ingresos adecuados. Tanto el mercado mayorista como el mercado minorista son necesarios para desbloquear todo el potencial de flexibilidad en el sistema de energía [48], [49].

2.1.4 Operación del sistema. Son formas innovadoras de operar el sistema eléctrico, lo que permite una mayor integración de DER, con el fin de reducir los costos. Con las nuevas tecnologías y el diseño sólido del mercado, las innovaciones en el funcionamiento del sistema también son necesarias y están surgiendo en respuesta a la alta integración de recursos distribuidos en la red. Estas incluyen innovaciones que se adaptan a la incertidumbre y la operación innovadora del sistema para integrar DER de forma confiable y segura [48], [49].

2.2 TENDENCIAS DE INNOVACIÓN

La innovación es crucial para permitir la transformación del sector energético. La red necesita adaptarse ante el panorama cambiante del sistema eléctrico, ya que la tecnología e innovación interrumpen la forma tradicional de la red desde la generación hasta el usuario final. Ante esta situación aspectos como la descarbonización, digitalización y descentralización; afectaran el comportamiento de la red eléctrica.

2.2.1 Descarbonización. La descarbonización de los sectores de uso final es una tendencia impulsada por los problemas de contaminación ambiental relacionados con la excesiva dependencia del petróleo y el diésel, además con la creciente disponibilidad de electricidad estimulada por la marcada disminución de los costos de los recursos energéticos distribuidos, se requerirá grandes inversiones en tecnología para reducir las emisiones de carbono al encontrar la combinación adecuada de recursos. Este desarrollo afectará las características de la red y requerirá la agregación y administración de sitios de generación a pequeña escala [50].

Así mismo la creciente disponibilidad de electricidad por medio de recursos distribuidos de energía, el desarrollo e implementación de nuevas regulaciones y la aparición de clientes activos en el sistema van de la mano con las tendencias de digitalización, lo que hace que los dispositivos sean más inteligentes y estén cada vez más conectados. Esto aumenta la complejidad de las características de la demanda de energía y puede impulsar la transición fundamental de un sistema de energía que está diseñado para hacer frente a cargas pico claramente definidas, a

una que aproveche al máximo la demanda como fuente de flexibilidad para el sistema [48].

Ante esta situación, las empresas de distribución deberán ser ágiles para responder a esta rápida infiltración de DER en sus sistemas. El equilibrio, que hoy es predominantemente un problema del sistema de transmisión, se convertirá en un elemento crítico en las operaciones de distribución diarias. Como resultado, la flexibilidad, la capacidad de aumentar el suministro y, potencialmente, la demanda, subir y bajar según sea necesario, se convertirá en un criterio de rendimiento clave para los proveedores de energía [51].

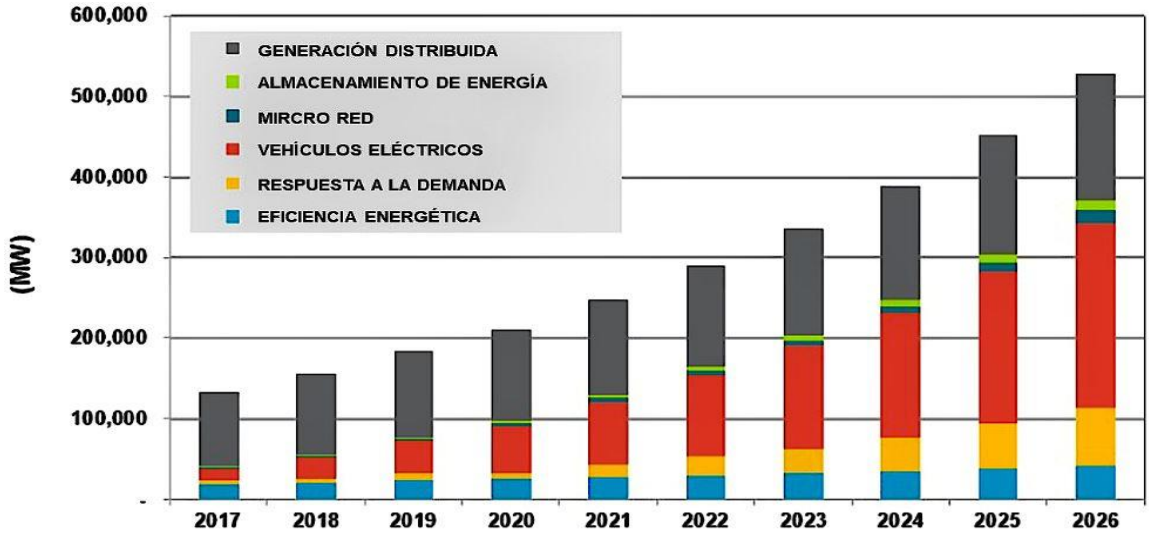
Además, cuando la incorporación al sistema de recursos distribuidos de energía excede los niveles de generación, la electrificación de los sectores de uso final es una solución emergente para mantener su valor, evitar la restricción y, cumple un papel importante en la descarbonización tanto del transporte como del calor.

2.2.2 Descentralización. La descentralización convierte a los clientes en elementos activos del sistema, los recursos energéticos distribuidos convierten al consumidor en un participante activo en el mercado energético, lo que permite una mayor gestión por el lado de la demanda. Las tecnologías como la generación distribuida, almacenamiento de energía, vehículos eléctricos, respuesta a la demanda y eficiencia energética cumplen un papel fundamental en la descentralización del sistema y conllevan al surgimiento de muchas tareas nuevas de gestión de energía.

La integración masiva de DER está cambiando fundamentalmente la forma en que producimos y usamos la energía (oferta-demanda) [52]. De acuerdo con [42], en 2017, se agregaron 132.4 GW de capacidad de DER a nivel mundial, y se prevé una proyección a 528.4 GW en 2026 a una tasa de crecimiento anual compuesta de 16.6%. Las previsiones de mercado de Navigant Research (Figura 5) también muestran que, a partir de 2018, las nuevas incorporaciones anuales de DER superan la capacidad de las centrales eléctricas centralizadas.

En este mercado rápidamente cambiante, los prosumidores se encuentran produciendo más electricidad de la que necesitan durante gran parte del día y vendiendo ese exceso a la red. Ahora, más que nunca, los clientes ven a las empresas de servicios públicos como un minorista más, y anticipan el mismo nivel de capacidad de respuesta multiplataforma que reciben de otras marcas minoristas principales. Además, el control residencial de la temperatura y los electrodomésticos está alcanzando un nivel de sofisticación que antes era solo factible para instalaciones industriales y comerciales mucho más grandes. Los termostatos inteligentes, los calentadores de agua conectados a internet e incluso las unidades de aire acondicionado de ventana pueden controlarse durante los eventos pico, lo que limita la necesidad de una nueva generación [51].

Figura 5.Capacidad de potencia total instalada de DER por tecnología. Mercados del mundo: 2017-2026.



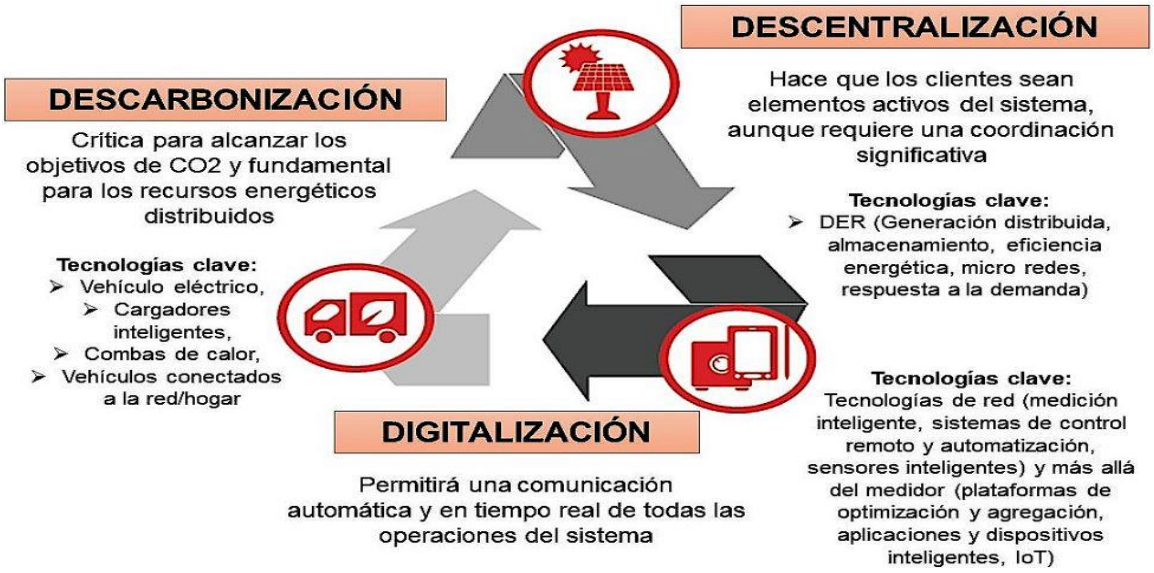
Fuente: [42].

2.2.3 Digitalización. Las tecnologías digitales permiten cada vez más dispositivos a través de la red para comunicarse y proporcionar datos útiles para los clientes y para la gestión, control y operación de la red. Los medidores inteligentes, los nuevos sensores inteligentes, los sistemas de control remoto y automatización de la red y las plataformas digitales que se centran en la optimización y la agregación permiten el funcionamiento en tiempo real de la red y sus recursos conectados, además. recopilan datos de la red para mejorar el conocimiento de la situación y del servicio [53].

Así mismo, las tecnologías digitales pueden admitir la integración de DER a través de una respuesta más rápida, una mejor gestión de los activos, la conexión de dispositivos, la recopilación y el intercambio de datos. La digitalización permite operaciones más refinadas, un mayor control, incluida la optimización automática y en tiempo real del consumo, la producción y la interacción con los clientes (entre ellas: un mejor monitoreo de los activos y su desempeño); implementación de nuevos diseños de mercado; y la aparición de nuevos modelos de negocio [48], [53].

La digitalización se puede definir como la conversión de datos en valor para el sector energético. La aplicación de tecnologías de monitoreo y control digital en los dominios de generación y transmisión de energía apoyan la transformación del sistema energético de varias maneras, entre ellas: un mejor monitoreo y desempeño de los activos. El diseño inteligente de las plataformas basadas en datos y los modelos de negocios podrían permitir a las empresas de servicios públicos crear nuevas fuentes de ingresos, incluso a partir de activos que no son de su propiedad [48], [50].

Figura 6. Tendencias de innovación de la red eléctrica.



Fuente: Adaptado de [53]

La acelerada sofisticación de las herramientas computacionales, equipos de monitoreo y automatización remota, combinados con un análisis de datos robusto proporcionan la base primordial de la transición energética. Ante esta situación se ha creado una demanda para una nueva generación de sistemas inteligentes, plataformas operativas que van desde tecnologías que incluyen inteligencia artificial, blockchain, internet de las cosas hasta dispositivos de hardware y software cada vez más sofisticados que brinden a los operadores del sistema de potencia herramientas potentes, flexibles e intuitivas para respaldar sus operaciones en toda la cadena de la energia electrica. Con la finalidad de que los centros de control evolucionen y sean capaces de realizar control optimo de la red que permita garantizar la confiabilidad y calidad de potencia del sistema.

Por lo anterior diversas compañías están a la vanguardia creando módulos, plataformas y software para agilizar la red eléctrica y de esta manera brindar soluciones versátiles para la gestión, operación y control de las redes eléctricas en tiempo real ante la integración de DER, como la generación distribuida.

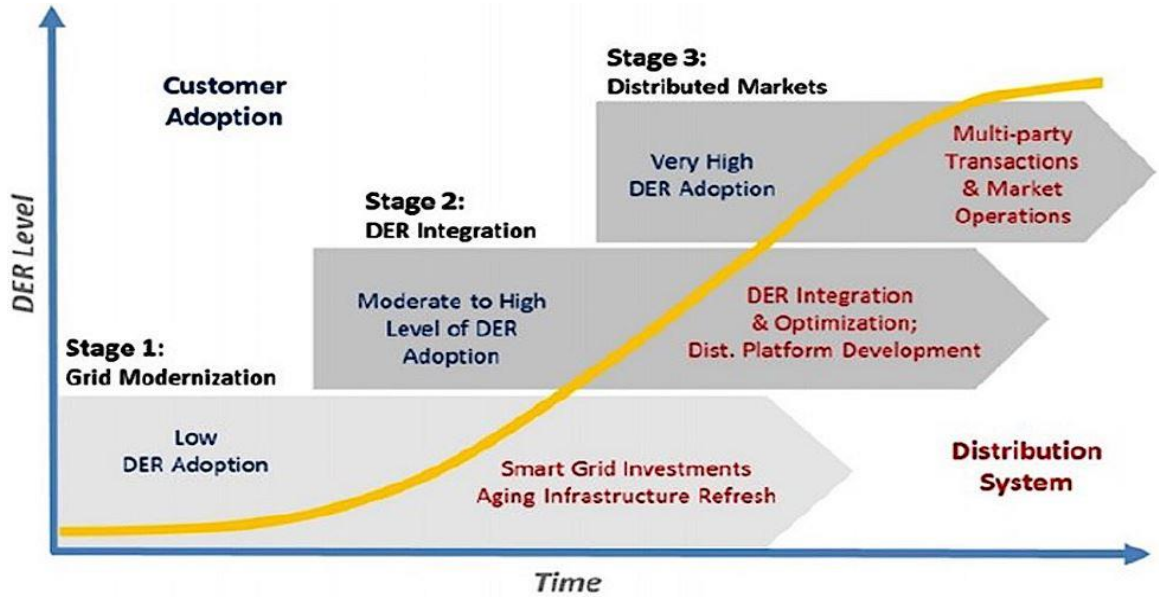
2.3 HERRAMIENTAS DE GESTIÓN DE LAS REDES ELÉCTRICAS MODERNAS

La gestión de una red eléctrica con altos niveles de recursos energéticos distribuidos es uno de los problemas centrales que enfrentan los centros de operaciones para garantizar la confiabilidad y calidad del sistema de potencia. Esto se debe a que la red eléctrica actual no está diseñada para soportar soluciones de redes inteligentes

y el flujo bidireccional que es característica de los DER. Para respaldar los niveles de adopción de DER, los centros de control necesitan buscar infraestructura adicional y soporte tecnológico para ayudar a mantener la confiabilidad y mejorar la capacidad de recuperación en toda la red de distribución [54], [55].

Como se presentó en la Figura 5, la incorporación de DER en la red eléctrica va en aumento y se observa como las nuevas incorporaciones anuales de capacidad de DER superaran la capacidad de las centrales eléctricas centralizadas. Esta característica se debe a que las redes eléctricas están en una evolución continua, la creación de nuevas regulaciones, la necesidad de contar con información operativa en tiempo real y el objetivo de reducir las emisiones de carbono son entre otros aspectos factores claves para la actualización tecnológica de la red.

Figura 7. Evolución de los sistemas eléctricos distribuidos ante la Integración DER.



Fuente: [42]

A medida que aumentan los niveles de DER, el enfoque cambia a la creación de mercado distribuido que involucra transacciones de múltiples partes y la integración con diseños de mercado como se muestra en la Figura 7.

Ante esta situación, los centros de control necesitan un nuevo conjunto de herramientas para administrar y controlar las características técnicas, operativas y económicas de tener una alta penetración de DER interconectados [56]. Para ello las soluciones de software avanzadas son cada vez más necesarias para enfrentar estos desafíos de gestionar, controlar y operar la red eléctrica de forma eficiente, segura y confiable. Es decir, plataformas más robustas que permitan al operador de la capacidad de administrar una red más dominada por recursos distribuidos como la generación distribuida.

Por lo anterior, los sistemas de gestión de distribución avanzada (ADMS), los sistemas de gestión de recursos energéticos distribuidos (DERMS), las plantas de energía virtual (VPP) se presentan como posibles soluciones de gestión, operación y control de una red con inclusión masiva de DER. Estas herramientas son capaces de proporcionar el software necesario para enfrentar estos desafíos y mantener las redes eléctricas en un estado de equilibrio confiable [54], [57].

2.3.1 Sistema de gestión de distribución avanzada (ADMS). ADMS se define como una plataforma de software avanzada que admite de manera única la gama completa de soluciones de gestión y optimización de distribución de energía en tiempo real. El ADMS se compone de funciones clave que mejoran el rendimiento de la red de distribución eléctrica y ofrece una instalación automática de restauración de interrupciones, este sistema permite pronosticar y predecir las necesidades futuras de energía y gestionar las demandas de energía durante las horas pico [58]–[60].

Las funciones ADMS que se están desarrollando para las empresas de servicios eléctricos pueden incluir la ubicación automatizada de fallas, el aislamiento y la restauración del servicio (FLISR); reducción del voltaje de conservación (CVR); gestión de la demanda máxima; y optimización de reactivos volt VAR (VVO) y soporte avanzado para vehículos eléctricos y microrredes [61]–[63].

2.3.2 Sistemas de gestión de recursos energéticos distribuidos (DERMS). De acuerdo con [64], el sistema de solución DERMS tiene dos definiciones las cuales están determinadas por su finalidad como tecnología.

2.3.2.1 DERMS para DER y gestión de la red. [64], [65] definen a DERMS como “un sistema de control que permite la optimización de la red y los DER, incluidas capacidades como la optimización de Volt VAR (VVO), la gestión de la calidad de la energía y la coordinación del despacho de DER para satisfacer las necesidades operativas. DERMS es una solución basada en software que aumenta la visibilidad en tiempo real de un operador sobre el estado de DER, y permite el mayor nivel de control y flexibilidad necesarios para optimizar el DER y la operación de la red de distribución [63], [66].

Los servicios de red controlados por DERMS presenta las siguientes capacidades [66], [67]:

- Gestión de tensión, suministro y programación de energía oportunos, balanceo de fase y minimización de pérdida de energía.
- Comunicación bidireccional con recursos energéticos distribuidos (DER) para proporcionar control, medición, monitoreo, programación e informes.
- Alivio de la capacidad local.

2.3.2.2 DERMS para soluciones integradas para el cliente. Este DERMS proporciona una plataforma de optimización que une diferentes DER ubicados en el cliente en una o varias ubicaciones para proporcionar nuevas soluciones para el cliente, como la optimización de los cargos por demanda, autogeneración extendida, membresías de la comunidad energética u ofertas de tarifa plena [64].

2.3.3 Plantas de energía virtual (VPP). De acuerdo con [55], [65] se define VPP como "un sistema que se basa en software innovador y controles de red inteligente para despachar de forma remota y automática los servicios de DER a un mercado mayorista o de distribución a través de una plataforma digital de agregación y optimización". Por lo tanto, las plataformas digitales VPP brindan a las partes interesadas la oportunidad de agregar DER en una sola planta de energía virtual altamente flexible. Los VPP permiten que la capacidad de DER se aproveche completamente y brindan a los operadores del sistema la capacidad de enviar el VPP como un activo de generación convencional.

Donde los servicios de red para los cuales se utilizan óptimamente los VPP incluyen [67]:

- Respuesta a la demanda.
- Regulación de frecuencia.
- Reservas operacionales.
- Arbitraje energético.
- Gestión de la demanda máxima.

2.4 DESCRIPCIÓN DE HERRAMIENTAS PARA LA GESTIÓN DE LA RED ELÉCTRICA ANTE LA INTEGRACIÓN DE DER

De acuerdo con [58], [64], [66], [68]–[70], la selección de los principales proveedores herramientas (módulos, plataformas y software) que permiten la gestión, operación y control de las redes eléctricas ante inserción masiva de DER, se debe a como las compañías han adoptado diversas estrategias, como asociaciones, acuerdos y colaboraciones, lanzamientos de nuevos productos y expansiones de negocios, para atender la creciente demanda de ADMS, DERMS y/o VPP y fortalecer su posición en el mercado.

Lo anterior ha llevado a empresas líderes en investigación a realizar investigaciones sobre el mercado global de este tipo de tecnologías con el fin de determinar las compañías a la vanguardia en la creación de este tipo de herramientas y determinar por medio de criterios como: la tecnología, los socios, el software, el usuario final, la estrategia de mercado, la región, entre otros; cuales compañías ofrecen las mejores soluciones para optimizar la red eléctrica ante la inclusión de DER.

Para seleccionar y describir las compañías a la vanguardia en la creación de este tipo de tecnologías, se establecieron los siguientes criterios:

1. Según la literatura, que actualmente estas tecnologías estén enfocadas en la gestión de las redes eléctricas.

De acuerdo con la literatura revisada se pudo apreciar que, en la actualidad las empresas prestadoras de servicios han mejorado o introducido nuevas tecnologías con el fin de dar un mayor nivel de automatismo e inteligencia a la red. Dentro de este panorama las herramientas computacionales como ADMS, DERMS y VPP han surgido como soluciones para gestionar, operar y controlar la red considerando la inclusión masiva de DER.

2. Tener un alto número de investigaciones realizados por las empresas en investigación consultadas.

Como se mencionó anteriormente, diversas empresas han realizado investigaciones sobre el mercado global de este tipo de tecnologías, para ello han definido una serie de criterios y metodologías que les han permitido evaluar el comportamiento de estas herramientas y sus respectivos proveedores.

Un ejemplo de ello es [64], donde se ha realizado la clasificación de varios proveedores de DERMS basados en estrategia y ejecución. Para efectuar dicho estudio se definieron los siguientes criterios:

- Visión.
- Estrategia de salida al mercado.
- Socios.
- Estrategia de integración de productos.
- Tecnología.
- Alcance geográfico.
- Ventas, Marketing y Distribución.
- Rendimiento del producto (software, usuario final y región).
- Calidad y confiabilidad del producto.
- Portafolio de productos y ecosistemas.
- Precios.
- Poder de permanencia.

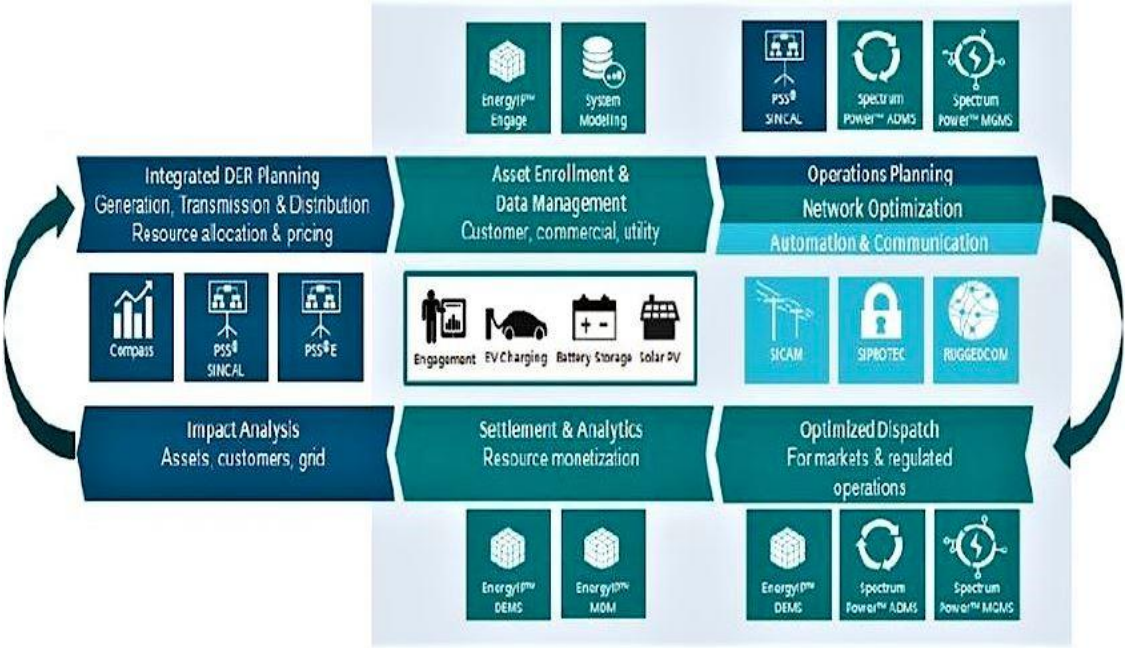
Para más detalle relacionado a la definición de cada criterio seleccionado por [64], ir al ANEXO 1.

Considerando lo anterior, se decidió basar las selección y descripción de estas tecnologías en las investigaciones [58], [64], [66], [68]–[70], consultadas para este trabajo de grado. A continuación, se presenta la descripción de las compañías y tecnologías seleccionadas.

2.4.1 Compañía 1. Ofrece una amplia gama de servicios personalizados, incluyendo equipos y software garantizando la confiabilidad, eficiencia, y valor agregado en la operación de cualquier sistema de transmisión y de la red. El ADMS Spectrum Power monitorea, opera, analiza, optimiza, rastrea y restaura el funcionamiento de la red de distribución para proporcionar una base sólida para la gestión de la red inteligente [71].

Además, ofrece un sistema de gestión de recursos energéticos distribuidos EnergyIP DEMS. Este sistema permite gestionar la demanda y el suministro de recursos energéticos distribuidos de cualquier tamaño en un VPP [64], [72]. A su vez, ofrece DERMS para administrar los DER, esta solución proporciona funciones de optimización como previsión, programación, optimización en tiempo real, conexión de procesos, entorno de modelado y registro completo de recursos operativos para cada DER disponible [64], [73].

Figura 8. Solución DERMS Compañía 1.



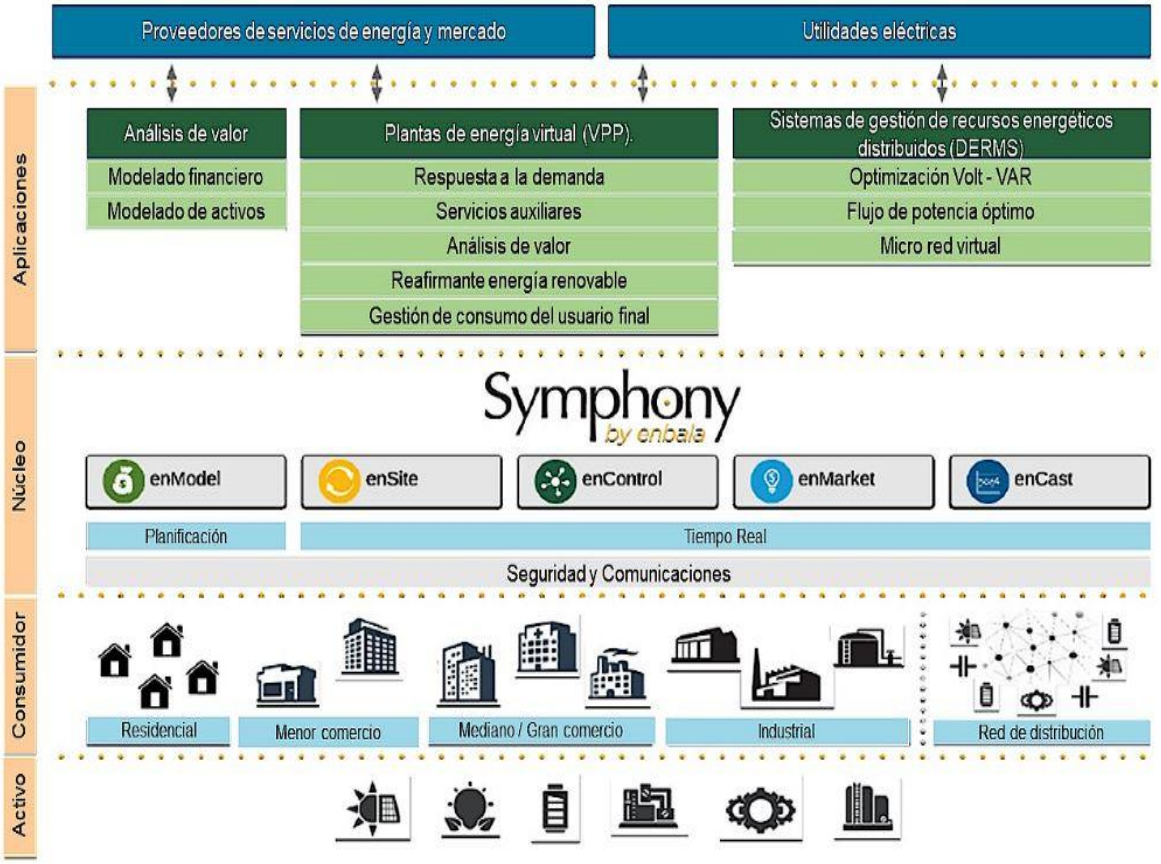
Fuente: Adaptado de [73]

2.4.2 Compañía 2. Proporciona una plataforma de balance de energía en tiempo real para empresas de servicios públicos, operadores de redes y proveedores de servicios de energía. La plataformas proporciona la velocidad, precisión y escalabilidad necesarias para garantizar que la energía se esté moviendo al lugar correcto en el momento preciso [64], [74].

Es un proveedor de software DERMS y VPP. La solución DERMS lleva la gestión de DER al lado de la distribución de la red. Debido a que el sistema sabe exactamente dónde se ubica cada activo, puede apuntar con precisión qué activos

controlar para mitigar los desafíos causados por demasiadas fuentes renovables en línea. Por otra parte, los VPP se enfocan en lograr la mejor ganancia posible para los propietarios de activos, al tiempo que mantiene el equilibrio preciso entre la oferta y la demanda de la red, y al menor impacto y costo ambiental posible [74], [75].

Figura 9. Arquitectura Compañía 2.



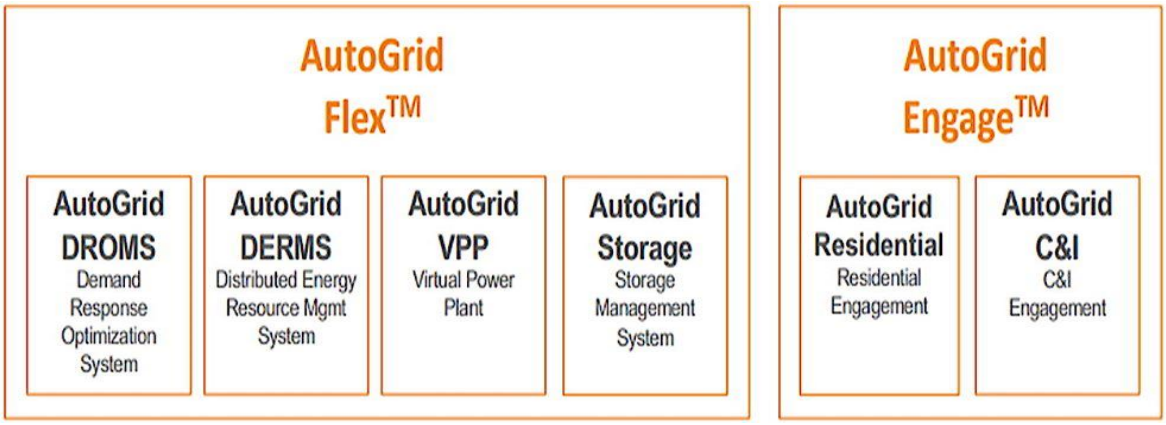
Fuente: Adaptado de [75]

2.4.3 Compañía 3. Crea aplicaciones de software basadas en la nube para la gestión y control de recursos energéticos distribuidos y del lado de la demanda, incluidos programas de RD y precios. Su conjunto de aplicaciones incluye el sistema de gestión de optimización de respuesta de demanda, DERMS y VPP que permiten a los servicios públicos, los minoristas de electricidad, los desarrolladores de proyectos de energía renovable y los proveedores de servicios de energía ofrezcan energía barata, limpia y confiable mediante la gestión de DER en red en tiempo real y en escala [64], [76], [77].

El DERMS conecta y administra todo tipo de DER. Además, puede proporcionar monitoreo granular para DER, optimizar DER para salida y almacenamiento

dirigibles, y optimizar el control del inversor para el despacho quirúrgico. Su aplicación VPP proporciona una capa de interfaz de mercado y agregación, optimizando económicamente el despacho de DER de acuerdo con los parámetros operativos ascendentes y descendentes para mejorar la confiabilidad de la red, garantizar la calidad de la energía y habilitar los servicios auxiliares [64], [76], [77].

Figura 10. Plataforma de la compañía 3.



Fuente: [77]

2.4.4 Compañía 4. La plataforma GridOs utiliza arquitectura de microservicios y estándares abiertos para permitir a los clientes incorporar un número creciente de activos en la infraestructura de red para prepararse para la carga optimizada hoy mientras se prepara para la flexibilidad y modularidad de la red en el futuro. Permite utilidades con visibilidad de red completa, VVO, capacidad de alojamiento dinámico, integración de microred, valoración de DER y análisis de soluciones sin cables [64]. La plataforma implementa un número significativo de servicios con aplicaciones que incluyen planificación de distribución integrada (IDP), sistemas de administración de recursos de energía distribuida y microredes (DERMS), motor de optimización (OE) y energía transactiva (TE) [78].

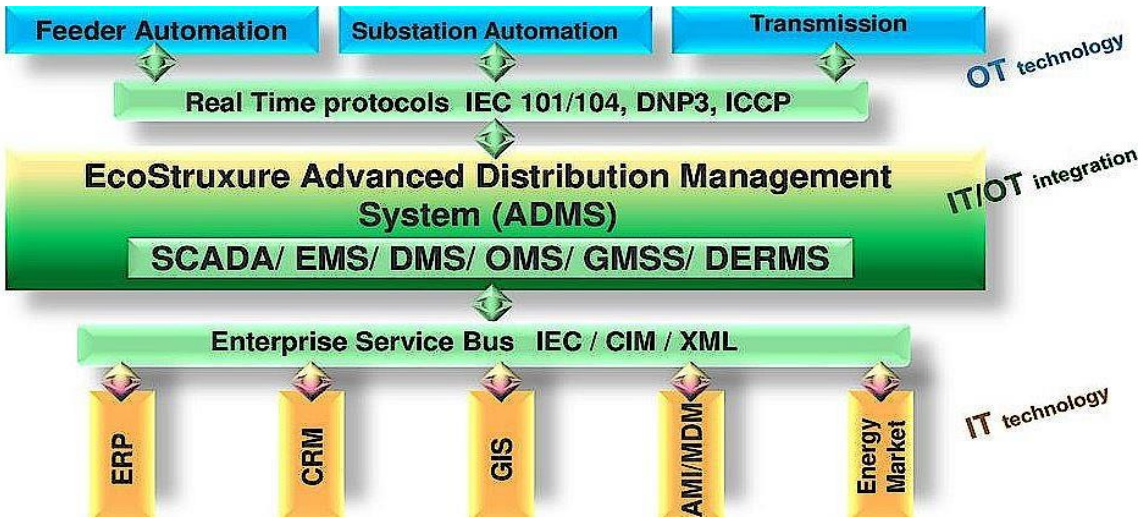
El DERMS proporciona control en tiempo real y optimización de DER con respecto a la distribución y las necesidades de energía a granel. Además, puede implementarse localmente en subestaciones para controlar y optimizar secciones específicas de la red de distribución e insular esas secciones si es necesario, actuando como un centro de control local [78].

2.4.5 Compañía 5. La solución EcoStruxure está diseñada para permitir que los clientes de servicios públicos evolucionen a lo largo del tiempo; bajo su arquitectura incluye la integración de DER, la red inteligente, el compromiso del cliente y las comunidades. Ofrece capacidades de modelado, pero las funciones de monitoreo y control, optimización de la red y optimización económica pueden proporcionar un

valor agregado para satisfacer las necesidades cambiantes de los servicios públicos [64].

Proporciona ADMS como la solución de administración de red más completa, que incluye herramientas de monitoreo, análisis, control, optimización, planificación y capacitación que funcionan en una representación común de toda la red de distribución eléctrica [79]. Por otro lado, la solución DERMS puede servir como una solución independiente o estar integrada con los ADMS existentes para permitir la visualización completa de DER en la red de distribución en vistas geográficas, esquemáticas e internas de la subestación [51], [64].

Figura 11. Arquitectura EcoStruxure ADMS.



Fuente: [79]

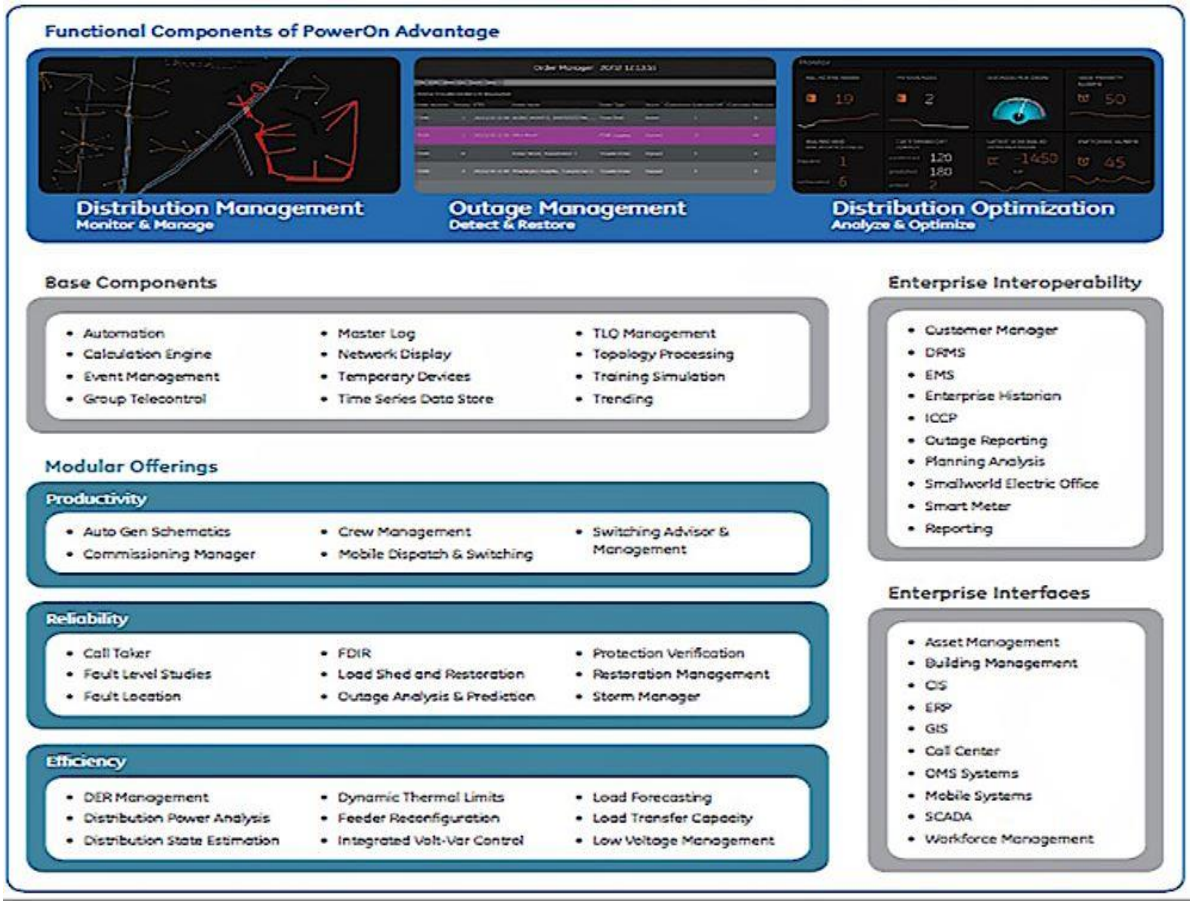
2.4.6 Compañía 6. Tiene una cartera completa de electrónica de potencia, equipos de alto voltaje, soluciones de automatización, soluciones de software, consultoría de proyectos y otros servicios. Ofrece el software PowerOn Advantage ADMS para la gestión y la organización de la red de distribución. Nuestras soluciones brindan confiabilidad, productividad y eficiencia a través de una arquitectura modular con algoritmos adaptativos, análisis predictivo y una brillante experiencia de usuario [80], [81].

A su vez ofrece el sistema DERM para administrar y mitigar los efectos del crecimiento de la capacidad de almacenamiento y generación distribuida y renovable en el sistema eléctrico. Al implementar la solución DERM, la compañía podrá mitigar y gestionar los impactos del giro solar, mantener la estabilidad de la red de distribución, mejorar la distribución de la carga y los pronósticos, así como gestionar el impacto de la generación distribuida en la transmisión [82].

Por otra parte, la solución DERMS ofrece una plataforma que abarca tecnologías como administración avanzada de energía, ADMS, información en tiempo real,

orquestación DER y servicios geoespaciales. Esta compañía apunta a cubrir las necesidades de la cadena de valor de energía a partir del mapeo de activos GIS, servicios de operadores de distribución, servicios de operadores de transmisión y soluciones de operadores y operadores de mercado. Esta solución permite a las empresas de energía integrar las energías renovables a pequeña escala producidas a nivel de distribución, conectar nuevos edificios inteligentes a la red, administrar sistemas de almacenamiento de energía para ajustar las ofertas según la demanda, permitir que los VE se carguen de manera optimizada y para administrar y aplanar el consumo del usuario final a través de su función DR [64].

Figura 12. Componentes PowerOn Advantage ADMS.



Fuente: [81]

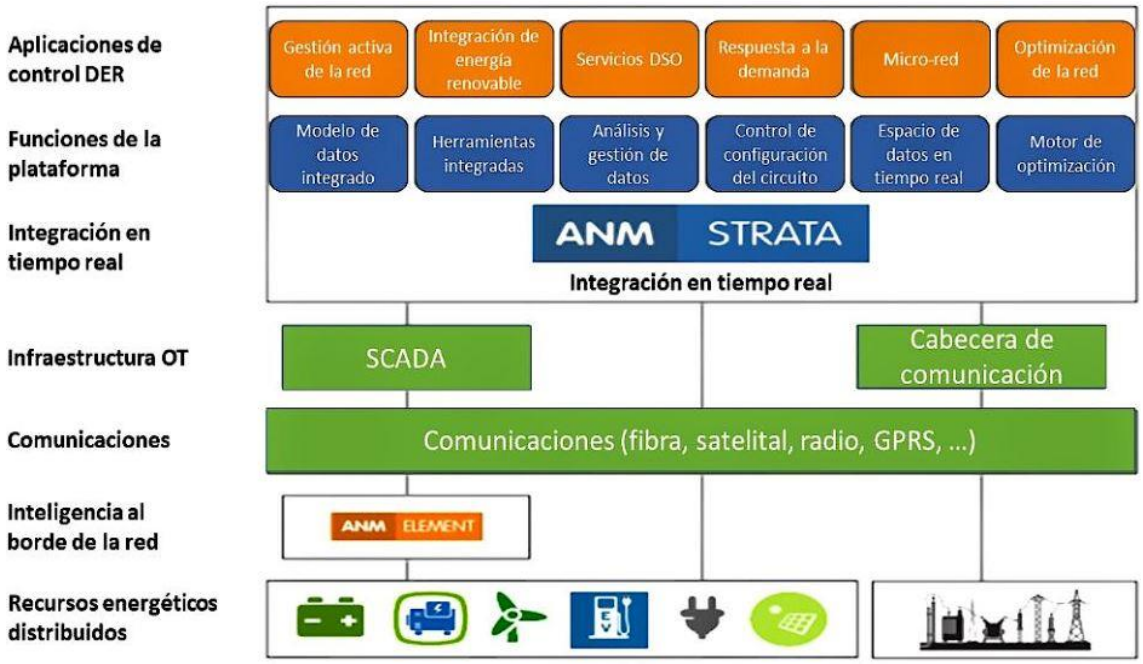
2.4.7 Compañía 7. Es una empresa de tecnología innovadora que se especializa en software de control para la gestión de energía de instalaciones, microrredes y gestión de DER a la red. La solución Wave sirve como plataforma DERMS para servicios públicos con una alta penetración de DER. Así mismo permite nuevos modelos de negocios para servicios de energía basados en DER, da la capacidad de aprovechar los DER incluyendo la generación convencional y renovable, la

eficiencia de almacenamiento, y respuesta de la demanda sin comprometer la fiabilidad y operaciones de la red [64], [83].

Wave se basa en una estrategia de control distribuido que facilita la integración de cualquier tipo de recurso energético distribuido (generación, almacenamiento o carga), visualiza y monitorea los activos y los despacha de manera óptima para diferentes aplicaciones [83].

2.4.8 Compañía 8. Esta compañía se especializa en tecnología de control distribuido para administrar recursos de energía renovable y distribuida. Su oferta clave, Active Network Management (ANM), es un DERMS que permite la integración y la gestión activa de DER [64]. Mediante el uso de la tecnología de gestión de red activa (ANM) para la ejecución continua de decisiones en un segundo, combina diferentes métodos de control en una plataforma integral. Esta combinación de métodos de control significa que ANM Strata puede monitorear y controlar cualquier tamaño y tipo de DER, en cualquier ubicación, conectado con cualquier comunicación, interconectado a redes y mercados, y administrarlos en cualquier horizonte temporal y ANM Element permitir un monitoreo y control más inteligente en el borde de la red [84].

Figura 13. Arquitectura ANM.



Fuente: Adaptado de [85]

2.4.9 Compañía 9. IntelliSOURCE Enterprise ofrece un conjunto de módulos totalmente integrados que permiten a las empresas de servicios públicos gestionar la respuesta a la demanda, la eficiencia energética y los programas de compromiso

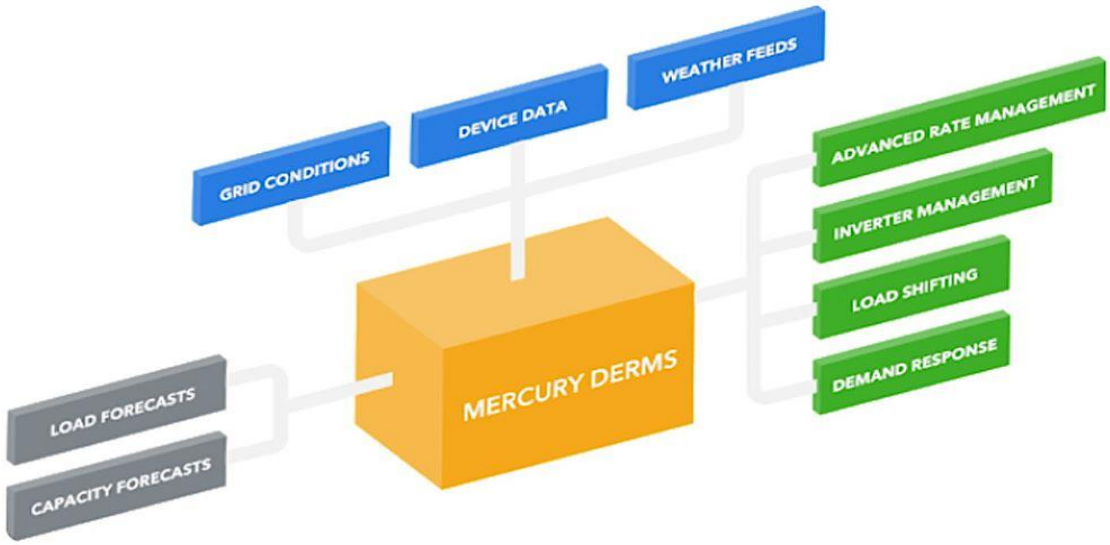
con el cliente, coordinar a su propio dispositivo y DER, y aprovechar las oportunidades de análisis de datos de energía del consumidor [86].

La plataforma DERMS abarca todo el ciclo de vida del programa, comenzando con el diseño del programa y avanzando hacia el pronóstico y la simulación. A partir de ahí, las integraciones de los clientes comienzan en la plataforma de software distribuido, completa el monitoreo y la verificación, proporcionando evaluaciones de impacto a sus clientes de servicios públicos. Esto ayudará a las empresas de servicios públicos a mantener la calidad de la energía, garantizar la confiabilidad de la red, obtener beneficios (incluidas las inversiones diferidas en infraestructura de distribución) y ofrecer una experiencia perfecta para el cliente [64], [87].

2.4.10 Compañía 10. El DERMS Mercury permite a las empresas de servicios públicos desplegar las capacidades únicas de los DER para proporcionar servicios de red de misión crítica. Mercury brinda a los operadores de servicios públicos las herramientas necesarias para administrar el ciclo de vida completo de un programa DER, desde el registro de dispositivos hasta las estrategias avanzadas de control y despacho, el análisis y la liquidación de datos hasta la gestión de programas, todo ello basado en una plataforma segura, escalable y de nivel empresarial [88].

Mercury considera la escala, la ubicación, el perfil de consumo y las características de desempeño de cada activo bajo administración. Esto permite estimar el nivel de servicio que cada activo puede proporcionar a la red y le permite a la empresa de servicios establecer puntos de activación en los cuales algunos activos de la red se enviarán antes que otros. Esta compañía usa estas medidas para ayudar a dar forma a la carga y definir los VPP [64], [88].

Figura 14. Mercury DERMS.

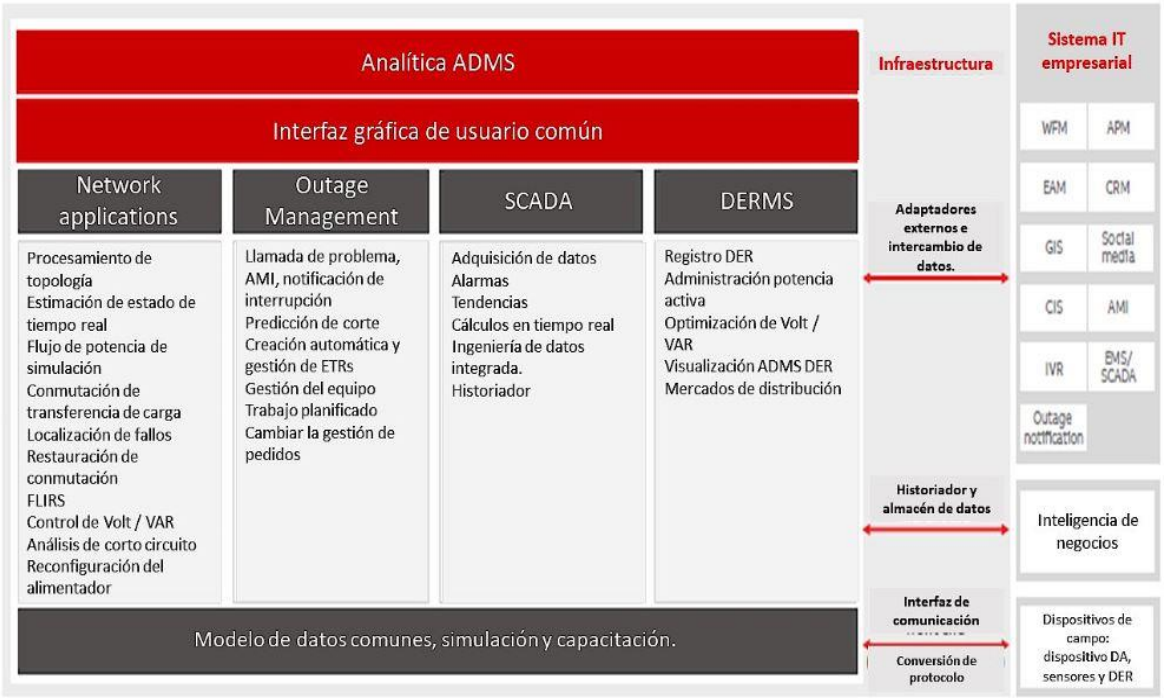


Fuente: Adaptado de [88]

2.4.11 Compañía 11. Ofrece ADMS como una solución integrada para la administración de la distribución. El ADMS proporciona monitoreo y control en tiempo real, análisis de red, optimización de red y capacidades de administración de interrupciones en una plataforma de software integrada. A su vez ofrece DERMS como un módulo de la plataforma Network Manager ADMS, y permite el funcionamiento de la red en presencia de una alta penetración de DER para garantizar la estabilidad y el rendimiento de la red. Es una solución digital que monitorea las condiciones de la red en tiempo real y aprovecha algoritmos avanzados para optimizar y programar una combinación de activos de DER, tanto de la empresa de servicios públicos como de la red [89].

Por otra parte, la optimización de energía para plantas de energía virtuales permite a los VPP proporcionar control central y optimización, vincular las fuentes de energía con los mercados, realizar pronósticos diarios e intradía, y actualizar los cronogramas de compromiso para agrupar a los participantes. Al optimizar los objetivos de potencia activa y reactiva, los DERMS pueden controlar y despachar los DER en tiempo real, lo que permite a los operadores del sistema aliviar las restricciones de la red de manera rápida y eficiente. Los DERMS también ayudan a las empresas de servicios públicos a integrar los DER de manera más eficiente a través de un proceso de registro de DER que captura las características eléctricas y los puntos de restricción de un DER para la optimización y el control en tiempo real [89].

Figura 15. ADMS compañía 11.

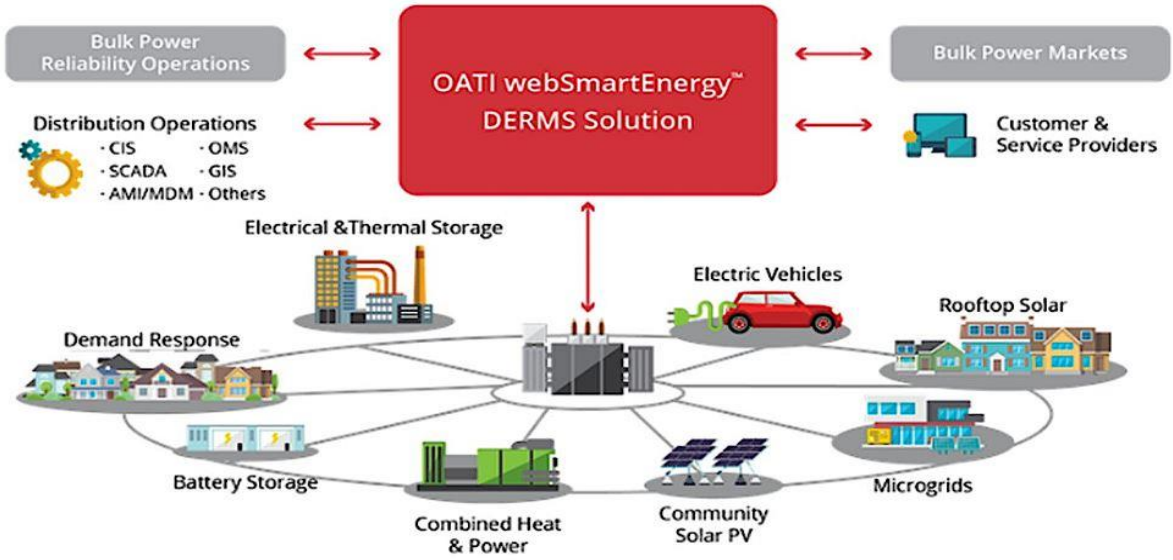


Fuente: Adaptado de [89]

2.4.12 Compañía 12. El software del sistema de gestión de respuesta a la demanda permite a las empresas de servicios públicos administrar diversos tipos de programas de recuperación ante desastres y recursos de la demanda, desde programas de recuperación de errores basados en notificaciones, dinámicos y basados en tarifas, hasta diversos métodos de control de carga directa. También pronostica la capacidad de DR disponible según el clima, el programa de DR y los parámetros de inscripción, y puede programar y enviar DR y DER e interactuar con dispositivos de campo y equipos de control de carga [76], [90].

EL DERMS tiene la capacidad para agregar activos de DR/DER a las plantas de energía virtual (VPP) que se pueden usar para proporcionar nuevos servicios de energía a granel como la carga/rampa y la respuesta de frecuencia primaria [76], [90].

Figura 16. OATI webSmartEnergy DERMS.

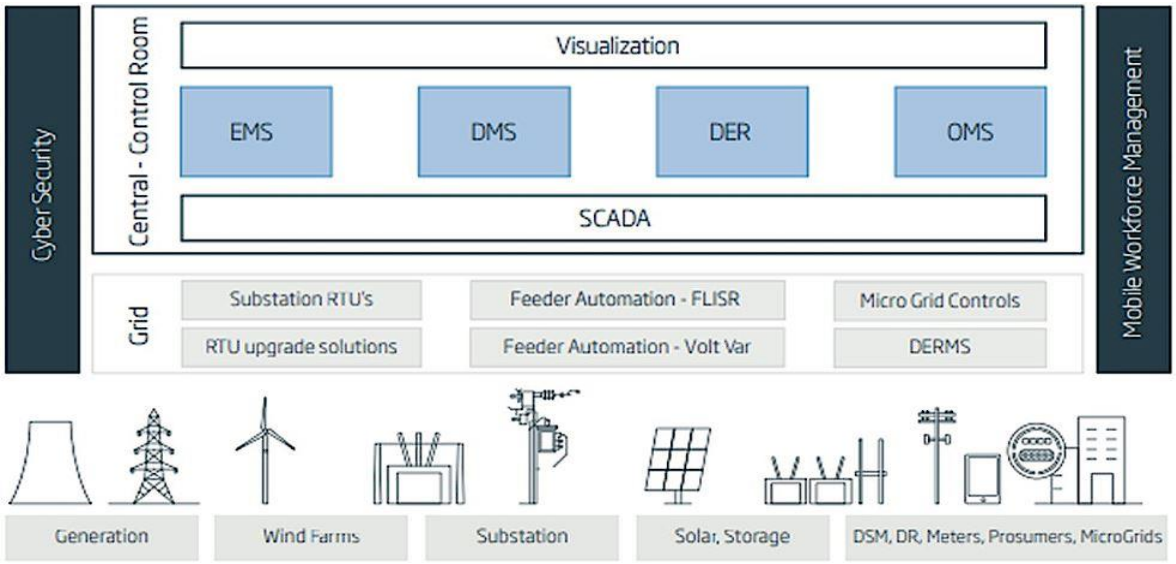


Fuente: [90]

2.4.13 Compañía 13. Ofrece un conjunto muy robusto de aplicaciones para la administración y optimización de recursos energéticos distribuidos en la red de distribución. Las aplicaciones de energías renovables de PRISM están diseñadas para analizar, controlar y administrar las operaciones de energía renovable dentro de los alimentadores de distribución. PRISM DMS/ADMS ofrece un conjunto completo de aplicaciones para el funcionamiento y análisis de la red, lo que permite a las empresas de servicios públicos entregar efectivamente a sus clientes un poder confiable y de alta calidad; combina la adquisición de datos en tiempo real, la automatización de la distribución, el análisis del sistema y la gestión de interrupciones en un verdadero sistema de operaciones de redes inteligentes [91], [92].

El módulo DERMS de PRISM DMS/ADMS admite aplicaciones con funciones de supervisión del operador, pronóstico de inyección, visualización y operaciones móviles, como un conjunto de aplicaciones distribuidas creadas para maximizar la capacidad y la eficacia de DER. La compañía implementa una solución de múltiples etapas que combina el monitoreo y el control de los activos de DER con la optimización del sistema para enfrentar efectivamente los desafíos presentados por la creciente penetración de DER, incluido el aumento de la capacidad de alojamiento, mientras que mitiga el efecto adverso en la red [91], [93].

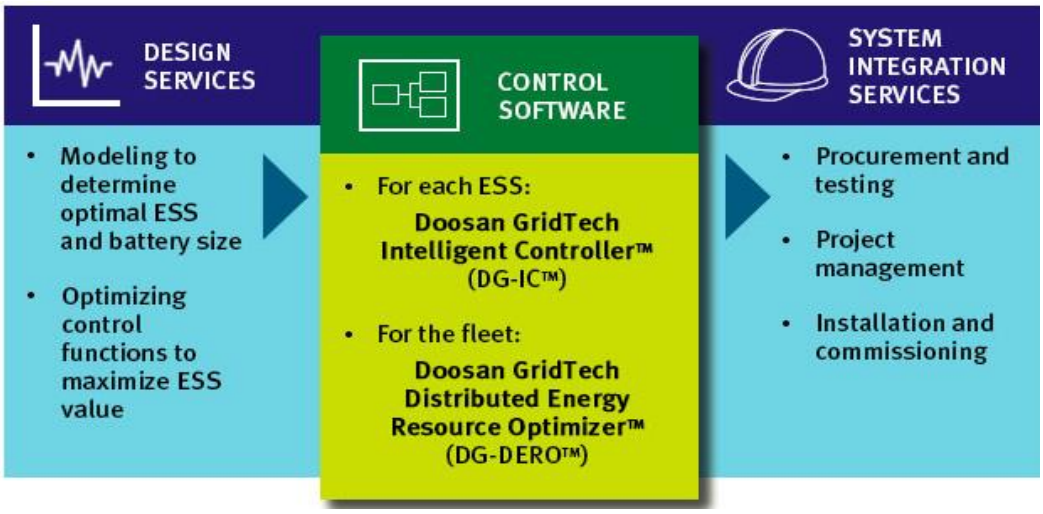
Figura 17. Plataforma de soluciones PRIMS.



Fuente: [93]

2.4.14 Compañía 14. Las capacidades de gestión de DER de la compañía se encuentran dentro de sus dos soluciones clave: Intelligent Controller (DG-IC) y DER Optimizer (DG-DERO), su DERMS. IC es un módulo de control y comunicaciones para el almacenamiento de energía y otros DER, que permite el control local, remoto y automatizado de los activos. La plataforma DERO es un DERMS basado en servidor que agrega y optimiza el valor económico para almacenamiento de energía (ESS) junto con otras formas de DER y trabaja con IC para facilitar el control y el despacho de DER [64].

Figura 18. Plataforma DERMS.



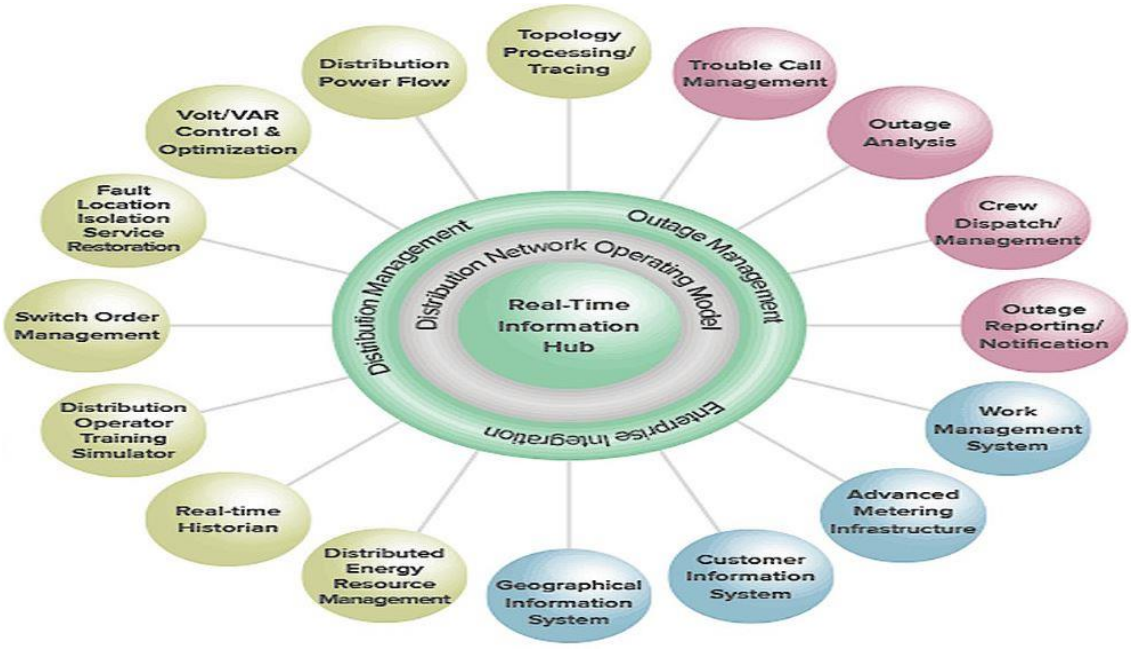
Fuente: [94]

2.4.15 Compañía 15. Ofrece Spectra como una solución integrada en tiempo real para la gestión avanzada de distribución. Spectra permite a las empresas de servicios públicos mejorar la confiabilidad, eficiencia y seguridad del sistema, así como proporcionar información oportuna y confiable a los interesados internos y externos. Spectra se basa en una plataforma segura y de alto rendimiento en tiempo real para satisfacer las necesidades cambiantes de las redes eléctricas como el modelado, supervisión, gestión y control de generación renovable y distribuida, almacenamiento de energía, microrredes y otros tipos de DER que se incorporan al sistema [95].

Spectra ofrece Integra DERMS como una plataforma ideal para la monitorización en tiempo real, gestión y despacho óptimo de los recursos energéticos distribuidos incluyendo la generación renovable, almacenamiento de energía, vehículos eléctricos, generadores de emergencia, y la respuesta de la demanda. Integra DERMS permite a las empresas de servicios públicos administrar y operar la creciente cantidad y tipos de recursos distribuidos de energía y respuesta a la demanda. Además, aprovecha los diversos recursos de DER para mejorar el rendimiento a nivel local y / o de sistema [95].

A través de la integración de DMS, los últimos pronósticos de DER y las condiciones de operación se pueden usar en funciones como el control Volt Var; localización de fallas, aislamiento y restauración del servicio; y reconfiguración del alimentador [95].

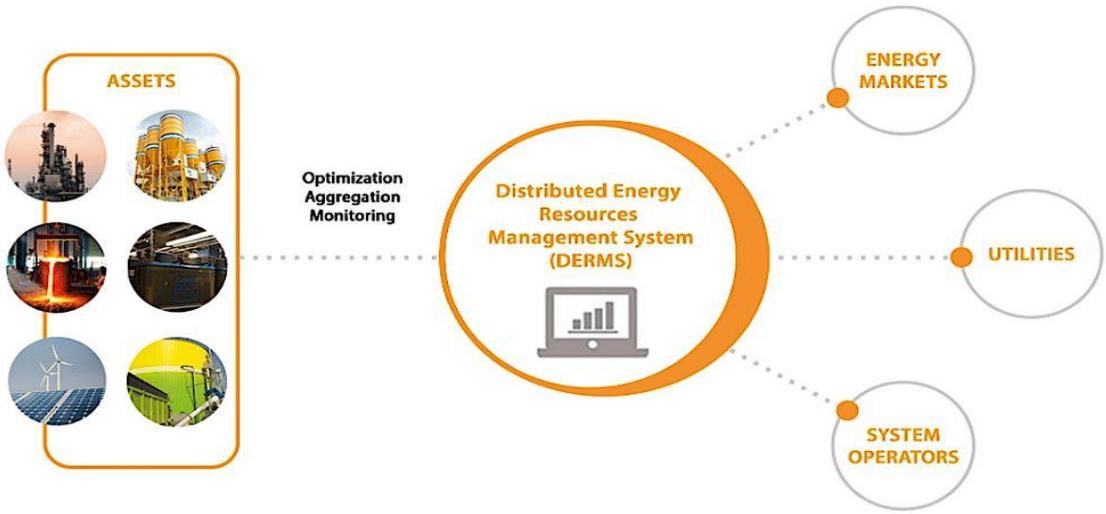
Figura 19. Spectra ADMS.



Fuente: [95]

2.4.16 Compañía 16. Es un líder mundial en gestión de energía y respuesta a la demanda para usuarios finales de electricidad industriales y comerciales. El DERMS permiten la regulación de frecuencia en tiempo real para la planificación de la gestión de la energía a largo plazo, y para una agregación óptima de flexibilidades. Nuestra solución de automatización (DR box) es el enlace entre las instalaciones del usuario final y el centro de operaciones de la red de Energy Pool. [76], [96].

Figura 20. Arquitectura DERMS.

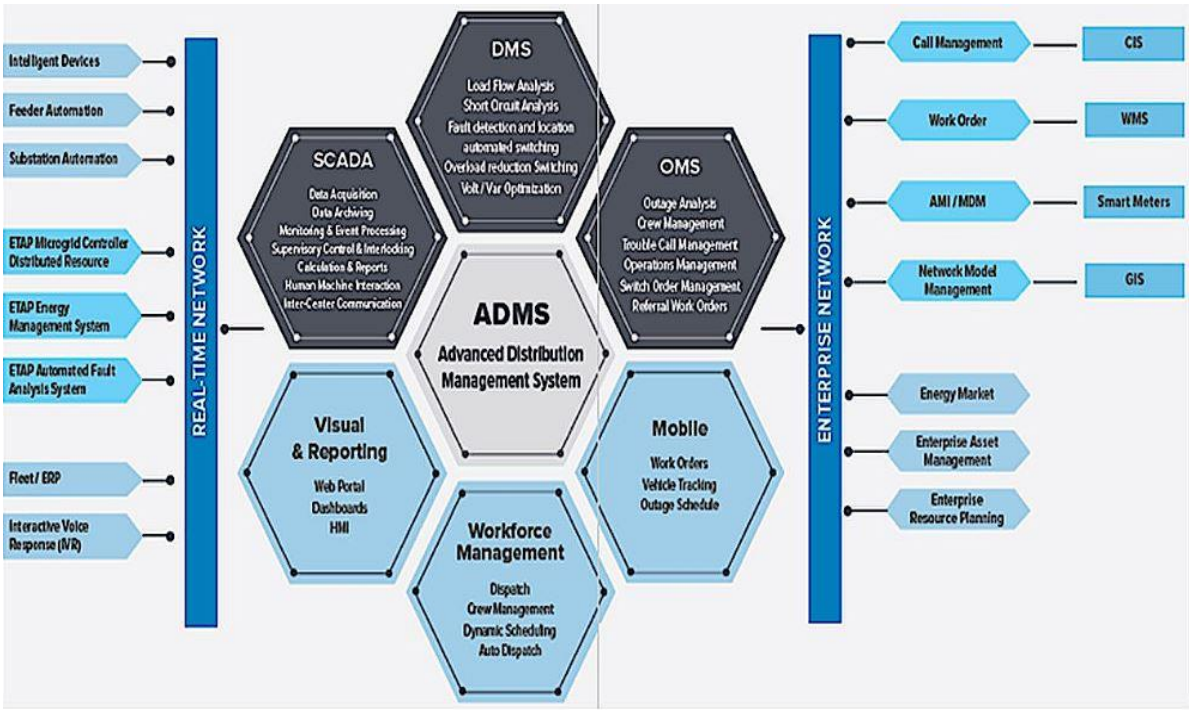


Fuente: [96]

2.4.17 Compañía 17. Es una herramienta de software especializada en el análisis, la simulación, seguimiento, control, optimización y automatización de los sistemas de energía eléctrica. El software ofrece un conjunto de soluciones empresariales de sistemas de energía integrados para la monitorización SCADA, simulación, optimización, gestión y control de los sistemas de potencia en tiempo real. Esta herramienta ayuda a los operarios realizando decisiones lógicas e informadas para reducir los costes de operación y mejorar la confianza en el sistema [97], [98].

La compañía ofrece ADMS como una solución combinada de planificación y operación para administrar, controlar, visualizar y optimizar la red de distribución de energía eléctrica la cual permite la estimación del estado de distribución, la optimización de voltios VAR (VVO), la reducción de voltaje conservador (CVR), la ubicación de fallas, el aislamiento y la restauración del servicio (FLISR), la predicción de interrupciones, el pronóstico de carga entre otras aplicaciones [99].

Figura 21. Arquitectura ADMS.



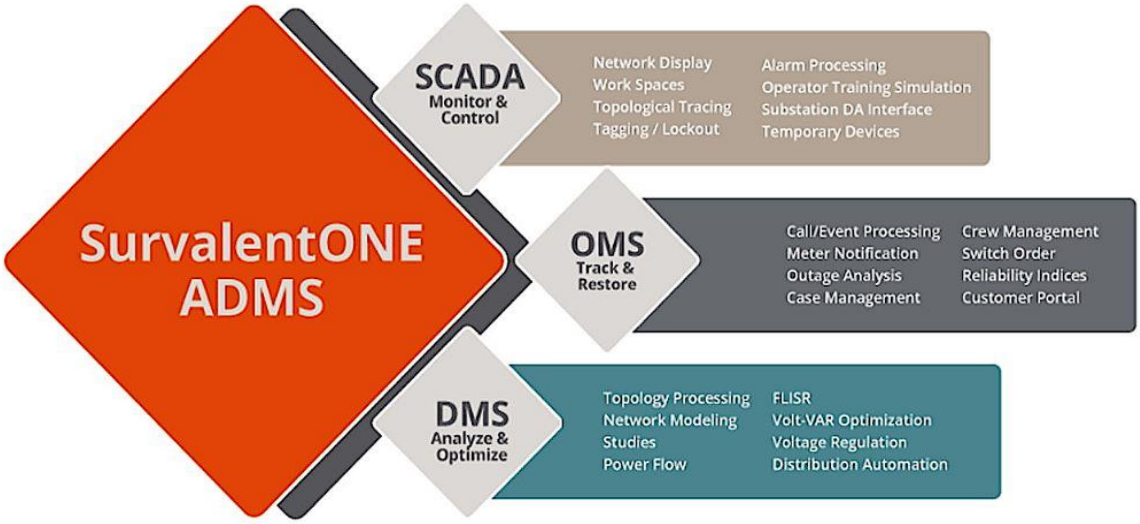
Fuente: [99]

2.4.18 Compañía 18. La plataforma ADMS es una solución totalmente integrada de control de supervisión y adquisición de datos (SCADA), sistema de gestión de interrupciones (OMS) y sistema de gestión de distribución (DMS) que se ejecuta en una única interfaz gráfica fácil de usar. El ADMS proporciona control de supervisión en tiempo real y adquisición de datos para servicios públicos, además permite realizar un seguimiento eficiente de las interrupciones, reducir el tiempo de inactividad y guiar de manera proactiva y segura a los equipos de campo durante

las actividades de restauración permitiendo mejorar la confiabilidad y la calidad del servicio [100].

El ADMS le permite operar, monitorear, analizar, restaurar y optimizar de manera efectiva las operaciones críticas de la red. Además, proporciona una interfaz de usuario común para todos los roles para facilitar las operaciones, un modelo de red compartido y una base de datos en tiempo real para un mayor rendimiento, y una única plataforma de hardware para simplificar el mantenimiento y la seguridad de TI y OT [100].

Figura 22. Plataforma ADMS.



Fuente: [100]

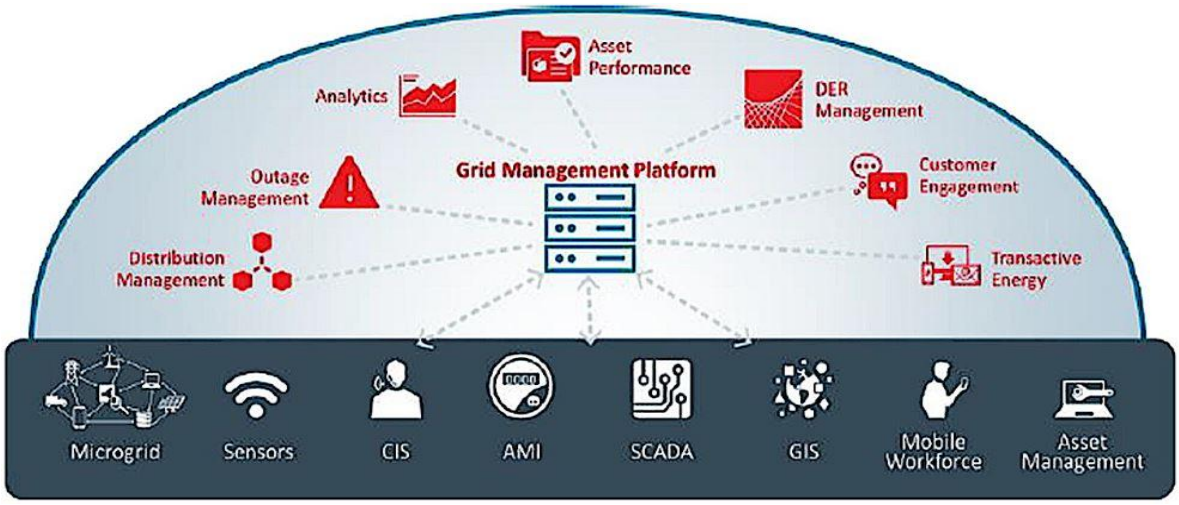
2.4.19 Compañía 19. Ofrece el sistema de gestión DER (mDERMS) para un flujo óptimo de energía hacia y desde la red. Nuestra arquitectura única de software de sistema de sistemas modulares ofrece una flexibilidad y escalabilidad sin igual, lo que permite la integración de mDERMS con otros sistemas y aplicaciones dentro de las empresas de servicio, incluida la mejora de SCADA, la gestión del estado de los activos, la adquisición de energía, la atención al cliente, la TI empresarial y más [101].

mDERMS permite convertir grandes volúmenes de datos generados por la red inteligente en información significativa para comando y control, mientras que el monitoreo en tiempo real de los DER proporciona una visibilidad completa de las operaciones de la red, además permite que las empresas de servicios públicos ofrezcan modelos de negocio innovadores que beneficien a los consumidores, como el comercio de energía, al tiempo que apoyan las iniciativas de energía renovable y respuesta a la demanda [102].

2.4.20 Compañía 20. Ofrece Utilities Network Management System (NMS) como una plataforma capaz de unificar las capacidades de las operaciones de red para acortar la duración de la interrupción, optimizar la operación de la red de distribución, administrar los recursos de energía distribuidos (DER). Con NMS los operadores de red modelan toda la red con recursos distribuidos. Pueden registrar los activos de DER y hacer planes de red precisos con numerosos insumos de sistemas como el clima y la infraestructura de medición avanzada [103].

El ADMS organiza y analiza los enormes volúmenes de nuevos datos casi en tiempo real, y luego utiliza esos datos para disminuir el número y la duración de las interrupciones mediante el uso de secciones de circuito sin fallas de recuperación automática para restaurar a los clientes automáticamente, integración de grandes cantidades de generación renovable intermitente en la red, apoyar a la recarga del vehículo eléctrico, gestionar microrredes y centrales eléctricas virtuales y apoyando programas de respuesta a la demanda. Con DERM el NMS ofrece a las empresas de servicios el riesgo y costo más bajo y el tiempo más rápido para su valor [104], [105].

Figura 23. Utilities Network Management System (NMS).



Fuente: [105]

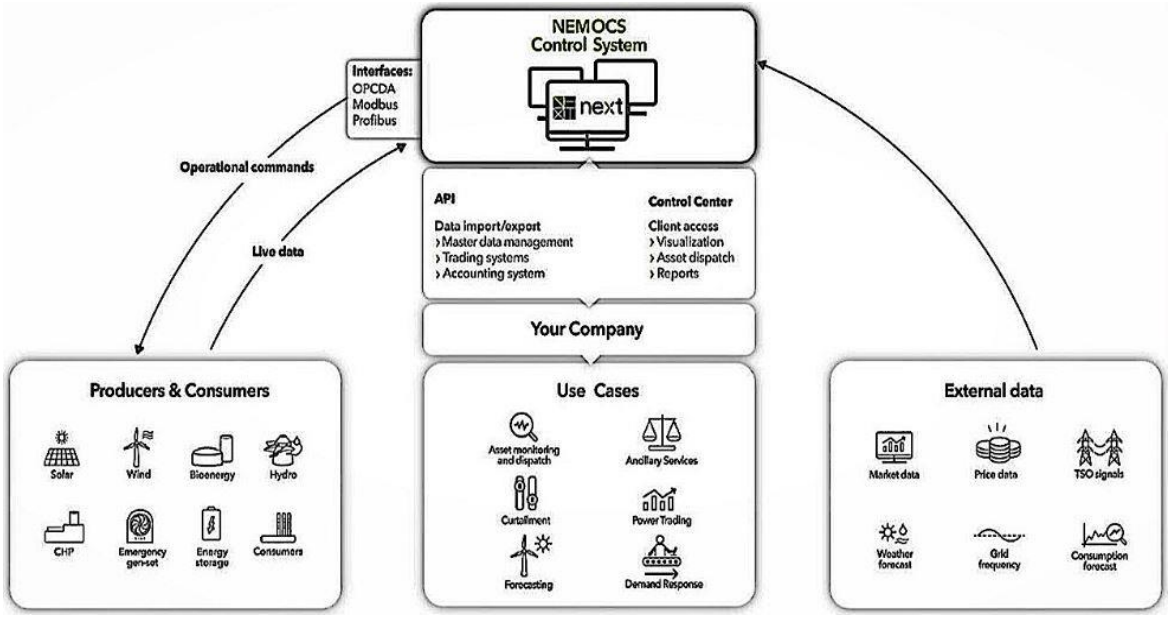
2.4.21 Compañía 21. La plataforma permite a los operadores de servicios públicos y de transmisión y distribución apilar servicios, proporcionando múltiples flujos de valor para los consumidores, los operadores de redes de transmisión y distribución y los participantes del mercado eléctrico mayorista. Su tecnología permite a las empresas de servicios públicos utilizar recursos ubicados en el cliente para abordar los problemas de demanda máxima, congestión y calidad de la energía, a fin de ayudar a mantener una red confiable, eficiente y resistente [106].

Además brinda visibilidad y control total de la energía de la red, vinculando los recursos energéticos distribuidos, dando la capacidad de agregar miles de

dispositivos variables en una planta de energía virtual (VPP) que puede programarse en los mercados de servicios auxiliares y de energía en tiempo real [107].

2.4.22 Compañía 22. NEMOCS es una solución de software que permite conectar, monitorear y controlar productores, consumidores y sistemas de almacenamiento descentralizados de energía. Por lo tanto, ofrece una amplia gama de campos comerciales para operadores de planta, proveedores de electricidad, operadores de redes y comerciantes de energía. NEMOCS ofrece toda la funcionalidad que necesita para concretar su caso de negocios. una planta de energía virtual o convertirse en una empresa virtual capaz de ofrecer agregación, vigilancia, operación y control de activos optimizada, comunicación y flujo de datos [108].

Figura 24. Sistema de control NEMOCS.



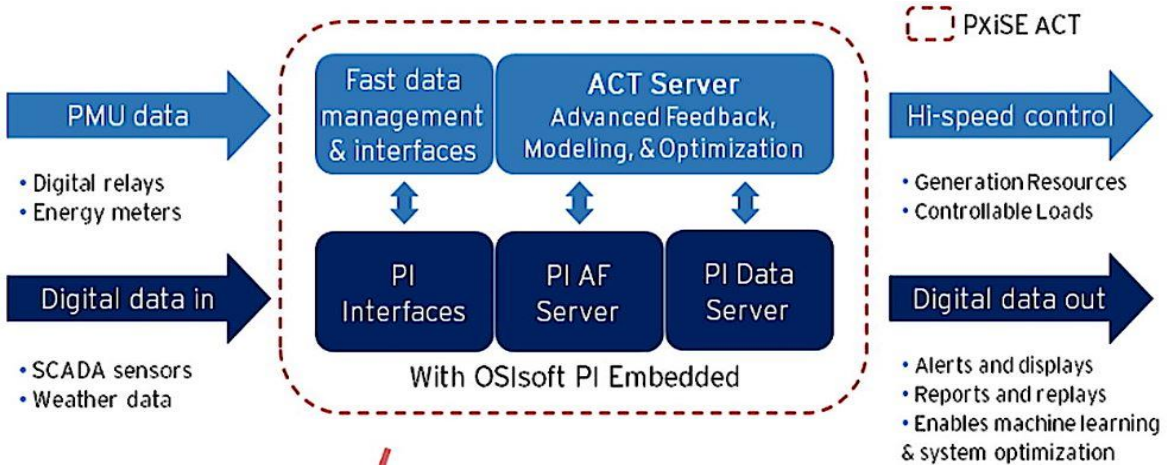
Fuente: [108]

2.4.23 Compañía 23. Aurora es una plataforma en la que los activos se pueden conectar de manera segura a una red SCADA centralizada, monitorearse fácilmente y mantenerse frente a las causas comunes de los activos atados: pérdida de comunicación, falla del sensor y software desactualizado. Aurora es una plataforma de conectividad abierta que es indiferente al proveedor, ofrece comunicaciones de datos seguras y permite que los activos se conecten y funcionen para simplificar el caos detrás del medidor [109].

2.4.24 Compañía 24. Desarrolla, comercializa e implementa soluciones de controles basados en software para la red eléctrica moderna que permiten operaciones más eficientes y confiables con muchos recursos de energía distribuida (DER) [110].

La tecnología de control avanzado (ACT) es una solución de control de red avanzada basada en software que funciona a la velocidad de la red. La compañía utiliza datos e información de alta velocidad sin explotar, además de algoritmos inteligentes para maximizar la eficiencia y la confiabilidad de todos los DER como un solo sistema [111].

Figura 25. Plataforma ACT.



Fuente: [111].

Para finalizar el capítulo 2, en la Tabla 2 se presenta el listado consolidado de las tecnologías que permiten la gestión, operación y control de la red eléctrica ante la incorporación de DER. Además, se presentan los proveedores que están a la vanguardia en la creación de módulos, plataformas y software de dichas tecnologías.

Tabla 2. Listado de herramientas computacionales para la gestión DER.

Compañías	Herramientas	Descripción	Ubicación
ADMS			
Compañía 5	Tecnología 5	Ofrece ADMS como la solución de administración de red	Isla de Francia / Francia
Compañía 6	Tecnología 6	Ofrece soluciones de automatización, soluciones de software, consultoría de proyectos y otros servicios.	Boston / EEUU
Compañía 11	Tecnología 11	Ofrece una plataforma en tiempo real para la operación confiable y segura de redes de energía eléctrica	Zúrich / Suiza
Compañía 13	Tecnología 13	Ofrece una plataforma de aplicaciones de sistemas en tiempo real para la administración y optimización de fuentes de energía renovables en la red de distribución	Peachtree Corners / EEUU

Tabla 2. (Continuación).

Compañías	Herramientas	Descripción	Ubicación
ADMS			
Compañía 15	Tecnología 15	Proporciona una plataforma para la monitorización en tiempo real, gestión y despacho óptimo de los recursos energéticos distribuidos	Minnesota / EEUU
Compañía 17	Tecnología 17	El ADMS es una solución combinada de planificación y operación para administrar, controlar, visualizar y optimizar la red	California / EEUU
Compañía 18	Tecnología 18	Ofrece ADMS como una solución totalmente integrada de SCADA, DMS y OMS	Brampton / Canadá
Compañía 20	Tecnología 20	Ofrece una plataforma capaz de unificar las capacidades de las operaciones de red con DER	Virginia / EEUU
DERMS			
Compañía 1	Tecnología 1	Ofrece una amplia gama de servicios personalizados, incluyendo equipos y software para la operación de cualquier sistema de transmisión y de la red	Múnich / Alemania
Compañía 2	Tecnología 2	Proporciona una plataforma de balance de energía en tiempo real para empresas de servicios públicos, operadores de redes y proveedores de servicios de energía	British Columbia / EEUU
Compañía 3	Tecnología 3	Ofrece un paquete de gestión de flexibilidad verdaderamente integrado de la industria energética	California / EEUU
Compañía 4	Tecnología 4	La plataforma permite a los clientes incorporar un número creciente de activos en la infraestructura de red	Toronto / Canadá
Compañía 7	Tecnología 7	Ofrece la plataforma DERMS para servicios públicos con una alta penetración de DER.	Fort Collins / EEUU
Compañía 8	Tecnología 8	Proporciona la plataforma de software con un DERMS de casos de usos múltiples altamente flexible y escalable	Glasgow / Escocia
Compañía 9	Tecnología 9	Gestiona la respuesta a la demanda, la eficiencia energética y los programas de compromiso con el cliente, coordinar a su propio dispositivo y DER.	Washington / EEUU
Compañía 10	Tecnología 10	Permite a las empresas de servicios públicos desplegar las capacidades únicas de los DER para proporcionar servicios de red de misión crítica	Nueva York / EEUU
Compañía 12	Tecnología 12	Permite a las empresas de servicios públicos administrar diversos tipos de programas de recuperación ante desastres y recursos de la demanda	Minneapolis / EEUU
Compañía 14	Tecnología 14	Es una plataforma de control que permite el control de la utilidad de las flotas de recursos distribuidos DER	Seúl / Corea del Sur
Compañía 16	Tecnología 16	El DERMS permite la regulación de frecuencia en tiempo real para la planificación de la gestión de la energía y agregación óptima de flexibilidades	Le Bourget-du-Lac / Francia
Compañía 19	Tecnología 19	Ofrece el mejor sistema de gestión DER (DERMS) para un flujo óptimo de energía hacia y desde la red	Petach Tikva / Israel
VPP			
Compañía 21	Tecnología 21	Es una plataforma capaz de abordar los problemas de demanda máxima, congestión y calidad de la energía y vincular DER por medio de una VPP	Colonia / Alemania
Compañía 22	Tecnología 22	Permite la conexión de energías renovables y otros activos descentralizados.	San Francisco / EEUU
Compañía 23	Tecnología 23	Proporcionar conectividad simplificada y ubica a cualquier "cosa" energética, independientemente de la marca, modelo, antigüedad o protocolo.	Indiana / EEUU
Compañía 24	Tecnología 24	Puede lograr los objetivos del sistema eléctrico de la manera más precisa y eficiente posible y mejora la confiabilidad, el control y la elección de la red	Chicago / EEUU

3. EVALUACIÓN DE LAS HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES PARA LA GESTIÓN INTELIGENTE DE LAS REDES ELÉCTRICAS MODERNAS

En el capítulo 2 se seleccionaron y describieron una serie de herramientas teniendo en cuenta [58], [64], [66], [68]–[70]. Estas herramientas computacionales buscan ofrecer al operador de red la capacidad de administrar y controlar las características técnicas, operativas y económicas de tener una alta penetración de DER interconectados, además de garantizar la confiabilidad, seguridad y resiliencia del sistema. Así mismo, ser capaz de interactuar con los elementos del sistema de formar versátil considerando el elevado número de datos presentes en la red ante la inclusión de recursos distribuidos.

En la actualidad las empresas de servicios públicos, operadores de red y agregadores requieren de sistemas versátiles, adaptables e interoperables que tengan la capacidad de gestionar, operar y controlar un sistema cada vez más complejo. Con la incorporación de recursos distribuidos a la red, estas herramientas deben ser capaces de satisfacer las necesidades que conlleva la inclusión de este tipo de tecnologías en el sistema, con el fin de convertir a DER en un recurso con el que se pueda contar, garantizando a las empresas prestadoras de servicios y al consumidor optimizar la eficiencia de la red, satisfacer la demanda cada vez mayor y minimizar los costos de energía.

Es por esta razón que este trabajo de grado pretende analizar la gama de posibilidades presentes tanto para el operador de red como para agregadores terceros que le permitan el análisis, monitoreo, control y optimización de sus activos garantizando beneficios compartidos tanto para la empresa como para el consumidor. Por lo anterior, el presente capitulo se centra en caracterizar las herramientas computacionales seleccionadas, definir sus capacidades, funcionalidades, beneficios y limitaciones con el fin de determinar cuál de ellas es la más adecuada a las necesidades del sistema.

3.1 CONVERGENCIA DE LAS HERRAMIENTAS DE GESTIÓN DER

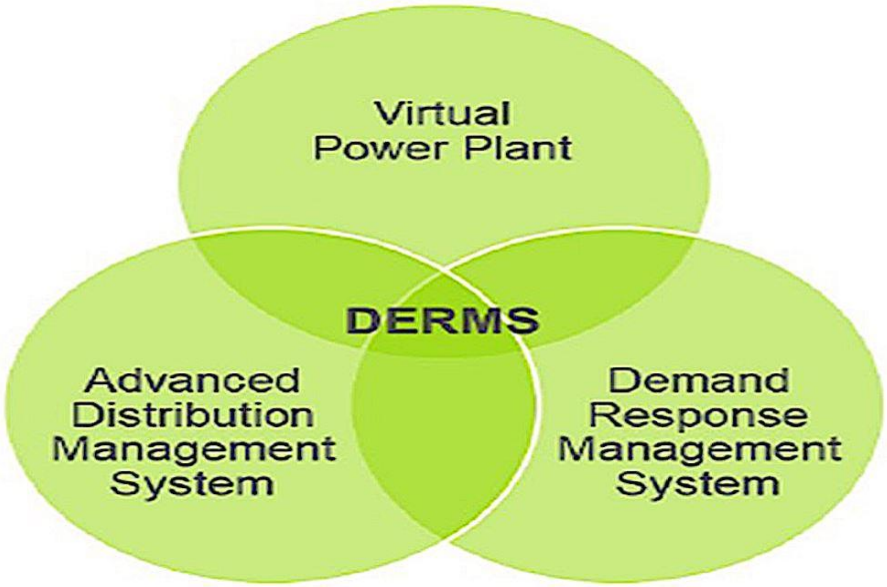
La interoperabilidad es una pieza clave para el proceso evolutivo de la tecnología. A medida que el conjunto de soluciones se llena de productos, los proveedores actuales, los nuevos proveedores y las nuevas empresas han abordado el desarrollo de herramientas de gestión desde diferentes perspectivas [42]. Es así como los ADMS, DERMS y VPP han aparecido en el mercado con el objetivo de brindar al operador de red la de administrar y controlar las características técnicas, operativas y económicas de tener una alta penetración de DER.

Con la proliferación de recursos energéticos distribuidos, las empresas prestadoras de servicios y agregadores requieren de herramientas versátiles y adaptables, que brinden al operador la capacidad de gestionar, controlar y operar la red ante la gran

cantidad información proveniente de la misma, además de satisfacer sus necesidades como empresa o propietario de DER. Es por esto, que caracterizar las herramientas computacionales y determinar la convergencia de su tecnología basados en su finalidad, el software, el usuario final, la región entre otras funcionalidades permite al operador elegir una plataforma integrada que se adapte a sus necesidades de negocio y garantice un rendimiento óptimo de sus activos.

Como caso particular [42], [65] nos muestran cómo los proveedores y sistemas están convergiendo en DERMS como un sistema de gestión que permite un control optimizado de una red más dominada por recursos distribuidos como la generación distribuida. La convergencia permite apreciar como para este caso particular DERMS puede tener todas las capacidades de los otros sistemas y esto depende de la finalidad que cada proveedor quiera para su herramienta.

Figura 26. DERMS una convergencia de las herramientas de gestión.



Fuente: [42]

La clave para comprender el propósito de las tecnologías de gestión DER depende del enfoque que quiera dar cada proveedor a su herramienta y las características con que se puedan dotar a este tipo de tecnologías para la gestión de la red. Para una empresa de servicios públicos, cargada con la obligación de servir, el objetivo principal es siempre el suministro de electricidad confiable y asequible de forma segura y confiable. Para el consumidor, y cada vez más, la creciente población de prosumidores, el objetivo a menudo se centra en reducir los costos de energía [42].

Por consiguiente, como empresa prestadora de servicios o como agregador de DER interesado en adquirir este tipo de tecnologías, es importante establecer cuál es su finalidad como empresa, sus necesidades y especificaciones, pero aún más

importante es definir en qué prioridad las necesito. Lo anterior con el objetivo de que estas herramientas computacionales sean capaces de soportar su modelo de negocios, su topología de red, etc; y con ello garantizar que tengan un adecuado funcionamiento al momento de su implementación.

3.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS HERRAMIENTAS DE GESTIÓN DER

La utilización de herramientas computacionales en la red eléctrica, como ADMS, DERMS y VPP han permitido a las empresas de servicios, agregadores terciarios de energía y prosumidores tener la capacidad de gestionar, operar y controlar los recursos energéticos distribuidos de una forma más ágil y precisa.

La caracterización de las herramientas seleccionadas permite determinar las principales cualidades que ofrece cada tecnología al momento de gestionar, controlar y operar una red más dinámica. Aun así, conocer las principales características de cada herramienta no proporciona total certeza, de si la decisión de implementar este tipo de tecnología fue la correcta o no, para ello las finalidades como empresa interesada y en qué orden de prioridad se encuentran esas necesidades, cumplen un papel primordial para su elección.

La Tabla 3 presenta la caracterización realizada para cada una de las compañías que son objeto de estudio en este documento. Dicha caracterización ha sido realizada considerando las aplicaciones principales que poseen y las capacidades tecnológicas que tiene cada herramienta computacional, lo anterior teniendo en cuenta los conceptos de ADMS, DERMS y VPP descritas en la sección 2.3. Donde se decidió dar un visto bueno aquellas aplicaciones que eran capaces de cumplir y una equis sobre aquellas aplicaciones en las que las compañías aún se encuentran en investigación y/o desarrollo.

- Planificación y previsión DER (P&P DER).
- Localización automatizada de fallos, aislamiento y restauración del servicio (FLISR).
- Conservación mediante la reducción de voltaje (CVR).
- Estimación de estados (EE).
- Flujo de potencia optimo (FPO).
- Control optimo Volt / Var (VVO).
- Gestión de tensión (GT).
- Gestión de demanda máxima (GDM).
- Optimización de cargos por demanda (OCD).
- Despacho y optimización DER (D&O DER).
- Coordinación de agregadores (CA).
- Gestión de calidad de energía (GCE).

Tabla 3. Caracterización de herramientas para la gestión DER.

Compañía	Herramientas	P&P DER	FLISR	CVR	EE	FPO	VVO	GT	GDM	OCD	D&O DER	CA	GCE
ADMS													
Compañía 5	Tecnología 5	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x	x	x	x	✓
Compañía 6	Tecnología 6	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x	x	x	x	✓
Compañía 11	Tecnología 11	✓	✓	x	✓	✓	✓	x	x	x	✓	✓	x
Compañía 13	Tecnología 13	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x	x	x	x	x
Compañía 15	Tecnología 15	✓	✓	x	x	✓	✓	x	✓	x	✓	✓	✓
Compañía 17	Tecnología 17	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x	x	x	x
Compañía 18	Tecnología 18	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x	x	x	x
Compañía 20	Tecnología 20	✓	✓	✓	x	✓	✓	x	x	x	✓	x	x
DERMS													
Compañía 1	Tecnología 1	✓	✓	x	✓	✓	✓	x	x	✓	✓	✓	x
Compañía 2	Tecnología 2	✓	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x
Compañía 3	Tecnología 3	✓	x	x	x	✓	x	✓	x	✓	✓	✓	✓
Compañía 4	Tecnología 4	✓	x	✓	x	✓	✓	✓	x	✓	✓	✓	x
Compañía 7	Tecnología 7	✓	x	x	x	✓	✓	✓	x	x	✓	x	x
Compañía 8	Tecnología 8	✓	x	x	x	✓	x	✓	x	x	✓	✓	x
Compañía 9	Tecnología 9	✓	x	x	x	✓	x	x	x	✓	✓	x	✓
Compañía 10	Tecnología 10	✓	x	x	x	✓	x	✓	x	✓	✓	✓	x
Compañía 12	Tecnología 12	✓	x	x	x	✓	✓	✓	x	✓	✓	✓	x
Compañía 14	Tecnología 14	x	x	x	x	x	x	x	x	✓	✓	✓	x
Compañía 16	Tecnología 16	✓	x	x	x	✓	x	x	x	✓	✓	✓	x
Compañía 19	Tecnología 19	✓	x	x	x	✓	✓	x	x	x	x	x	x
VPP													
Compañía 21	Tecnología 21	x	x	x	x	x	x	✓	✓	x	✓	✓	x
Compañía 22	Tecnología 22	✓	x	x	x	x	x	x	x	✓	✓	✓	x
Compañía 23	Tecnología 23	x	x	x	x	x	x	x	x	✓	✓	✓	x
Compañía 24	Tecnología 24	✓	x	x	x	x	✓	x	x	✓	✓	✓	x

Además, se presentan las diferentes tecnologías DER (generación distribuida (GD), almacenamiento de energía (AA), vehículos eléctricos (VE), respuesta a la demanda (RD) y eficiencia energética (EE)), esto con de fin de determinar cuál es el cubrimiento que tienen las herramientas seleccionadas con relación al concepto de DER definido en este documento.

Tabla 4. Capacidad de gestionar DER de cada herramienta.

	DER						*DER*				
Herramienta	**GD**	**VE**	**AA**	**EE**	**RD**	**Herramienta**	**GD**	**VE**	**AA**	**EE**	**RD**
Tecnología 1	✓	✓	✓	x	✓	Tecnología 13	✓	✓	✓	x	✓
Tecnología 2	✓	x	✓	x	✓	Tecnología 14	✓	x	✓	x	x
Tecnología 3	✓	✓	✓	✓	✓	Tecnología 15	✓	✓	✓	x	✓
Tecnología 4	✓	✓	✓	x	✓	Tecnología 16	✓	x	✓	x	✓
Tecnología 5	✓	✓	✓	x	✓	Tecnología 17	✓	x	✓	x	✓
Tecnología 6	✓	✓	✓	x	x	Tecnología 18	✓	x	✓	x	✓
Tecnología 7	✓	✓	✓	x	✓	Tecnología 19	✓	✓	✓	x	x
Tecnología 8	✓	✓	✓	x	✓	Tecnología 20	✓	✓	✓	x	✓
Tecnología 9	✓	✓	✓	✓	✓	Tecnología 21	✓	✓	✓	x	✓
Tecnología 10	x	✓	✓	✓	✓	Tecnología 22	✓	x	✓	x	✓
Tecnología 11	✓	✓	✓	x	x	Tecnología 23	✓	x	✓	x	✓
Tecnología 12	✓	✓	✓	x	✓	Tecnología 24	✓	✓	✓	x	x

Tal y como se puede observar en la tabla anterior, hoy en día este tipo de herramientas computacionales no tiene el total cubrimiento de los DER, y su gestión, operación y control es enfocada a aspectos puntuales de cada elemento que compone este concepto. Lo anterior evidencia la importancia de que este tipo de herramientas sean capaces de integrarse con otras y sean capaces de tener un funcionamiento complementario que permita el control de los activos de forma confiable y segura.

3.3 ASPECTOS IMPORTANTES PARA LA IMPLEMETACIÓN DE LAS HERRAMIENTAS DE GESTIÓN DER

A continuación, se describen una serie de pasos relevantes al momento de seleccionar e implementar una herramienta computacional para la gestión, operación y control de la red eléctrica. Estos pasos describen un panorama general a considerar para realizar la elección óptima para la administración y control de las características técnicas, operativas y económicas de tener una alta penetración de DER que tenga una empresa interesada en este tipo de tecnologías.

- Definir cuál es la finalidad, sus necesidades y especificaciones para implementar una herramienta computacional, se convierte en una etapa fundamental al momento de determinar cuál es la herramienta adecuada para la gestión, operación y control de sus activos. Además, establecer en que prioridad están sus necesidades permite a la empresa contrastar esta gama de posibilidades y determinar cuál es la herramienta óptima para su modelo de negocio, topología de red, etc.

¿Por qué es importante esto?

Por ejemplo, de acuerdo con [67] si un VPP o un DERMS es o no la opción óptima para una empresa, depende de cómo se utilizarán los DER y cuándo. Para las empresas de servicios públicos con una visión inicial de control de dispositivos de vanguardia para aplicaciones de respuesta de demanda, arbitraje de energía y gestión de demanda máxima, un VPP es probablemente la mejor opción. Un VPP puede ofrecer beneficios significativos y cumplir objetivos a corto plazo, al tiempo que evita la mayor inversión inicial de integración con sistemas DMS, ADMS, OMS o SCADA. Para una empresa, con aplicaciones de ubicación específica y enfocada en la distribución dirigida a nivel de alimentador de distribución para regular las condiciones de la red y prevenir mejor las salidas del sistema, apagones y cortes de energía, se necesita un DERMS.

Ambas plataformas están diseñadas para agregar, optimizar y controlar diversas carteras DER. Los VPP están más centrados en el valor financiero capturado por los mercados, mientras que los DERMS están más centrados en mantener la física de la red eléctrica al garantizar que el voltaje localizado y la potencia reactiva se agrupen en nombre de la estabilidad de la red [65].

- El referenciamiento, de acuerdo con [112] las referencias son datos propiciados por terceros que facilitan la información de un lugar, persona o sobre una investigación realizada, el término referencia describe el proceso por el cual se menciona o se señala a algún objeto, persona o herramienta, es decir, son las informaciones que permiten adquirir conocimientos de una determinada cuestión de interés personas, empleos, lugares, métodos, herramientas, etc.

¿Por qué es importante esto?

Considerando la información obtenida por personas que han tenido la oportunidad de estar en el proceso de selección e implementación de herramientas computacionales como las mencionadas en este documento, el referenciamiento cumple un papel fundamental al momento de la selección adecuada de una herramienta para su empresa, es decir, cuando una empresa se enfrenta a la selección de este tipo de tecnologías el tener con quien compararte y realizar una verificación del funcionamiento de una herramienta computacional, permite tener un panorama general del cómo puede comportarse el sistema una vez implementada este tipo de tecnologías. Es por ello, que se debe buscar empresas espejos, es decir empresas que trabajan con un modelo similar al que se tiene, con necesidades similares que le permitan obtener un panorama global del funcionamiento de su red ante la implementación de este tipo de herramientas para la gestión de la red.

- Como se va a probar cada una de las cualidades que ofrece el proveedor hace parte de los retos que tiene el realizar la implementación de una herramienta computacional para tu negocio y tu red.

¿Por qué es importante esto?

Dentro de este proceso es muy importante definir cuál es la forma en la que la herramienta computacional va a ser puesta a prueba con el fin de determinar si cumple con lo acordado con el proveedor. Lo anterior con el fin de probar que las necesidades como empresa sean cumplidas de manera adecuada una vez este tipo de tecnología entre en funcionamiento.

Hay que mencionar, además que cuando una empresa de servicios o agregador se enfrenta a la selección e implementación de este tipo de tecnologías debe ser consciente de que se trata de un proceso extenso. Para ejemplificar mejor lo anterior, en el ANEXO 2 se presenta algunos de los aspectos considerados por la empresa distribuidora de electricidad en la costa este de Australia Ausgrid, la cual comenzó con la preparación para la implementación de un ADMS en 2017.

3.3.1 Beneficios de las herramientas de gestión. Los proveedores tienen la capacidad de articular la dirección actual y futura del mercado a nivel de tecnología, innovación y necesidades del cliente; pueden crear valor en esta comprensión y combinar experiencias para explotarlas como oportunidades de negocio, además son proveedores con fuerza en unidades de investigación y desarrollo, capacidad de diseño de productos, con solidez en el modelo de negocio ofrecido, con habilidad para ofrecer productos verticales de industria y con capacidad de proponer productos y servicios a nivel mundial [113].

Estos proveedores presentan un amplio portafolio de servicios en soluciones en gestión de mercados, operaciones comerciales, sistemas de gestión de energía, atención de clientes, gestión de activos, sistemas GIS, inteligencia de negocios BI, monitoreo y supervisión del mercado y respuesta a la demanda, entre otros [113]. Es por ello que tienen la capacidad de ofrecer una amplia gama de beneficios basados en las herramientas computacionales que poseen y las capacidades que contiene al momento de realizar gestión, operación y control de la red eléctrica considerando la inclusión de recursos distribuidos.

A continuación, se presentan los beneficios ofrecidos por los proveedores de las herramientas descritas en este documento. Estos beneficios que se presentan a continuación permiten a las empresas interesadas tener una idea de lo que el proveedor está dispuesto a cumplir una vez se tome la decisión de implementar este tipo de tecnología para la gestión de sus activos.

Tabla 5. Beneficios de herramientas para la gestión DER.

Herramientas	Beneficios
ADMS	
Tecnología 5	❖ Identifica problemas y administrar el control activo de los DER de manera coordinada, y gestiona y evita las condiciones de sobretensión y revertir el flujo de energía. ❖ Coordina recursos tradicionales con la administración activa de inversores inteligentes para absorber o generar energía reactiva. ❖ Optimiza equipos e identificar formas de transferir carga durante el uso máximo de energía. ❖ Apoya los niveles más altos de satisfacción de compromiso de los clientes y para ofrecer nuevos servicios de energía confiable, asequible y que respalde una combinación energética diversa.
Tecnología 6	❖ Reducción del voltaje para minimizar el consumo total de energía o para eliminar los picos de carga durante los períodos de alta demanda. ❖ Reducción del tiempo de la duración de la interrupción (SAIDI) y mejora en la frecuencia de ocurrencia de interrupciones (SAIFI) para mayor confiabilidad. ❖ Reduce los costos al permitir una respuesta de interrupción más eficiente y la gestión de despacho de pedidos, especialmente durante condiciones de tormenta de gran volumen.
Tecnología 11	❖ Proporciona información sobre los eventos de DER para el monitoreo y control de los activos aguas abajo de la subestación y detrás del medidor. ❖ Reducir los gastos de capital en la generación centralizada y reducir los costos operativos que ofrece la generación distribuida. ❖ Aumente significativamente la capacidad de alojamiento de la red para los DER y logre los objetivos regulatorios para la generación renovable, con unas inversiones mínimas de red. ❖ Recopilar y almacenar datos de instalación de DER a pequeña escala para comunicación, control, pronóstico y optimización. ❖ Obtenga información sobre los eventos DER y monitoree y controle de manera efectiva los activos aguas abajo de la subestación y detrás del medidor.
Tecnología 13	❖ Tome decisiones más informadas a través de una visibilidad superior del estado del sistema de distribución y los datos operativos en tiempo real. ❖ Proporciona una respuesta automática a las fallas, lo que reduce significativamente la duración y el alcance de la interrupción. ❖ Permite la optimización de voltaje configurable, la minimización de pérdidas y la reducción de la demanda máxima. ❖ Optimice de forma segura la inyección inversa en la red y evite posibles violaciones.
Tecnología 15	❖ Permite aplicaciones avanzadas integradas en un solo modelo de red al combinar datos en tiempo real, datos de redes eléctricas y datos de conectividad. ❖ Proporciona aplicaciones automatizadas para reducir las pérdidas, mantener la calidad de la energía, mejorar la confiabilidad y reducir la demanda máxima. ❖ Modelado, supervisión, gestión y control de generación renovable y distribuida, almacenamiento de energía, microrredes y otros tipos de DER. ❖ Proporciona herramientas de simulación y análisis para ayudar a los operadores a evaluar y validar las opciones en función de las condiciones actuales y futuras y tomar mejores decisiones. ❖ Mejor conocimiento de la situación y aplicaciones para responder automáticamente a interrupciones, minimizando los clientes afectados.
Tecnología 17	❖ La inteligencia situacional proporciona un análisis y una gestión de red eficientes y confiables durante un estado de red que cambia rápidamente. ❖ Administre, controle, visualice, optimice y automatice las redes de distribución desde redes de distribución de energía de todo el estado a toda la ciudad. ❖ Se integra con los sistemas de gestión de energía de microrredes para el control de los recursos energéticos distribuidos o del cliente. ❖ Estandarización con la mayoría de las aplicaciones de la industria y fácil integración con software heredado y de terceros.

Tabla 5. (Continuación).

Herramientas	Beneficios
ADMS	
Tecnología 18	❖ Mejora de la conciencia situacional, permite una toma de decisiones más rápida e informada. ❖ Ahorro de costos logrado a través del monitoreo y control remoto de dispositivos de campo. ❖ Índices de rendimiento mejorados (por ejemplo, SAIDI, SAIFI) ❖ Capacidad para ofrecer garantías de rendimiento a grandes clientes de comercio e industria. ❖ Menos impacto en los clientes debido a cortes más cortos, brindando una experiencia mejorada para el cliente. ❖ Mayor transparencia para que los clientes puedan mantenerse informados sobre las interrupciones actuales y futuras.
Tecnología 20	❖ Se necesitan menos recursos en general para administrar las operaciones de restauración al aprovechar operadores DMS / OMS capacitados. ❖ Reducción de la duración de las interrupciones ya que el análisis y la priorización de recursos son más precisos y oportunos. ❖ Proceso más eficiente a través de la automatización de la conmutación planificada. ❖ Mayor satisfacción del cliente debido al flujo de trabajo integrado que proporciona estimaciones de tiempo de restauración más precisas, más oportunas y acceso inmediato a actualizaciones de estado en tiempo real. ❖ Mejora de la seguridad de los trabajadores, debido a la precisión en tiempo real del modelo y las limitaciones operativas integradas.
DERMS	
Tecnología 1	❖ Supervisa, controla y optimiza la operación de la red de distribución para aumentar la conciencia situacional de los operadores, reduciendo el tiempo de reacción. ❖ Administra de manera eficiente los esfuerzos diarios de mantenimiento y reparación para respaldar la confiabilidad de la red con activos de DER. ❖ Caracterizar los activos de DER para la planificación. ❖ Proporciona capacidades de liquidación. ❖ Gestiona las limitaciones técnicas y comerciales relacionadas con el control de DER al tiempo que proporciona una alta eficiencia operativa. ❖ Involucrar a propietarios de activos DER en programas para gestionar el compromiso del cliente. ❖ Permite la agregación de recursos distribuidos para la participación en el mercado o el control de la red.
Tecnología 2	❖ Eliminación de puntos de congestión de carga locales a un alimentador de distribución, incluso si más de un punto está restringido en el mismo alimentador. ❖ Administrar la carga para evitar que una condición de flujo de potencia inversa intente impulsar los transformadores de la subestación. ❖ El uso de activos con capacidad reactiva para realizar funciones heredadas, para reducir las pérdidas técnicas en el sistema de distribución que antes eran inevitables. ❖ Aprovecha activos DER, suavizando la carga y reduciendo la pérdida de línea. ❖ Mezclar y combinar la demanda o el suministro de energía de casi cualquier tamaño de DER. ❖ Abre la puerta a la participación de más segmentos de clientes que muchos programas simples de respuesta a la demanda. ❖ Agregar muchos DER y presenta su flexibilidad energética al operador de la red o al proveedor de energía como un recurso despachable.
Tecnología 3	❖ Alivie o elimine los problemas de calidad de la energía al enviar configuraciones de calidad de energía dirigidas a grupos de inversores inteligentes. ❖ Gestione la demanda y los recursos de almacenamiento en conjunto para contrarrestar los impactos de la generación distribuida intermitente. ❖ Aumenta las tasas de participación de los clientes y el rendimiento del programa. ❖ Incrementa la rentabilidad al obtener el máximo valor de los activos. ❖ Oportunamente ofrezca grupos de DER a mercados de capacidad y servicios auxiliares a través de análisis predictivo avanzado y optimización de despacho. ❖ Ofrezca envíos precisos de DER agregados y dirigibles, ya sea manual o automáticamente. ❖ Acelerar el tiempo de comercialización de los servicios auxiliares. ❖ Ofrezca valor a los clientes al ayudarlos a monetizar la capacidad flexible y aumentar la eficiencia energética

Tabla 5. (Continuación).

Herramientas	Beneficios
DERMS	
Tecnología 4	❖ Diseñar programas óptimos de adquisición para impulsar la evolución de la red. ❖ Mejorar la capacidad de recuperación con el almacenamiento de energía y las capacidades de isla. ❖ Aumentar la penetración de DER a través de la gestión de voltaje optimizada. ❖ Control de DER manual, semiautomático y totalmente automático. ❖ Despacho seguro de DER que impone límites de carga y descarga ❖ Optimización basada en modelos para controlar dinámicamente los DER dentro de las restricciones de la red local
Tecnología 7	❖ Con capacidades plug and play, reduce los costos de integración de DER desde la selección e integración de equipos hasta la configuración e integración de aplicaciones. ❖ Proporciona la máxima flexibilidad para mezclar y combinar componentes del sistema, incluidos los equipos heredados. ❖ Permite a los usuarios establecer dinámicamente restricciones de activos, restricciones del sistema y objetivos y capacidades del sistema, y convertirlos en los resultados deseados. ❖ Agiliza la adopción de DER desde el aprovisionamiento y la configuración de DER al envío y liquidación óptimos. ❖ Obtenga valor adicional a través de la participación en el mercado y aporte recursos del lado de la demanda en los mercados de servicios auxiliares.
Tecnología 8	❖ Permite administrar grandes cargas de carga fuera de la calle, como aparcamientos y cargas de carga de alta velocidad residenciales. ❖ Ofrece la capacidad de administrar todos los tipos de DER con diferentes capacidades en diferentes horizontes temporales. ❖ Combina métodos de control preventivo, control correctivo y mecanismos de seguridad ❖ Ofrece una ventana móvil de horarios de despacho optimizados basados en pronósticos, precios de energía y las aplicaciones que se admitirán. ❖ Vincula DER a la red para brindar una respuesta de demanda altamente localizada. ❖ Proporciona conectividad a DER industrial y comercial, así como a DER residencial, ofreciendo aumentos en la capacidad de alojamiento que van del 50 al 100%.
Tecnología 9	❖ Proporciona acceso inmediato a los horarios, además de proporcionar la capacidad de administrar y ejecutar operaciones de servicio de campo de forma remota. ❖ Facilita el registro fácil de clientes en programas de gestión del lado de la demanda. ❖ Permite a las empresas de servicios públicos desarrollar estrategias de control personalizadas basadas en los requisitos específicos del sistema. ❖ Proporciona una inscripción segura, un compromiso continuo y capacidades agregadas de pronóstico y despacho de los dispositivos. ❖ Ayudan a los clientes a reducir el consumo de energía en el hogar, lo que se suma al ahorro de energía ya proporcionado por los pagos de incentivos del programa de respuesta a la demanda.
Tecnología 10	❖ Reduce drásticamente el tiempo empleado al automatizar procesos vitales en programas DER: registro de DER, formación de recursos, control de dispositivos, medición y verificación, y liquidación. ❖ Ofrece desplazamiento de carga y adaptación de energías renovables, gestión y reducción de inversores solares, carga gestionada, reducción de la demanda máxima y más. ❖ Permiten a las empresas de servicios públicos agregar, monitorear y despachar dispositivos mediante programas de gestión.. ❖ Permite a los operadores configurar eventos RD en minutos y enviarlos en segundos, y proporciona capacidades de análisis granular para cálculos de rendimiento y liquidación.
Tecnología 12	❖ Mejora la resistencia y confiabilidad del sistema. Desplazando la carga fuera de los períodos de precios altos ❖ Minimizando las pérdidas del sistema a través del balanceo de fase y el factor de potencia mejorado. ❖ Suministro de servicios auxiliares y otros servicios de red a los mercados de energía y electricidad a granel. ❖ Capacidad para agregar activos de RD / DER a las plantas de energía virtual (VPP) que se pueden usar para proporcionar nuevos servicios de energía a granel como la carga / rampa y la respuesta de frecuencia primaria.

Tabla 5. (Continuación).

Herramientas	Beneficios
DERMS	
Tecnología 14	❖ Reduce el costo de integración con otros sistemas y preserva la flexibilidad para agregar o intercambiar componentes en el futuro. ❖ Monitoreo y control en tiempo real de bancos de baterías, dispositivos solares fotovoltaicos y/o dispositivos auxiliares dentro de un sistema de control personalizable. ❖ Modos de operación priorizables para casos de uso de potencia real y reactiva, como el suavizado de potencia y la respuesta de frecuencia ❖ Función de control local, remoto y automático junto con un sistema de alarma de tres niveles para garantizar un funcionamiento seguro. ❖ Apoyo de isla para satisfacer las necesidades locales cuando se pierde el servicio de red
Tecnología 19	❖ Vista de red completa para una respuesta rápida a los cambios en la demanda. ❖ Adaptable a los cambios futuros de la red con una mínima participación del proveedor. ❖ Menores costos de producción y consumo de energía gracias a la optimización avanzada. ❖ Menos interrupciones y perturbaciones utilizando algoritmos de predicción de carga ❖ Cumplimiento de la normativa de emisiones de gases de efecto invernadero.
VPP	
Tecnología 21	❖ Envíe las solicitudes de DER para energía debido a contingencias o eventos de emergencia. ❖ Aborde los desequilibrios y las fluctuaciones de la red a corto plazo en los niveles de frecuencia con respuesta inmediata a las solicitudes de regulación ascendente y descendente. ❖ Reduzca la demanda en la cartera de DER al responder a una señal de un operador del sistema. ❖ Mitigue los picos de uso, controle la demanda en el sitio del cliente y exporte energía a otros hogares en el mismo alimentador o transformador. ❖ Envíe la energía automáticamente según los umbrales de voltaje programados para cumplir con los requisitos del operador de red. ❖ Almacene el exceso de energía durante el día y repare la carga del cliente por la noche cuando la energía ya no esté produciendo.
Tecnología 22	❖ Permite controlar una gran cantidad de activos DER y le ayuda a ejecutar horarios optimizados con exactitud. Teniendo en cuenta las restricciones de los activos. ❖ Permite monitorear una gran cantidad de activos y cerrarlos si es necesario. Por lo tanto, las situaciones críticas de la red se pueden evitar de manera confiable. ❖ Las señales de precio de los intercambios de energía y las señales de control del operador del sistema se procesan como un parámetro central para controlar los procesos y activos industriales. ❖ Puede ajustar la producción de energía, el consumo y los sistemas de almacenamiento según los requisitos de la red y, por lo tanto, lograr una fuente de alimentación estable.
Tecnología 23	❖ Mitiga los desafíos de intermitencia y coordinación mediante la optimización de la combinación energética. ❖ Garantiza la calidad, la energía rentable, independientemente de la mezcla DER o la distribución del sistema ❖ Integre y adáptese fácilmente a agregadores y VPP de terceros ❖ Proporciona una mejor conciencia situacional, visualización y análisis. ❖ Alivia las fluctuaciones, desde el principio. ❖ Asegúrese de que el equipo no funcione más allá de las clasificaciones nominales, maximizando la vida útil del equipo. ❖ Ofrece a los clientes nuevos servicios de generación de ingresos detrás del medidor.
Tecnología 24	❖ Mitiga los desafíos de intermitencia y coordinación mediante la optimización de la combinación energética. ❖ Garantiza la calidad, la energía rentable, independientemente de la mezcla DER o la distribución del sistema ❖ Integre y adáptese fácilmente a agregadores y VPP de terceros ❖ Proporcionar una mejor conciencia situacional, visualización y análisis. ❖ Aliviar las fluctuaciones, desde el principio. ❖ Asegúrese de que el equipo no funcione más allá de las clasificaciones nominales, maximizando la vida útil del equipo

Considerando la capacidad que tiene cada proveedor para articular la dirección actual y futura del mercado, al momento de encontrar información satisfactoria sobre la implementación de este tipo de herramientas computacionales y las experiencias obtenidas con cada cliente, los proveedores presentan una información muy limitada por motivos como:

- Acciones en la bolsa de valores.
- Poder de permanencia en el mercado.
- Contrato de confidencialidad entre proveedores y empresas que adquieren su producto.
- Entre otras.

Lo anterior, no permite definir unas desventajas claras para este tipo de tecnologías dado que el proveedor se ve expuesto a los factores anteriormente mencionados que puede causar un decremento importante en el valor de sus acciones y es por ello por lo que este tipo de procesos de selección e implementación de herramientas computacionales tienen una prolongación significativa con el fin de salvaguardar información que pueda afectarles como compañía.

Por otra parte, diversos proveedores poseen una plataforma unificada, lo que permite reducir los costos de inversión para una empresa, además de brindar de un modelo único, que reduce el tiempo de mantenimiento y facilita el manejo del sistema a los operadores. Mientras que otros requieren alianzas con el objetivo de fortalecer sus tecnologías y ampliar sus capacidades al momento de realizar gestión, operación y control de la red.

Ahora bien, para cualquier compañía interesada en realizar alianzas para este tipo de tecnologías es importante considerar, que pueden suceder situaciones como:

- Que la alianza permita robustecer una herramienta computacional y permita consolidarla con más capacidades que permitan al operador de red tener una mayor alternativa para la administración y control de sus activos.
- Que se realicen alianzas circunstanciales que puedan generar conflictos al operador en el futuro por motivos como el de estar o no estar conforme con el rendimiento de su producto y que esto lleve a realizar un cambio tecnológico que uno u otro no esté dispuesto a realizar.

Por lo anterior, el referenciamiento cobra un papel fundamental al momento de la selección de este tipo de tecnologías, pues permite tener una retroalimentación de las experiencias que se han tenido al implementar una herramienta y con ello un panorama de cómo puede ser su funcionamiento.

Con el objetivo de brindar una visión más clara del funcionamiento de las herramientas seleccionas, en el siguiente capítulo se presentan algunos de los casos de implementación encontrados en la literatura donde se presentan los beneficios obtenidos con la implementación de este tipo de herramientas computacionales para la gestión de sus activos.

4. CASOS DE IMPLEMENTACIÓN Y ENERGY CLOUD

4.1 CASOS DE IMPLEMENTACIÓN A NIVEL MUNDIAL

Una vez determinadas las características de cada herramienta computacional, sus beneficios y algunos de los aspectos a considerar al momento de la selección e implementación de este tipo de tecnologías, es importante conocer como ha sido la experiencia de algunas empresas de servicios públicos o agregadores que han tomado la decisión de implementar este tipo de tecnologías para su red y modelo de negocios adecuados a sus finalidades y prioridades como empresa.

Los casos de implementación permiten visualizar cual es la finalidad y como ha sido el funcionamiento en un caso de gestión, operación y control real con algunas de las herramientas que han sido seleccionadas en este documento. Además, permite determinar los beneficios que puede traer para la empresa la utilización de este tipo de tecnologías. Por lo anterior, el presente capitulo se centrará en describir algunos de los casos de implementación propuestos en la literatura y determinar los aspectos relevantes que se han logrado evidenciar ante la utilización de este tipo de tecnologías en un escenario real.

A continuación, se describen algunos de los casos encontrados en la literatura sobre la utilización de las herramientas computacionales que han sido estudiadas a lo largo de este documento.

4.1.1 Enbala Power Networks: proporcionando integración eólica a través de la gestión inteligente de carga [114], [115]**.** Lanzado en 2010 como un proyecto del Fondo de Energía Limpia a través de National Resources Canada, Powershift Atlantic es una iniciativa de investigación colaborativa dirigida por New Brunswick Power, una empresa de servicios públicos con 294 MW de energía eólica en su mezcla de generación.

A través de un proceso competitivo de RFP, ENBALA Power Networks fue seleccionada por New Brunswick Power para facilitar la integración efectiva de la generación de energía renovable en la provincia en relación con el proyecto PowerShift Atlantic. El papel de ENBALA es conectar e involucrar a los clientes comerciales de New Brunswick Power en tiempo real para apoyar la integración eólica. PowerShift Atlantic, un proyecto de demostración de investigación del este de Canadá, se centra en encontrar formas más eficientes y únicas de integrar la energía eólica en el sistema de energía mediante la conexión de clientes de servicios públicos.

La energía eólica es una parte importante del suministro actual de electricidad de Nuevo Brunswick, ya que representa el 6% (294 MW) de la mezcla de generación. Al trabajar estrechamente con ENBALA y su tecnología de equilibrio de red, la base de clientes comerciales de New Brunswick Power puede respaldar una red más

confiable y rentable, reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero y disminuyendo los costos.

La plataforma de ENBALA brinda flexibilidad operativa de red a New Brunswick Power al conectarse continuamente a una red de cargas comerciales e industriales y a una planta de energía virtual (VPP) que monitorea constantemente la generación y el consumo de energía y envía señales a ENBALA y otros agregadores basados en actividad eólica y demanda del sistema eléctrico. La solución de integración eólica de ENBALA aprovecha la "flexibilidad operativa" inherente a las cargas del lado de la demanda, que es la cantidad que los grandes clientes pueden cambiar y variar su uso de energía dentro de los parámetros operativos definidos. ENBALA pronostica qué cargas pueden equilibrar los cambios en el viento y cuánto cambio de potencia está disponible actualmente. La flexibilidad del uso de energía de los clientes conectados se agrega y se utiliza para equilibrar las fluctuaciones en la generación eólica. Vista como un recurso único y despachable por New Brunswick Power, esta red de cargas del lado de la demanda puede seguir continuamente los cambios en el viento, proporcionando servicios de equilibrio en tiempo real sin afectar las operaciones diarias de los clientes participantes.

4.1.1.1. Aspectos destacados del proyecto

- ENBALA y New Brunswick Power se han asociado para integrar de manera confiable la generación de viento intermitente.
- ENBALA agrega de manera inteligente los MW capturados de los cambios de uso de energía en tiempo real dentro de una red de cargas de proceso operadas por instalaciones comerciales e industriales.
- New Brunswick Power utiliza esta "flexibilidad operativa" consolidada como un recurso único y despachable para ayudar a integrar la energía eólica.
- A través de una conexión en tiempo real a una planta de energía virtual (VPP). la red de cargas del lado de la demanda de ENBALA proporciona equilibrio en tiempo real del suministro y la demanda de electricidad a New Brunswick sin afectar las operaciones diarias de los clientes participantes.

4.1.2 Avista: Despacho económico de recursos energéticos distribuidos

[116]**.** Como parte del Proyecto de Demostración de Red Eléctrica Inteligente del Pacífico Noroeste, financiado por ARRA, Avista como empresa activa en la la producción, transmisión y distribución de energía en el oriente de Washington, implementó el sistema de gestión de recursos de energía distribuidos (Spirae DERMS) que puede automatizar el envío de recursos de energía distribuidos propiedad del cliente, incluida la respuesta de la demanda. Los clientes minoristas en Pullman, Washington que firmaron el proyecto recibieron un termostato inteligente suministrado por ecobee. Los DERMS pueden ajustar los puntos de ajuste de la temperatura del termostato en incrementos de un grado con un máximo de cuatro grados.

Los clientes reciben $ 100 USD por año como incentivo para participar, además de los ahorros que se acumulan al ajustar el termostato a un punto de ajuste de temperatura más eficiente. El DERMS determina el valor de la energía en tiempo real para cada activo (en este caso, el termostato) para programar el activo de mayor valor para el envío en modo manual, semiautomático o totalmente automático.

Trabajando con la Washington State University (WSU), Avista ha integrado un sistema avanzado de gestión de energía en edificios (BEMS) con los DERMS. El BEMS está compuesto por cinco niveles de activos que pueden enviarse para reducir la carga o generar energía. Los cinco niveles incluyen manejadores de aire dentro de 39 edificios (nivel 1), nueve enfriadores (nivel 2), dos generadores de gas natural (niveles 3 y 4) y un generador diesel (nivel 5). El BEMS proporciona disponibilidad y capacidad de cada nivel, cada 5 minutos, a los DERMS. El DERMS crea una corrección automática hacia adelante.

Proyecciones de carga y disponibilidad de activos con base en datos históricos. Por ejemplo, si un ocupante del edificio anula constantemente la llamada a la descarga de carga a través del sistema de manejo de aire, entonces el DERMS aprenderá de esta tendencia y desarrollará proyecciones de disponibilidad de activos más precisas.

El BEMS entiende las limitaciones de los activos individuales. Los datos de carga predichos, la disponibilidad de activos predicha, los costos de suministro de energía fijos y variables y las restricciones del sistema crean un algoritmo de validación de cuatro cuadrantes en tiempo real. Este algoritmo determina el valor del envío de un activo en particular para la empresa de servicios públicos y el cliente, lo que resulta en un resultado de ganar-ganar, ganar-perder, perder-ganar o perder-perder. Dado un parámetro para resultados aceptables y deseados, el sistema programa automáticamente los activos para el envío. Posteriormente, los resultados se concilian con el cronograma para asegurar que los servicios prestados se evaluaron con precisión.

El sistema comenzó a funcionar en marzo de 2014. A partir de octubre de 2014, se iniciaron más de 1,000 eventos. ¿Qué tiene de único este sistema? Primero, la predicción a futuro de la capacidad de los activos es lo suficientemente precisa para el envío. En segundo lugar, los clientes tienen el control completo de BEMS. Y tercero, la cuantificación del valor en tiempo real permite que tanto la empresa de servicios públicos como el cliente entiendan cualquier ganancia o pérdida.

Gracias a la flexibilidad de BEMS, los clientes también están obteniendo ahorros tangibles independientes de los DERMS. WSU está usando $ 150.000 USD menos de electricidad por mes. Y los clientes de termostatos residenciales han ahorrado entre 4.5 % y 9.0 % en consumo de energía reducido. Finalmente, los datos de WSU y de los sistemas de los clientes con termostato se pueden utilizar para identificar oportunidades de eficiencia rentables adicionales. Avista usó esta capacidad de diagnóstico para identificar a dos participantes del termostato que tenían bombas

de calor que funcionaban mal. Una vez que se realizaron las reparaciones, estos clientes ahorraron un promedio de $ 200 USD por mes.

Avista está evaluando la oportunidad de utilizar los DERMS para aprovechar los activos propiedad de los clientes en todo el territorio del servicio. El enfoque inicial es la generación de espera del cliente que puede aprovecharse como reservas sin giro. Dado el crecimiento anticipado de la generación renovable y los recursos energéticos distribuidos, las áreas de enfoque futuras incluyen activos de clientes industriales y comerciales que pueden aprovecharse para equilibrar la capacidad localizada, el pico y las necesidades operativas con la intención de compensar la inversión de capital.

4.1.2.1 Aspectos destacados del proyecto

- 4.000 eventos enviados en los primeros ocho meses a recursos de energía distribuidos (DER) propiedad del cliente.
- Cuantificación de valor de cuatro cuadrantes para asegurar el valor a la empresa de servicios y cada participante se entiende claramente antes del envío de un evento.
- Programación predictiva basada en la cuantificación del valor de cuatro cuadrantes para el envío automatizado de eventos.
- La validación de valor en tiempo real permite la reconciliación en tiempo real de eventos programados y transacciones reales por participante.

4.1.3 Pepco Holdings, Inc: restauración mejorada del sistema durante los eventos principales [114].

Con el despliegue de medidores inteligentes, la detección de interrupciones y la eficiencia de restauración ha mejorado. Al utilizar la funcionalidad de ping de los medidores inteligentes e integrar esos datos en Utilities Network Management System (NMS) compatible con Oracle, Pepco ahora puede verificar si un medidor está energizado sin contactar al cliente o enviar un equipo. Al utilizar AMI durante las interrupciones, al integrar las notificaciones del medidor en nuestro sistema de administración de interrupciones, PHI ha visto mejoras significativas en el proceso de restauración. Esta funcionalidad ha resultado en la reducción del número de eventos de interrupción enviados a los equipos de restauración de campo en un 10%. En general, la capacidad mejorada de administración de interrupciones de Pepco ha dado como resultado una reducción en los pedidos de interrupción, una restauración más rápida de la interrupción y una mayor satisfacción del cliente.

Durante una tormenta reciente en el verano de 2013, PHI pudo reducir significativamente la cantidad de eventos encontrados restaurados cuando llegó el personal.

4.1.3.1 Aspectos destacados del proyecto

- Se dio cuenta de una reducción en el número de pedidos de interrupción en un 30%.
- La duración total de los esfuerzos de restauración del corte fue más corta.
- La verificación de restauración utilizando tecnología avanzada de infraestructura de medición redujo el número de eventos de interrupción enviados a las tripulaciones en un 10%, lo que resulta en menos rollos de camiones innecesarios.
- La verificación silenciosa de la restauración mediante medidores inteligentes redujo la cantidad de llamadas salientes de los clientes y las interrupciones de los clientes, lo que resultó en una mayor satisfacción del cliente.
- Datos precisos de interrupciones producidas por medidores avanzados, procesados instantáneamente a través del sistema de gestión de interrupciones, lo que permite una asignación óptima de las tripulaciones durante eventos importantes.

4.1.4 Next Kraftwerke: proporciona servicios de red al operador del sistema de transmisión en Bélgica [48].

Bélgica ha involucrado soluciones de respuesta a la demanda en sus operaciones diarias del mercado de electricidad de una manera práctica. El operador del sistema de transmisión de electricidad Elia acepta la capacidad de recursos de energía distribuida para compensar los desajustes entre la producción y la demanda de potencia máxima, en la que los clientes industriales tienen la mayor importancia. Los operadores de sistemas de transmisión y distribución han colaborado para desarrollar una plataforma de TI compartida centralmente, que permite compartir todos los datos relacionados con la obtención de recursos energéticos distribuidos para obtener flexibilidad. A través de este centro de datos, todos los usuarios y generadores conectados a la red de transmisión / distribución pueden proporcionar servicios de flexibilidad a los operadores del sistema diariamente.

Las empresas de agregadores de recursos energéticos distribuidos, como REstore y Next Pool, proporcionan las capacidades requeridas a Elia. Esto se hace en condiciones de estrés, en las que ya se han contratado cientos de megavatios, para agregar flexibilidad a las operaciones del sistema belga. REstore agrega capacidades industriales flexibles (1.7 GW en total) y monitorea constantemente la carga de la red. En los momentos de mayor demanda, las compañías en la cartera de REstore ayudan a mantener el equilibrio de la red mediante el desplazamiento de la carga.

A través de la digitalización, Next Kraftwerke está agregando 5 000 unidades que producen energía y consumen energía en el VPP Next Pool. Con una capacidad total de más de 4 100 MW (no sólo en Bélgica), el VPP comercializa la energía agregada en diferentes mercados de energía. El VPP contribuye sustancialmente a

la estabilización de la red al distribuir inteligentemente la energía generada y consumida por las unidades individuales en tiempos de carga máxima.

Los operadores de sistemas de transmisión, como Elia, utilizan la reserva de control para equilibrar el sistema eléctrico. Las reservas secundarias deben activarse por completo en 7.5 minutos y son el producto de equilibrio más importante para Elia. Para probar si los agregadores pueden proporcionar reservas secundarias en una calidad comparable a las unidades actuales, se llevó a cabo un proyecto piloto en 2017 en el que Next Kraftwerke y los demás participantes demostraron que los VPP pueden cumplir los requisitos técnicos.

4.1.4.1 Aspectos destacados del proyecto

- REstore y Next Pool y Elia se han asociado para integrar de manera confiable recursos de energía distribuida para compensar los desajustes entre oferta y demanda.
- Next Kraftwerke agrega capacidades industriales flexibles en MW y monitorea constantemente la carga de la red para mantener el equilibrio de la red mediante el desplazamiento de la carga.
- Elia utiliza la reserva de control para equilibrar el sistema eléctrico donde las reservas segundarias tiene un tiempo de activación de 7.5 minutos. Esto permite a Elia la "flexibilidad operativa" necesaria para mantener la red confiable y segura.

4.1.5 Colombia. El sector eléctrico en Colombia está presentando grandes cambios, el desarrollo e implementación de nuevas regulaciones, la inclusión de recursos distribuidos a la red, la participación activa del usuario final y la aparición de mercados y modelos de negocios innovadores han llevado a la actualización de la red eléctrica e implementación de avances en informática, comunicación y nuevas tecnologías operativas y de energía, con el objetivo de que el sistema garantice confiabilidad, disponibilidad de la información e integración en el desarrollo de una infraestructura resiliente, segura y confiable.

Dentro de este ámbito las empresas de servicios públicos y operadores de red en Colombia han optado en la implementación de ADMS para la administración y control de las características técnicas, operativas y económicas que presenta la evolución de la red y su transición hacia una red inteligente que integra DER en el sistema.

Dentro de esta inclusión de herramientas computacionales, varias empresas de servicios públicos en Colombia se encuentran se encuentra en el proceso de selección e implementación de este tipo de tecnologías con el objetivo de gestionar, operar y controlar de forma más eficiente, económica, segura y sostenible sus activos.

En la Tabla 6 se presenta el consolidado de las herramientas computacionales seleccionadas en el presente documento, con sus respectivas características, beneficios y casos de implementación encontrados en la literatura.

4.2 ENERGY CLOUD

La industria energética actual se encuentra simplemente en la primera fase de transformación. Una proporción cada vez mayor de la generación de energía renovable, la adopción a gran escala de los recursos energéticos distribuidos (DER), la descarbonización de la economía global, la electrificación del transporte y la digitalización están reformulando el paradigma energético existente de manera profunda. El ecosistema del energy cloud resultante soportará múltiples flujos de valor entre los actores en red. Si bien el crecimiento posterior significará más competencia, también significará más oportunidades para los participantes y terceros en múltiples plataformas centradas en el cliente [45].

Energy cloud es el resultado de un cambio fundamental en la forma en que se genera y distribuye la electricidad, así como la evolución de la relación tradicional entre las partes interesadas en la red eléctrica, en particular entre las empresas de servicios públicos y sus clientes. Como concepto representa una amplia gama de cambios estratégicos, operativos, tecnológicos, comerciales, ambientales y regulatorios que están transformando el modelo de utilidad tradicional para el suministro de energía. Más en la práctica, energy cloud es una plataforma emergente en la que tecnologías y soluciones avanzadas pueden integrarse y competir por una participación de mercado en un mercado dinámico[52].

Energy cloud se encuentra en la confluencia de tendencias tecnológicas amplias que influyen en la generación de energía, la infraestructura de red, el entorno construido y los entornos de transporte. La generación distribuida, el almacenamiento de energía y las configuraciones tecnológicas, como las microrredes y las centrales eléctricas virtuales (VPP), son los caballos de batalla dentro de este panorama. Sin embargo, el hardware integrado (como los medidores y los inversores inteligentes interconectados a través del control avanzado de supervisión y adquisición de datos [SCADA] y ADMS) y el software forman el pegamento que une energy cloud y permite su operatividad. Una mayor penetración de estas soluciones de hardware y software conduce a mejores oportunidades de DR y capacidades de eficiencia energética más sólidas [45], [52].

Tabla 6. Tabla consolidada

Compañía	Herramienta	Aplicaciones	Beneficios
Compañía 10	Tecnología 1	P&P DER FLISR CVR EE FPO VVO OCD D&O DER CA	✓ Supervisa, controla y optimiza la operación de la red para aumentar la conciencia situacional de los operadores, reduciendo el tiempo de reacción. ✓ Administra de manera eficiente los esfuerzos diarios de mantenimiento y reparación para respaldar la confiabilidad de la red con activos de DER. ✓ Caracterizar los activos de DER para la planificación. ✓ Proporciona capacidades de liquidación ✓ Gestiona las limitaciones técnicas y comerciales relacionadas con el control de DER al tiempo que proporciona una alta eficiencia operativa. ✓ Involucrar a los propietarios de activos DER en programas para gestionar el compromiso del cliente. ✓ Permite la agregación de recursos distribuidos para la participación en el mercado o el control de la red.
Compañía 2	Tecnología 2	P&P DER FPO VVO GT GDM OCD D&O DER CA	✓ Eliminación de puntos de congestión de carga locales a un alimentador de distribución, incluso si más de un punto está restringido en el mismo alimentador. ✓ Administrar la carga para evitar que una condición de flujo de potencia inversa intente impulsar los transformadores de la subestación. ✓ El uso de activos con capacidad reactiva para realizar funciones heredadas, para reducir las pérdidas técnicas en el sistema de distribución que antes eran inevitables. ✓ Aprovecha activos DER, suavizando la carga y reduciendo la pérdida de línea. ✓ Mezclar y combinar la demanda o el suministro de energía de casi cualquier tamaño de DER. ✓ Abre la puerta a la participación de más segmentos de clientes que muchos programas simples de respuesta a la demanda (RD). ✓ Agregar muchos DER y presenta su flexibilidad energética al operador de la red o al proveedor de energía como un recurso despachable.
Compañía 3	Tecnología 3	P&P DER FPO GT OCD D&O DER CA GCE	✓ Alivie o elimine los problemas de calidad de la energía al enviar configuraciones de calidad de energía dirigidas a grupos de inversores inteligentes. ✓ Gestione la demanda y los recursos de almacenamiento en conjunto para contrarrestar los impactos de la generación distribuida intermitente ✓ Aumenta las tasas de participación de los clientes y el rendimiento del programa. ✓ Incrementa la rentabilidad al obtener el máximo valor de los activos. ✓ Oportunamente ofrezca grupos de DER a mercados de capacidad y servicios auxiliares a través de análisis predictivo avanzado y optimización de despacho. ✓ Ofrezca envíos precisos de DER agregados y dirigibles, ya sea manual o automáticamente. ✓ Acelerar el tiempo de comercialización de los servicios auxiliares. ✓ Ofrezca valor a los clientes al ayudarlos a monetizar la capacidad flexible y aumentar la eficiencia energética
Compañía 4	Tecnología 4	P&P DER CVR FPO VVO GT OCD D&O DER CA	✓ Diseñar programas óptimos de adquisición para impulsar la evolución de la red. ✓ Mejorar la capacidad de recuperación con el almacenamiento de energía y las capacidades de isla. ✓ Aumentar la penetración de DER a través de la gestión de voltaje optimizada. ✓ Control de DER manual, semiautomático y totalmente automático. ✓ Despacho seguro de DER que impone límites de carga y descarga ✓ Optimización basada en modelos para controlar dinámicamente los DER dentro de las restricciones de la red local
Compañía 5	Tecnología 5	P&P DER FLISR CVR EE FPO VVO GT GCE	✓ Identifica problemas y administrar el control activo de los DER de manera coordinada, gestiona y evita las condiciones de sobretensión y revertir el flujo de energía. ✓ Coordina recursos tradicionales con la administración activa de inversores inteligentes para absorber o generar energía reactiva. ✓ Optimiza equipos existentes e identificar formas de transferir carga durante el uso máximo de energía. ✓ Apoya los niveles más altos de satisfacción de compromiso de los clientes y para ofrecer nuevos servicios de energía confiable, asequible y que respalde una combinación energética diversa.

Tabla 6. (Continuación)

Compañía	Herramienta	Aplicaciones	Beneficios
Compañía 6	Tecnología 6	P&P DER FLISR CVR EE FPO VVO GT - GCE	✓ Reducción del voltaje para minimizar el consumo total de energía o para eliminar los picos de carga durante los períodos de alta demanda. ✓ Reducción del tiempo de la duración de la interrupción (SAIDI) y mejora en la frecuencia de ocurrencia de interrupciones (SAIFI) para mayor confiabilidad. ✓ Reduce los costos al permitir una respuesta de interrupción más eficiente y la gestión de despacho de pedidos, especialmente durante condiciones de tormenta de gran volumen.
Compañía 7	Tecnología 7	P&P DER FPO VVO GT D&O DER	✓ Con capacidades plug and play, reduce los costos de integración de DER desde la selección e integración hasta la configuración e integración de aplicaciones. ✓ Proporciona la máxima flexibilidad para mezclar y combinar componentes del sistema, incluidos los equipos heredados. ✓ Permite a los usuarios establecer dinámicamente restricciones de activos, restricciones del sistema y objetivos y capacidades del sistema, y convertirlos en los resultados deseados. ✓ Agiliza la adopción de DER desde el aprovisionamiento y la configuración de DER al envío y liquidación óptimos. ✓ Obtenga valor adicional a través de la participación en el mercado y aporte recursos del lado de la demanda en los mercados de servicios auxiliares.
Compañía 8	Tecnología 8	P&P DER FPO GT D&O DER CA	✓ Permite administrar grandes cargas de carga fuera de la calle, como aparcamientos y cargas de carga de alta velocidad residenciales. ✓ Ofrece la capacidad de administrar todos los tipos de DER con diferentes capacidades en diferentes horizontes temporales. ✓ Combina métodos de control preventivo, control correctivo y mecanismos de seguridad ✓ Ofrece una ventana móvil de horarios de despacho optimizados basados en pronósticos, precios de energía y las aplicaciones que se admitirán. ✓ Vincula DER a la red para brindar una respuesta de demanda altamente localizada. ✓ Proporciona conectividad a DER industrial, comercial y residencial, ofreciendo aumentos en la capacidad de alojamiento que van del 50 al 100%.
Compañía 9	Tecnología 9	P&P DER FPO OCD D&O DER GCE	✓ Proporciona acceso inmediato a los horarios, además de proporcionar la capacidad de administrar y ejecutar operaciones de servicio de campo de forma remota. ✓ Facilita el registro de clientes en programas de gestión de la demanda. ✓ Permite a las empresas de servicios públicos desarrollar estrategias de control personalizadas basadas en los requisitos específicos del sistema. ✓ Proporciona una inscripción segura, un compromiso continuo y capacidades agregadas de pronóstico y despacho de los dispositivos. ✓ Ayudan a los clientes a reducir convenientemente el consumo de energía en el hogar, lo que se suma al ahorro de energía ya proporcionado por los pagos de incentivos del programa de respuesta a la demanda.
Compañía 10	Tecnología 10	P&P DER FPO GT OCD D&O DER CA	✓ Reduce drásticamente el tiempo empleado al automatizar procesos vitales en programas DER: registro de DER, formación de recursos, control de dispositivos, medición y verificación, y liquidación. ✓ Ofrece desplazamiento de carga y adaptación de energías renovables, gestión y reducción de inversores solares, carga gestionada, reducción de la demanda máxima y más. ✓ Permiten a las empresas de servicios públicos agregar, monitorear y despachar dispositivos mediante programas de gestión. ✓ Permite a los operadores configurar eventos DR en minutos y enviarlos en segundos, y proporciona capacidades de análisis granular para cálculos de rendimiento y liquidación.
Compañía 11	Tecnología 11	P&P DER FLISR EE FPO VVO D&O DER CA	✓ Proporciona información sobre los eventos de DER para el monitoreo y control de los activos aguas abajo de la subestación y detrás del medidor. ✓ Reducir los gastos de capital en la generación centralizada y reducir los costos operativos que ofrece la generación distribuida. ✓ Aumente significativamente la capacidad de alojamiento de la red para los DER y logre los objetivos regulatorios para la generación renovable, con unas inversiones mínimas de red. ✓ Recopilar y almacenar datos de instalación de DER a pequeña escala para comunicación, control, pronóstico y optimización. ✓ Obtenga información sobre eventos DER y monitoree y controle de manera efectiva los activos aguas abajo de la subestación y detrás del medidor.

Tabla 6. (Continuación)

Compañía	Herramienta	Aplicaciones	Beneficios
Compañía 12	Tecnología 12	P&P DER FPO VVO GT OCD D&O DER CA	✓ Mejora la resistencia y confiabilidad del sistema. Desplazando la carga fuera de los períodos de precios altos ✓ Minimizando las pérdidas del sistema a través del balanceo de fase y el factor de potencia mejorado. ✓ Suministro de servicios auxiliares y otros servicios de red a los mercados de energía y electricidad a granel. ✓ Capacidad para agregar activos de RD / DER a las plantas de energía virtual (VPP) que se pueden usar para proporcionar nuevos servicios de energía a granel como la carga / rampa y la respuesta de frecuencia primaria .
Compañía 13	Tecnología 13	P&P DER FLISR CVR EE FPO VVO GT	✓ Tome decisiones más informadas a través de una visibilidad superior del estado del sistema de distribución y los datos operativos en tiempo real. ✓ Proporciona una respuesta automática a las fallas, lo que reduce significativamente la duración y el alcance de la interrupción. ✓ Permite la optimización de voltaje configurable, la minimización de pérdidas y la reducción de la demanda máxima. ✓ Optimice de forma segura la inyección inversa en la red y evite posibles violaciones.
Compañía 14	Tecnología 14	OCD D&O DER CA	✓ Reduce el costo de integración con otros sistemas y preserva la flexibilidad para agregar o intercambiar componentes en el futuro. ✓ Monitoreo y control en tiempo real de bancos de baterías, dispositivos solares fotovoltaicos y/o dispositivos auxiliares dentro de un sistema de control personalizable. ✓ Modos de operación priorizables para casos de uso de potencia real y reactiva, como el suavizado de potencia y la respuesta de frecuencia ✓ Función de control local, remoto y automático junto con un sistema de alarma de tres niveles para garantizar un funcionamiento seguro. ✓ Apoyo de isla para satisfacer las necesidades locales cuando se pierde el servicio de red
Compañía 15	Tecnología 15	P&P DER FLISR FPO VVO GDM OCD D&O DER CA	✓ Permite aplicaciones avanzadas integradas en un solo modelo de red al combinar datos en tiempo real, datos de redes eléctricas y datos de conectividad. ✓ Proporciona aplicaciones automatizadas para reducir las pérdidas, mantener la calidad de la energía, mejorar la confiabilidad y reducir la demanda máxima. ✓ Modelado, supervisión, gestión y control de generación renovable y distribuida, almacenamiento de energía, microrredes y otros tipos de DER. ✓ Proporciona herramientas de simulación y análisis para ayudar a los operadores a evaluar y validar las opciones en función de las condiciones actuales y futuras y tomar mejores decisiones. ✓ Mejor conocimiento de la situación y aplicaciones para responder automáticamente a interrupciones, minimizando los clientes afectados.
Compañía 17	Tecnología 17	FLISR CVR EE FPO VVO GT GDM	✓ La inteligencia situacional proporciona un análisis y una gestión de red eficientes y confiables durante un estado de red que cambia rápidamente. ✓ Administre, controle, visualice, optimice y automatice las redes de distribución desde redes de distribución de energía de todo el estado a toda la ciudad. ✓ Se integra con los sistemas de gestión de energía de microrredes para el control de los recursos energéticos distribuidos o del cliente. ✓ Estandarización con la mayoría de las aplicaciones de la industria y fácil integración con software heredado y de terceros.
Compañía 18	Tecnología 18	P&P DER FLISR CVR EE FPO VVO GT GDM	✓ Mejora de la conciencia situacional, permite una toma de decisiones más rápida e informada ✓ Ahorro de costos logrado a través del monitoreo y control remoto de dispositivos de campo. ✓ Índices de rendimiento mejorados (por ejemplo, SAIDI, SAIFI). ✓ Capacidad para ofrecer garantías de rendimiento a grandes clientes de comercio e industria. ✓ Menos impacto en los clientes debido a cortes más cortos, brindando una experiencia mejorada para el cliente ✓ Mayor transparencia para que los clientes puedan mantenerse informados sobre las interrupciones actuales y futuras.

Tabla 6. (Continuación)

Compañía	Herramienta	Aplicaciones	Beneficios
Compañía 19	Tecnología 19	P&P DER FPO VVO	✓ Vista de red completa para una respuesta rápida a los cambios en la demanda. ✓ Adaptable a los cambios futuros de la red con una mínima participación del proveedor. ✓ Menores costos de producción y consumo de energía gracias a la optimización avanzada ✓ Menos interrupciones y perturbaciones utilizando algoritmos de predicción de carga ✓ Cumplimiento de la normativa de emisiones de gases de efecto invernadero..
Compañía 20	Tecnología 20	P&P DER FLISR CVR FPO VVO OCD	✓ Se necesitan menos recursos en general para administrar las operaciones de restauración al aprovechar operadores DMS / OMS capacitados ✓ Reducción de la duración de las interrupciones ya que el análisis y la priorización de recursos son más precisos y oportunos. ✓ Proceso más eficiente a través de la automatización de la conmutación planificada ✓ Mayor satisfacción del cliente debido al flujo de trabajo integrado que proporciona estimaciones de tiempo de restauración más precisas, más oportunas y acceso inmediato a actualizaciones de estado en tiempo real. ✓ Mejora de la seguridad de los trabajadores, debido a la precisión en tiempo real del modelo y las limitaciones operativas integradas.
Compañía 21	Tecnología 21	GT GDM D&O DER CA	✓ Envíe las solicitudes de DER para energía debido a contingencias o eventos de emergencia. ✓ Aborde los desequilibrios y las fluctuaciones de la red a corto plazo en los niveles de frecuencia con respuesta inmediata a las solicitudes de regulación ascendente y descendente. ✓ Reduzca la demanda en la cartera de DER al responder a una señal de un operador del sistema. ✓ Mitigue los picos de uso, controle la demanda en el sitio del cliente y exporte energía a otros hogares en el mismo alimentador o transformador. ✓ Envíe la energía automáticamente según los umbrales de voltaje programados para cumplir con los requisitos del operador de red. ✓ Almacene el exceso de energía durante el día y repare la carga del cliente por la noche cuando la energía ya no esté produciendo.
Compañía 22	Tecnología 22	P&P DER OCD D&O DER CA	✓ Permite controlar una gran cantidad de activos DER y le ayuda a ejecutar horarios optimizados con exactitud. Teniendo en cuenta las restricciones de los activos. ✓ Permite monitorear una gran cantidad de activos y cerrarlos si es necesario. Por lo tanto, las situaciones críticas de la red se pueden evitar de manera confiable. ✓ Las señales de precio de los intercambios de energía y las señales de control del operador del sistema se procesan como un parámetro central para controlar los procesos y activos industriales. ✓ Puede ajustar la producción de energía, el consumo y los sistemas de almacenamiento según los requisitos de la red y, por lo tanto, lograr una fuente de alimentación estable.
Compañía 23	Tecnología 23	OCD D&O DER CA	✓ Mitiga los desafíos de intermitencia y coordinación mediante la optimización de la combinación energética. ✓ Garantiza la calidad, la energía rentable, independientemente de la mezcla DER o la distribución del sistema ✓ Integre y adáptese fácilmente a agregadores y VPP de terceros ✓ Proporciona una mejor conciencia situacional, visualización y análisis. ✓ Alivia las fluctuaciones, desde el principio. ✓ Asegúrese de que el equipo no funcione más allá de las clasificaciones nominales, maximizando la vida útil del equipo. ✓ Ofrecer a los clientes nuevos servicios de generación de ingresos detrás del medidor.
Compañía 24	Tecnología 24	P&P DER VVO OCD D&O DER CA	✓ Mitigar los desafíos de intermitencia y coordinación mediante la optimización de la combinación energética. ✓ Garantizar la calidad, la energía rentable, independientemente de la mezcla DER o la distribución del sistema ✓ Integre y adáptese fácilmente a agregadores y VPP de terceros ✓ Proporcionar una mejor conciencia situacional, visualización y análisis. ✓ Aliviar las fluctuaciones, desde el principio. ✓ Asegúrese de que el equipo no funcione más allá de las clasificaciones nominales, maximizando la vida útil del equipo

5. CONCLUSIONES

- El sistema eléctrico de potencia se encuentra en una transición energética acelerada; la inclusión masiva de DER, el desarrollo e implementación de nuevas regulaciones, la digitalización de la infraestructura, la inclusión de prosumidores en el sistema y los nuevos modelos de negocios requieren de nuevas herramientas que permitan al operador de red la gestión, operación y control de sus activos de forma segura y confiable.

- Como resultado de la revisión realizada se encontraron una gran variedad de herramientas computacionales que brindan al operador de red la capacidad de administrar y controlar las características técnicas, operativas y económicas de tener una alta penetración de DER, sin embargo al momento de adquirir este tipo de tecnologías, es importante establecer cuál es su finalidad, sus necesidades y especificaciones, pero aún más importante es definir el orden de prioridades que se tienen como empresa de servicios o agregador.

- Determinar cuál es la herramienta más adecuada para la gestión, operación y control de la red, depende de aspectos como: la topología de la red, el ámbito de sus negocios, entre otras finalidades que una empresa prestadora de servicios tiene en el presente y visualiza en su funcionamiento futuro. Estos aspectos definen cuales son las necesidades que tiene la empresa y por consiguiente permite definir la herramienta más acorde para su funcionamiento fundamentado en la prioridad de sus necesidades.

- La caracterización de las herramientas computacionales permite a las empresas de servicios o agregadores tener un panorama general de la capacidad que ofrece cada proveedor. Lo anterior no proporciona total certeza, de si la decisión de implementar este tipo de tecnología fue la correcta o no.

- Al momento de la selección de las herramientas computacionales para gestión de redes eléctricas ante incorporación DER es importante considerar casos anteriores de implementación. Lo anterior permite a las empresas interesadas, tener una visión más amplia del comportamiento de este tipo de tecnologías logrando de esta manera una retroalimentación más clara basada en experiencias vividas por otras empresas.

- En una empresa donde se ha iniciado el proceso de implementación de este tipo de herramientas, se hace necesario definir cuál es la forma en la que la herramienta computacional va a ser puesta a prueba con el fin de determinar si cumple con lo acordado con el proveedor.

- El estudio de los casos encontrados en la literatura posibilita una visión más amplia del funcionamiento de una herramienta en un caso real, permitiendo contrastar las características y beneficios ofrecidos por cada proveedor.

- Los proveedores de este tipo de tecnologías entregan una información muy limitada, debido a que se enfrentan a un mercado que está variando constantemente y donde aspectos como las acciones en bolsa de valores, el poder de permanencia en el mercado, los contratos de confidencialidad dificultan el definir unas desventajas claras ya que el proveedor se ve expuesto ante su competencia inmediata y un probable decremento del valor de sus acciones ante una información inadecuada.

- Las empresas interesadas en este tipo de tecnologías, durante su selección e implementación, se encuentran con un gran número de dificultades que cobran importancia en la medida que la herramienta computacional es puesta a prueba por cada empresa y que permite inferir que en muchos casos los proveedores no están en la capacidad de cumplir con todas las características y beneficios ofrecidos, por lo que el cliente debe adaptarse a las limitaciones presentadas por la herramienta.

- Hoy en día este tipo de herramientas computacionales no tiene el total cubrimiento de los recursos energéticos distribuidos (DER), y su gestión, operación y control es enfocada a aspectos puntuales de cada elemento que compone el concepto de DER. Lo anterior evidencia la importancia de que este tipo de herramientas sean capaces de integrarse con otras y sean capaces de tener un funcionamiento complementario que permita el control de los activos de forma confiable y segura.

- La inclusión de herramientas computacionales en Colombia presenta un gran avance, las empresas prestadoras del servicio en el sector se encuentran en el proceso de selección e implementación de este tipo de tecnologías con el objetivo de gestionar, operar y controlar de forma más eficiente, económica, segura y sostenible sus activos.

6. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Para posibles trabajos futuros alrededor del tema, se realizan las siguientes observaciones y sugerencias:

- Como caso de estudio, realizar una comparativa de las herramientas que han sido utilizadas en el funcionamiento de la red tradicional y las herramientas de gestión inteligente que permita determinar si su funcionamiento es o no es complementario.

- Realizar un análisis técnico-económico sobre los beneficios que conlleva a una empresa la implementación de herramientas computacionales para la gestión, operación y control de sus activos.

- Realiza la evaluación de las diferentes tecnologías definidas en este trabajo de grado, considerando alguna de las metodologías propuestas por las empresas en investigación consultadas.

- Establecer una guía básica que defina los aspectos más relevantes para la selección e implementación de herramientas computacionales.

- Realizar una investigación sobre cuáles son las herramientas más utilizadas por cada operador de red, considerando la región, topología de red y su modelo de negocios.

- Basado en casos de implementación realizar una comparativa del funcionamiento de las herramientas computacionales que poseen una interfaz única con aquellas que necesitan de otras interfaces para su funcionamiento.

REFERENCIAS

[1] L. Lopez, A. Delgadillo, F. Sanchez, and M. Martinez, “Modelado de sistema de gestión de distribución de energía eléctrica aplicado al análisis de generación no convencional,” vol. 1109, 2017.

[2] D. Ghenno, “INTEGRACIÓN Y GESTIÓN DE RECURSOS DISTRIBUIDOS DE ENERGÍA ELÉCTRICA A TRAVÉS DE REDES INTELIGENTES,” 2013.

[3] R. Poudineh, D. Peng, and S. R. Mirnezami, *Electricity Networks: Technology, Future Role and*, no. December. 2017.

[4] S. Lopez Larroque, “Influencia de recursos de energía distribuidos y flexibilidad de la demanda en redes de distribución de MT,” 2017.

[5] N. Bolaño and J. Romero, “Análisis de la cadena de abastecimiento de la energía eléctrica en Colombia,” 2015.

[6] W. Stevenson, “Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia, 2da ed. México D.F: McGraw-Hill.” 2001.

[7] F. F. Wu and K. Moslehi, “Power System Control Centers : Past , Present ,” vol. 93, no. 11, 2005.

[8] T. Taylor and M. Ohrn, “Gestión de redes para la red de distribución,” pp. 45–49, 2009.

[9] R. Jos, “Modelo para asistencia en la toma de decisiones en la operación de centros de control ante eventos sobre una red eléctrica .,” 2016.

[10] L. Lebrato and A. Rom, “Aplicación práctica a un centro de operación de red,” vol. 2, pp. 39–48, 2015.

[11] P. Pathak, “Smart Grid Distribution Control Center and Operations | Energy Central.” [Online]. Available: https://www.energycentral.com/c/tr/smart-grid-distribution-control-center-and-operations. [Accessed: 24-Mar-2019].

[12] L. A. Arias and E. Rivas, “Propuesta de modelo de Gestión para redes eléctricas con Generación Distribuida a través de Unidades de Medición Fasorial Proposal of a management model for electrical networks with distributed generation using Phasor Measurement Units,” *Inf. tecnol.*, vol. 28, no. 2, pp. 15–28, 2017.

[13] R. F. Manrique, “‘Soluciones inteligentes, claves para gestión de los sistemas eléctricos de potencia modernos’.,” 2017.

[14] J. C. López Vázquez, “Estudio De La Situación Actual De Las Smart Grids,” 2016.

[15] L. Arias, D. García, and E. Rivas, “Management model of distribution networks through UML and BPL,” *Rev. Tecnura*, vol. 37, pp. 109–120, 2013.

[16] V. A. Gómez, C. Hernández, and E. Rivas, “Visión General, Características y Funcionalidades de la Red Eléctrica Inteligente (Smart Grid),” *Inf. tecnológica*, vol. 29, no. 2, pp. 89–102, 2018.

[17] M. I. Carvajal Correa, “METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD

TÉCNICA EN LA INSTALACIÓN DE MIRCRO REDES," 2018.

[18] E. Velasco-Ramírez, C. Ángeles-Camacho, and M. García-Martínez, "Redes de transmisión inteligente. Beneficios y riesgos," *Ing. Investig. y Tecnol.*, vol. 14, no. 1, pp. 81–88, 2015.

[19] C. Díaz and J. C. Hernández, "Smart Grid: Las TICs y la modernización de las redes de energía eléctrica-Estado del Arte," *S&T*, vol. 9, no. 18, pp. 53–81, 2011.

[20] L. de la R. Javier, "Estudio sobre el estado actual de las Smart Grids," *Univ. Carlos III Madrid*, 2011.

[21] Fraunhofer Chile Research and Fraunhofer Fokus-Innocity, "Investigación, Desarrollo Y Aplicación De Redes Inteligentes De Energía (Smart Grid): Proyecto Smartcity Santiago," pp. 1–121, 2014.

[22] G. J. Martín Chicharro, "Sistemas De Almacenamiento De Energía," *Presentation*, pp. 1–133, 2016.

[23] W. M. Giral-Ramírez, H. J. Celedón-Flórez, E. Galvis-Restrepo, and A. T. Zona-Ortiz, "Redes inteligentes en el sistema eléctrico colombiano: Revisión de tema Smart grids in the colombian electric system: Current situation and potential opportunities," *Bogotá July*, vol. 21, no. 53, 2017.

[24] I. G. Cruz, "Smart Grids Colombia Visión 2030. Parte I," *Bhagavad Gita el mundo es Teatr.*, pp. 57–68, 2019.

[25] Y. Dufay and B. Ramirez, "Metodología de diseño conceptual de la automatización de red de distribución de energía que permita la integración de recursos energéticos distribuidos (DER) e implementación de estrategias de gestión de demanda (DSM) Metodología de diseño conceptual ," 2017.

[26] A. Espinosa Reza, S. G. Castro, Y. Benjamín, and S. Rodríguez, "Divulgación Automatización de la distribución: presente y futuro Automatización de la distribución: presente y futuro Automatización de la distribución: presente y futuro," 2010.

[27] P. Salas and A. Carrasco, *AGREGACIÓN DE Recursos Energéticos Distribuidos (DER) OBSSTACULOS Y RECOMENDACIONES PARA UN DESARROLLO ÍNTEGRO DEL MERCADO*. 2017.

[28] Gridworks, GridLAB, and Utah Clean Energy, "The Role of Distributed Energy Resources in Today'S Grid Transition," 2018.

[29] EPE, "Distributed Energy Resources: Impacts on Energy Planning Studies," no. July, p. 18, 2018.

[30] T. Deora and L. Frantzis, "Recursos de energía distribuidos 101: lectura requerida para una red moderna | SEPA." [Online]. Available: https://sepapower.org/knowledge/distributed-energy-resources-101-required-reading-modern-grid/. [Accessed: 25-Jun-2019].

[31] T. Considerations, "Distributed Energy Resources Technical Considerations for the Bulk Power System," no. February, pp. 0–46, 2018.

[32] E. F. Duran Contreras, “La Generación Distribuida Y Sus Retos Frente Al Nuevo Marco Legal Del Mercado Eléctrico Ecuatoriano,” pp. 0–1, 2014.

[33] J. R. Morante, “El almacenamiento de electricidad - Fundación Gas Natural Fenosa,” pp. 1–9, 2014.

[34] Accenture, “The future of demand response in electricity distribution,” p. 12, 2016.

[35] J. C. Amatti and E. Florena, “Nuevo enfoque de la gestión de la red de distribución de energía eléctrica,” pp. 1–6, 2014.

[36] B. M. Quintana, “Estado Del Arte De Las Redes Inteligentes ‘Smart Grid,’” 2012.

[37] P. Pérez, “Descripción e infraestructura de una microrred para un entorno residencial,” p. 97, 2017.

[38] C. A. Ahumada S, “DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE CONTROL PREDICTIVAS PARA MICROREDES MEDIANTE CURVAS DE ESTATISMO,” vol. 84, pp. 487–492, 2013.

[39] C. A. Prieto S and J. D. Peña A, “Diseño y Simulación de las Diferentes Etapas de Control en una Micro red Eléctrica,” 2018.

[40] E. M. Stewart, S. Kiliccote, and C. McParland, “Software-Based Challenges of Developing the Future Distribution Grid,” *Lawrence Berkeley Natl. Lab.*, no. LBNL 6708E, pp. 1–62, 2014.

[41] M.-A. Moffet and F. Sirois, “REVIEW OF OPEN SOURCE CODE POWER GRID SIMULATION TOOLS FOR LONG-TERM PARAMETRIC SIMULATIONS,” *Http://Opends.Eu/*, p. http://opends.eu/, 2014.

[42] R. R. Labastida, P. Asmus, and B. Feldman, “Distributed Energy Resources Management Systems | Defining DERMS Use Cases and Value Propositions,” 2018.

[43] M. Lawrence and E. Woods, “The Energy Cloud Emerging Opportunities on the Decentralized Grid,” 2015.

[44] J. Fernández Gómez and J. Menéndez Sánchez, “LAS REDES INTELIGENTES Y EL PAPEL DEL DISTRIBUIDOR DE ENERGÍA ELÉCTRICA,” 2019.

[45] E. Woods, M. Volkerts, and M. Lawrence, “Navigating the Urban Energy Transformation,” 2017.

[46] (NationalGrid), “Future of Electricity Transmission,” no. July, 2018.

[47] IRENA, *Accelerating the Energy Transition through Innovation About IRENA*, no. June. 2017.

[48] International Renewable Energy Agency (IRENA), *Innovation Landscape for a Renewable-Powered Future: Solutions to Integrate Variable Renewables*. 2019.

[49] I. Renewable and E. Agency, “SOLUTIONS TO INTEGRATE HIGH SHARES OF VARIABLE RENEWABLE ENERGY,” no. June, 2019.

[50] Siemens AG, “Pioneering a new era – A guide to mastering disruptive change in the

energy world," 2017.

[51] Schneider Electric, "Schneider Electric Leadership Series: Digital Grid Unleashed," 2018.

[52] J. V. Mackinnon Lawrence, "ENERGY CLOUD 4.0 CAPTURING BUSINESS VALUE THROUGH DISRUPTIVE ENERGY PLATFORMS," *Navig. Res.*, p. 48, 2018.

[53] C. Martin, F. Starace, and J. P. Tricoire, "The Future of Electricity New Technologies Transforming the Grid Edge," *World Econ. Forum*, no. March, p. 32, 2017.

[54] National Association of Regulatory Utility Commissioners, "Distributed Energy Resources Rate Design and Compensation," no. November, p. 180, 2016.

[55] B. Owens, "The Digital Energy Transformation," *Ge Power*, 2018.

[56] I. (OATI) Open Access Technology International, "Sistema de Gestión de Recursos Energéticos Distribuidos | DERMS | OATI." [Online]. Available: https://www.oati.com/Solution/Smart-Energy/distributed-energy-resource-management. [Accessed: 02-Jul-2019].

[57] Enbala, "It's a Distributed Energy World," 2019.

[58] MARKETSANDMARKETS, "ADVANCED DISTRIBUTION MANAGEMENT SYSTEM GLOBAL FORECAST TO 2021," 2016.

[59] MARKETSANDMARKETS, "Advanced distribution management system - global forecast to 2021," pp. 1–25, 2016.

[60] O. of E. D. & E. R. US Department of Energy (DOE), "Insights Into Advanced Distribution Management Systems," 2015.

[61] F. Sissine, "DOE's office of electricity delivery and energy reliability (OE): A primer, with appropriations for FY2016," *Electr. Deliv. Secur. Fed. Overs. Act. Funding*, pp. 1–30, 2016.

[62] C. T. O. (Capgemini), "Advanced Distribution Management Systems," 2012.

[63] U. S. D. of E. (DOE), "MODERN DISTRIBUTION GRID Volume II : Advanced Technology Maturity Assessment," vol. II, 2017.

[64] R. R. Labastida and M. Kelly, "Navigant Research Leaderboard : DERMS Vendors Assessment of Strategy and Execution for 16 DERMS for DER and Grid Management Providers," 2019.

[65] P. Asmus, "VPPs and DERMSs : Different Sides to the Same," 2018.

[66] MARKETSANDMARKETS, "Distributes Energy Resource Management System market - Global Forecast to 2020," pp. 1–24, 2017.

[67] Enbala, "THE 21st CENTURY SMART GRID: Not Your Parents' Power Grid."

[68] TechNavio, "Sample - Global Advanced Distribution Management System Market 2015-2019," 2014.

[69] gtmresearch, "European Utility Week 2017|Partner Country in Focus: United States,"

no. October, 2017.

[70] The Insight Partners, “Advanced Distributed Management System (ADMS) Market,” no. April, 2018.

[71] S. Industry, “Spectrum Power ™ ADMS The platform to meet your future distribuition operation needs,” 2017.

[72] S. Industry, “EnergyIP DEMS Demand Response and Virtual Power Plant Overview,” 2018.

[73] I. Siemens Industry, “Grid Management of the Future With siemens DERMS Solution,” 2019.

[74] Enbala, “Find the Energy Balance Within reside powerful assets,” 2017.

[75] P. Asmus, “Stacking Value with Virtual Power Plants in Today ’ s Digital Power Grid | Moving Distributed Networked Energy into the Mainstream,” 2017.

[76] P. y T. I. (PTI), “Informe DERMS.” .

[77] I. AutoGrid Systems, “AutoGrid Flex | AutoGrid.” [Online]. Available: https://www.auto-grid.com/platform/autogrid-flex/. [Accessed: 02-Jul-2019].

[78] Opus One Solution, “Connecting the Distributed Energy Network with Software Intelligence,” 2017.

[79] I. Stefani and L. Strezoski, “Advanced Distribution Management Systems : The Foundation of Distribution System Operations,” 2018.

[80] General Electric, “GE Power | General Electric.” [Online]. Available: https://www.ge.com/power. [Accessed: 02-Jul-2019].

[81] General Electric, “PowerOn ™ Advantage|Advanced Distribution Management System (ADMS),” 2015.

[82] B. Seal, “Distributed Energy Resource Management Systems (DERMS),” 2018.

[83] Spirae, “Wave® DERMS - Explore las soluciones de energía distribuida | Spirae, LLC.” [Online]. Available: https://www.spirae.com/introducing-wave-derms/. [Accessed: 02-Jul-2019].

[84] Smarter Grid Solutions, “DERMS software for utilities and asset owners and operators | Smarter Grid Solutions.” [Online]. Available: https://www.smartergridsolutions.com/. [Accessed: 02-Jul-2019].

[85] Smarter Grid Solutions and Enzen, “Active Network Management,” pp. 40–64, 2017.

[86] Itron, “Itron Home.” [Online]. Available: https://www.itron.com/na/. [Accessed: 02-Jul-2019].

[87] Itron, “IntelliSOURCE Enterprise,” 2017.

[88] EnergyHub, “An enterprise DERMS built for the grid edge.” [Online]. Available: https://www.energyhub.com/platform. [Accessed: 02-Jul-2019].

[89] ABB, “ABB ABILITY.” [Online]. Available: https://new.abb.com/abb-ability. [Accessed: 02-Jul-2019].

[90] I. (OATI) Open Access Technology International, “Soluciones de energía inteligente | OATI.” [Online]. Available: https://www.oati.com/solutions/smart-energy. [Accessed: 02-Jul-2019].

[91] I. Advanced Control Systems, “ACS Power | Sistemas de control avanzado.” [Online]. Available: https://www.acspower.com/. [Accessed: 03-Jul-2019].

[92] A. Advanced Control Systems, “PRIMS Advanced distribution management system,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 4, pp. 2109–2117, 2013.

[93] I. Advanced Control Systems, “PRISM Renewables Suite,” 2019.

[94] Doosan Corporation, “Grupo Doosan | Corporación Doosan.” [Online]. Available: http://www.doosan.com/en/. [Accessed: 03-Jul-2019].

[95] I. Open Systems International, “Soluciones - Iniciativas - DERMS.” [Online]. Available: https://www.osii.com/solutions/products/derms.asp. [Accessed: 03-Jul-2019].

[96] Energy Pool, “Energy Pool - Smart Energy Management.” [Online]. Available: https://www.energy-pool.eu/en/. [Accessed: 03-Jul-2019].

[97] I. Operation Technology, “ETAP | Electrical Power System Analysis Software | Power Management System.” [Online]. Available: https://etap.com/. [Accessed: 10-Jul-2019].

[98] I. Operation Technology, “ETAP|Real-Time,” 2011.

[99] I. ETAP / Operation Technology, “Advanced Distribution Management System (ADMS),” pp. 1–20, 2017.

[100] Survalent Technology Corporation, “Survalente | Sistemas de gestión de distribución avanzada (ADMS) - SCADA, OMS y DMS.” [Online]. Available: https://www.survalent.com/. [Accessed: 10-Jul-2019].

[101] mPrest, “mDERMS Application,” 2017.

[102] mPrest, “Respuesta a la demanda y sistema de gestión de DER (DERMS).” [Online]. Available: https://www.mprest.com/products/distributed-energy-management. [Accessed: 03-Jul-2019].

[103] Oracle, “Modernize Distribution Grid Performance All the Way,” no. January, pp. 2016–2017, 2017.

[104] Oracle Corporation, “Advanced Distribution Management,” vol. 8005, no. August, pp. 1–8, 2011.

[105] Oracle, “ADMS & DERMS with Oracle Utilities Network Management System,” pp. 1–2, 2019.

[106] Sunverge Energy Inc., “Grid Services - Sunverge.” [Online]. Available: http://www.sunverge.com/grid-services/. [Accessed: 10-Jul-2019].

[107] S. E. Inc., “The Sunverge Energy Platform.”

[108] Next Kraftwerke, “Central Eléctrica Virtual | Power Trader | Agregador.” [Online]. Available: https://www.next-kraftwerke.com/. [Accessed: 10-Jul-2019].

[109] Blue Pillar, “Aurora Energy Network of Things Platform | Blue Pillar.” [Online]. Available: http://www.bluepillar.com/aurora-energy-network-of-things-platform. [Accessed: 10-Jul-2019].

[110] L. PXiSE Energy Solutions, “Horizon Power Case Study|Turning remote communities into renewable powerhouses.”

[111] L. PXiSE Energy Solutions, “Soluciones de energía PXiSE | Una alternativa innovadora y efectiva al control de red tradicional.” [Online]. Available: http://www.pxise.com/. [Accessed: 14-Aug-2019].

[112] C. de. Redacción., “¿Qué es Referencia? » Su Definición y Significado [2019],” 2019. [Online]. Available: https://conceptodefinicion.de/referencia/. [Accessed: 30-Nov-2019].

[113] N. A. Zapata Ruiz, “Caracterización y evaluación de plataformas transaccionales inteligentes para la implementación de Redes Eléctricas Inteligentes en Colombia,” p. 86, 2013.

[114] The Edison Foundation|Institute for Electric Innovation, “INNOVATIONS ACROSS THE GRID Partnerships Transforming The Power Sector,” p. December, 2013.

[115] ENBALA Power Networks, “Providing Wind Integration through Intelligent Load Management,” no. February 2019, pp. 1–13, 2020.

[116] The Edison Foundation|Institute for Electric Innovation, “INNOVATIONS ACROSS THE GRID Partnerships Transforming The Power Sector,” vol. II, 2014.

[117] Ausgrid, “Ausgrid’s Regulatory Proposal – Attachment 5.13.N – Advanced Distribution Management System,” no. January, pp. 1–25, 2019.

ANEXOS

ANEXO 1

A continuación, se presentan en detalle la definición de los criterios seleccionados por Navigant Research [26], para determinar las compañías a la vanguardia en la creación de DERMS.

1.1 ESTRATEGIA

- **Visión:** Mide los objetivos declarados de la compañía al diseñar soluciones de mercado en función de las necesidades reales de los clientes en función del entorno en el que operarán. Las visiones claras y convincentes que se comunican eficazmente a la industria dan como resultado puntuaciones más altas.
- **Estrategia de comercialización:** evalúa la estrategia de la compañía para llegar al mercado objetivo, incluidos los canales de ventas y marketing que se utilizarán y los procesos establecidos para informar al mercado objetivo sobre la diferenciación de marca y el valor único del producto.
- **Socios:** mide las alianzas establecidas de la compañía con organizaciones clave que brindarán una ventaja en el respaldo financiero, ventas, negocios y desarrollo de productos. Las afiliaciones con conocidos proveedores de tecnología DER, empresas de servicios públicos u operadores de red y otros proveedores establecidos en la cadena de suministro, así como un historial de solidez financiera a través de la recaudación de fondos o las ventas de productos rentables afectan positivamente las puntuaciones en esta tabla de clasificación de investigación de los navegantes.
- **Estrategia de integración de productos:** evalúa el estado de la integración de diversos productos y servicios de software en una solución directamente relacionada con el éxito comercial.
- **Tecnología:** evalúa si la compañía ha desarrollado y/o patentado una oferta de software que proporciona una ventaja comercial significativa sobre los competidores que probablemente tenga un impacto duradero en su éxito. Se obtienen puntuaciones más altas si la tecnología de la compañía ya es un éxito comprobado en el mercado u ofrece atributos de productos únicos.
- **Alcance geográfico:** una evaluación de la capacidad de la compañía para llegar a clientes nacionales e internacionales a través de redes de distribuidores y revendedores. Las puntuaciones son más bajas si la empresa no tiene una estrategia de ventas adecuada para las ventas en múltiples regiones.

1.1. EJECUCIÓN

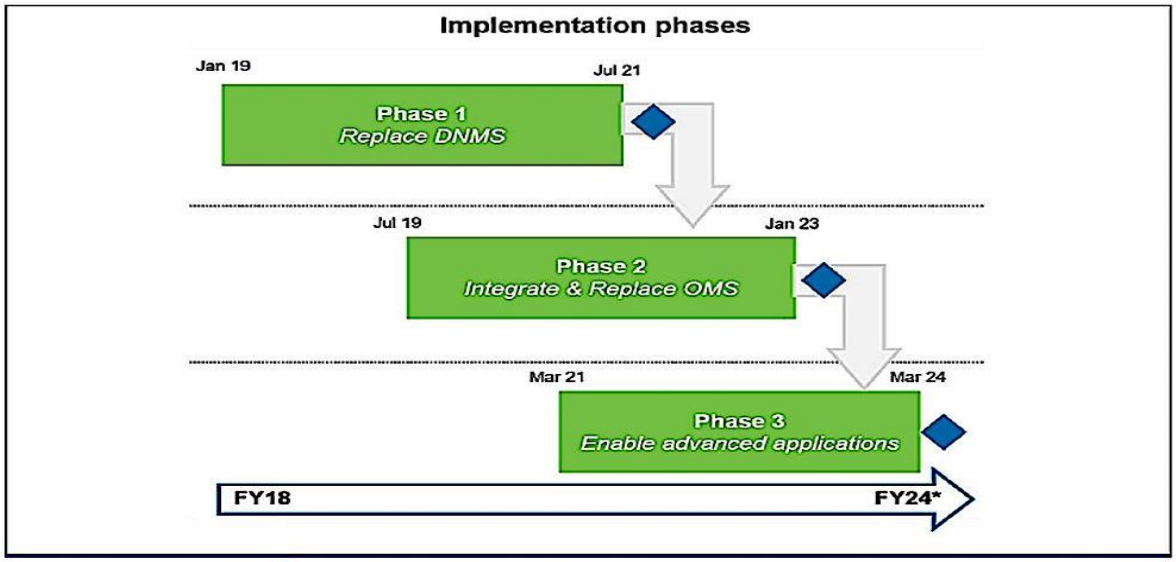
- **Ventas, marketing y distribución:** evalúa el desempeño de marketing y ventas de la empresa y el canal de distribución actual. Los puntajes más altos se otorgan a las compañías con una gran red de ventas global con acceso y soporte para los productos actuales.
- **Rendimiento del producto:** evalúa el rendimiento competitivo de los productos de software de la empresa en relación con los DERMS. Se otorgan puntuaciones más altas a las empresas cuyos productos se han implementado con éxito en proyectos complejos de integración de DER a la red y se han validado para proporcionar flujos de valor consistentes a empresas de servicios públicos y operadores de red.
- **Calidad y confiabilidad del producto:** evalúa la calidad y confiabilidad del software de la compañía según lo informado por otros proveedores y/o clientes entregados a los clientes. Rating incorpora la estrategia de la compañía para desarrollar productos de calidad para el mercado y su historial de calidad con la línea de productos actual.
- **Cartera de productos y ecosistema:** aborda la cartera de DERMS de la compañía con un enfoque en la integración de DER a la red. Las empresas ocupan un lugar más alto en función de la diversidad de tipos de DER gestionados, tipos de clientes cubiertos (agregadores, servicios públicos integrados verticalmente, operadores de sistemas de distribución, proveedores de energía). El factor más importante es el tamaño de la cartera actual de una empresa, reconociendo el tamaño de la cartera de proyectos informada en términos de capacidad de VPP.
- **Fijación de precios:** determina la idoneidad de los precios de los productos de software de la empresa según su conjunto de características, incluido si los productos están disponibles a precios múltiples y cómo los precios se comparan con los de los productos de la competencia. No se consideran opciones de reducción de dinero, ahorros compartidos y otras innovaciones.
- **Poder de permanencia:** evalúa si la empresa tiene los recursos financieros para soportar mercados débiles o variables y asaltos basados en precios por parte de los competidores. También mide la probabilidad de que la compañía continúe buscando productos en caso de que el mercado se debilite. Se otorgan puntajes más altos a las empresas con mejor desempeño financiero y mayor capacidad para sobrevivir a las recesiones del mercado.

ANEXO 2

Ausgrid: Plan de implementación de ADMS [117]

La implementación de ADMS se ha planificado junto con el proveedor preferido para reducir la complejidad de ejecución y, por lo tanto, el riesgo de entrega. Se han identificado tres fases de trabajo, con los objetivos de alto nivel de cada fase descritos en la a continuación.

Tabla 7. Descripción de las fases del proyecto ADMS



Fases	Descripción y resultados clave
1	Reemplazo de DNMS: • Brindar funcionalidad básica de monitoreo y control de misión crítica (SCADA) • Gestión de conmutación y procesos de planificación de conmutación digitalizados y automatizados en ADMS • Redacción digital y ejecución de instrucciones de cambio. • Análisis de seguridad de red Sub / T (potencialmente Fase 2)
2	Reemplazo del Sistema de Gestión de Interrupciones (OMS) y sistemas satelitales con análisis de carga: • Digitalización del proceso de solicitud de acceso a la red. • Gestión de interrupciones totalmente integrada • Comunicaciones no verbales entre la sala de control y los operadores de campo. • ADMS que permite la detección automática de incumplimiento del Marco Nacional de Clientes de Energía (NECF)
3	Habilitación de la capacidad de aplicaciones avanzadas: • Detección automática de fallas y restauración de aislamiento y aplicaciones avanzadas para mejorar la optimización de la red, p. Distribución Gestión de recursos energéticos, cargas dinámicas y habilitaciones habilitadas • Aplicaciones avanzadas para mejorar la optimización de la red. • Entorno de entrenamiento mejorado (simulador de entrenamiento) establecido • Alineación del sistema con la hoja de ruta de referencia del proveedor, incluidas las mejoras específicas de Ausgrid de las Fases 1 y 2 implementadas en el producto ADMS de referencia.

El programa ADMS ha llevado a cabo una fase detallada previa a la implementación que ha considerado la preparación completa del programa, la preparación de integración técnica y comercial, incluidas las actividades de integridad de datos, alineación y remediación; y un proceso completo de adquisición de selección de proveedores y actividades apropiadas de debida diligencia. Este enfoque se tomó para mitigar el potencial de una implementación mal entendida y planificada a partir de una planificación temprana insuficiente. Se realizó una evaluación de riesgos y complejidad con los resultados incluidos en la actividad general de gestión de riesgos para la implementación.

Como parte de la planificación previa a la implementación del proyecto ADMS, se han realizado trabajos exhaustivos de diligencia debida en las siguientes áreas clave:

- Revisión de probidad de adquisiciones externas.
- Revisión de la arquitectura de seguridad.
- Asesoramiento legal externo sobre el contrato del proveedor ADMS.
- Revisión externa del caso de negocios ADMS realizado por Ernst & Young.
- Compromiso detallado con agencias relevantes de la Commonwealth.

Durante los compromisos detallados con los departamentos relevantes de la Commonwealth, la Commonwealth ha manifestado su apoyo a la implementación nacional completa del ADMS para brindar mejores resultados de seguridad, así como una prestación más efectiva de los servicios.

Dadas las Condiciones de Licencia de Infraestructura Crítica de Ausgrid y la colocación en el registro de los Activos de Infraestructura Crítica de Australia, se requiere garantizar que sus obligaciones de seguridad de datos se cumplan en línea con las discusiones con los Departamentos de la Commonwealth relevantes. Esta es una obligación duradera que Ausgrid debe cumplir tanto durante la implementación del sistema ADMS como durante su soporte y mantenimiento continuos.