



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DEL IMPACTO EN LA
IMPLEMENTACIÓN DE UN DESPACHO ÓPTIMO DE LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA
RENOVABLE, EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN DEORSA**

Erick Steven Lool Rodríguez

Asesorado por la M.A. Inga. Ana Lucía Martínez Arriola

Guatemala, febrero de 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DEL IMPACTO EN LA
IMPLEMENTACIÓN DE UN DESPACHO ÓPTIMO DE LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA
RENOVABLE, EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE ORSA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ERICK STEVEN LOOL RODRÍGUEZ

ASESORADO POR LA M.A. INGA. ANA LUCÍA MARTÍNEZ ARRIOLA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, FEBRERO DE 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martinez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADORA	Ing. José Guillermo Bedoya Barrios
EXAMINADOR	Ing. Endor Steve Ortíz del Cid
EXAMINADOR	Ing. Helmunt Federico Chicol Cabrera
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DEL IMPACTO EN LA
IMPLEMENTACIÓN DE UN DESPACHO ÓPTIMO DE LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA
RENOVABLE, EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN DEORSA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Posgrado, con fecha 07 de noviembre de 2022.

Erick Steven Lool Rodríguez



EEPFI-PP-1618-2022

Guatemala, 7 de noviembre de 2022

Director
Armando Alonso Rivera Carrillo
Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica
Presente.

Estimado Ing. Rivera

Reciba un cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería.

El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado y aprobado el Diseño de Investigación titulado: **16.00 NORMAL 0 FALSE FALSE FALSE ES GT X NONE X NONE DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DEL IMPACTO EN LA IMPLEMENTACIÓN DE UN DESPACHO ÓPTIMO DE LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA RENOVABLE EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN DEORSA**, el cual se enmarca en la línea de investigación: **Todas las áreas - Proyectos de generación, distribución y comercialización de energía eléctrica en un mercado eléctrico regulado**, presentado por el estudiante **Erick Steven Lool Rodríguez** carné número **201612164**, quien optó por la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la Maestría en ARTES en Gestion De Mercados Electricos Regulados.

Y habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Décimo, Inciso 10.2 del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

Mtra. Ana Lucía Martínez Arriola
Asesor(a)

Ingen. Ana Lucía Martínez Arriola
Maestra en Gestión de Mercados
Eléctricos Regulados
Col. 15072

Mtro. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador(a) de Maestría



Mtro. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería





EEP-EIME-1384-2022

El Director de la Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica de la Facultad de Ingenieria de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador y Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, del Diseño de Investigación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DEL IMPACTO EN LA IMPLEMENTACIÓN DE UN DESPACHO ÓPTIMO DE LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA RENOVABLE EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN DEORSA**, presentado por el estudiante universitario **Erick Steven Lool Rodríguez**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingenieria en esta modalidad.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Amando Alonso Rivera Carrillo
Director
Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica

Guatemala, noviembre de 2022

LNG.DECANATO.OI.207.2023

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DEL IMPACTO EN LA IMPLEMENTACIÓN DE UN DESPACHO ÓPTIMO DE LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA RENOVABLE, EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE ORSA**, presentado por: **Erick Steven Lool Rodríguez**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, febrero de 2023

AACE/gaac

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por haberme permitido realizar una más de mis metas.
- Mis padres** Melanie Rodríguez y Edin Domingo Lool, por apoyarme siempre y amarme incondicionalmente; estaré siempre agradecido por sus sacrificios y por vivir mis logros como si fueran suyos.
- Mis hermanos** Allan Mauricio y Eddy Alexander Lool Rodríguez, por su apoyo, amor y compañía durante mi vida, quienes la han hecho más alegre.
- Mi abuelita** Julia Romelia Cuc (q. d. e. p.), por acompañarme en el transcurso de mi vida y su amor, a quien dedico este logro por sus sabias enseñanzas y consejos que me ayudaron a luchar por mis sueños.
- Familia Borrayo Ruiz** Xiomara Ruiz, Felipe, Jennifer y Xiomara Borrayo, por su apoyo incondicional a lo largo de mi carrera.

Mi novia

Glenda Azucena Borrayo, por su importante apoyo durante mi vida y carrera profesional, por creer en mí, por ser mi inspiración y amiga, por brindarme felicidad y amor incondicional que me impulsó a ser mejor cada día.

Mis tías

Julia Anabela y Marina Lool, por su apoyo incondicional a lo largo de toda mi vida.

Mi familia

Por compartir este triunfo conmigo, por su apoyo incondicional en el transcurso de toda mi vida.

Mis primos

Por ser como mis hermanos, por su cariño y compañía durante mi vida.

Mis amigos

José Díaz, Marcos Castellanos, Josué Juárez, Jeancarlos Roca, Mario Monzón, Christian de la Cruz, Alexander Menéndez, Kevin Duarte, Brandon Portillo, Marco Chew, Alejandro Castañeda, Erick Mendoza, Heather Salamanca, Jairo García, Sofía Chajón y Andrés Alfaro, por estar conmigo en diferentes etapas de mi vida, hacer de ella algo memorable, por su apoyo incondicional y cariño.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por abrirme las puertas, ser mi casa de estudios, por formarme a nivel académico y darme las herramientas necesarias para desenvolverme profesionalmente.
Facultad de Ingeniería	Por darme la oportunidad de conocer personas únicas, aprender y desenvolverme en el ámbito profesional como ingeniero.
Escuela de Estudios de Postgrado	Por darme la oportunidad de seguir creciendo intelectualmente y desenvolverme al lado de grandes profesionales.
Ing. Alex Girón	Gracias por compartir sus conocimientos que han sido valiosos, por la sugerencia, apoyo y ayuda para la elaboración de la presente investigación.
Mi asesora	Inga. Ana Lucía Martínez: gracias por asesorar y brindar el apoyo en este proceso.
Mis amigos	Del colegio, la licenciatura y la maestría: por su compañía y ayuda en el transcurso de estos años.

**Departamento de
Matemática**

Por abrirme las puertas para laborar mientras me seguía formando para ser un profesional.

ENERGUATE

Por permitirme iniciar mi carrera profesional, además de darme la oportunidad de conocer a grandes profesionales, como también brindarme los insumos para el desarrollo de esta investigación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	5
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
3.1. Contexto general	9
3.2. Descripción del problema	9
3.3. Formulación del problema	11
3.3.1. Pregunta principal.....	11
3.3.2. Preguntas auxiliares	11
3.4. Delimitación del problema	12
3.4.1. Delimitación contextual.....	13
3.4.2. Delimitación geográfica	13
3.4.3. Delimitación histórica.....	13
4. JUSTIFICACIÓN	15
5. OBJETIVOS	17
5.1. General.....	17
5.2. Específicos	17

6.	NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN	19
7.	MARCO TEÓRICO	21
7.1.	Fuentes de energía eléctrica	21
7.1.1.	Tipos de fuentes de energía	22
7.1.1.1.	Fuentes de energía renovable	23
7.1.1.2.	Fuentes de energía no renovables	25
7.2.	Generadores Distribuidos Renovables	25
7.2.1.	Clasificación de Generadores Distribuidos Renovables	27
7.2.1.1.	Generadores despachables	27
7.2.1.2.	Generadores no despachables	27
7.3.	Ventajas de la generación distribuida	28
7.3.1.	Beneficios económicos	28
7.3.1.1.	Limitación de costos de construcción o expansión de líneas de transporte	29
7.3.1.2.	Mejorar estabilidad energética y resiliencia de los sistemas y actividades económicas	29
7.3.2.	Beneficios medioambientales	30
7.3.2.1.	Disminución de dispersión de partículas contaminantes	30
7.3.2.2.	Incremento de la cobertura eléctrica	31
7.3.2.3.	Confiabilidad del sistema debido a cortes de energía	31
7.3.3.	Beneficios técnicos	32
7.3.3.1.	Disminución de las pérdidas técnicas	32
7.3.3.2.	Control voltaje-potencia para calidad de suministro	32

7.4.	Despacho en sistemas eléctricos	33
7.4.1.	Despacho a redes de distribución con fuentes de energía convencionales	33
7.4.2.	Despacho con generación distribuida	34
7.5.	Gestión de despacho en sistemas eléctricos.....	36
7.5.1.	Sistema SCADA	36
7.5.2.	PMU.....	38
7.5.3.	UML	39
7.6.	Simulación de redes de distribución con uso del <i>software</i> NEPLAN	40
7.6.1.	Simulación de redes de distribución	40
8.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS	43
9.	METODOLOGÍA.....	47
9.1.	Características del estudio	47
9.1.1.	Diseño	47
9.1.2.	Enfoque	48
9.1.3.	Alcance.....	48
9.2.	Unidades de análisis	49
9.3.	Variables.....	49
9.4.	Fases del estudio	51
9.4.1.	Fase uno: revisión bibliográfica	51
9.4.2.	Fase dos: revisión para elaboración de protocolo de coordinación y operación con las centrales	51
9.4.3.	Fase tres: identificación del problema a investigar	52

9.4.4.	Fase cuatro: elaboración de perfiles de generación-demanda diarios, mensuales y anuales.....	52
9.4.5.	Fase seis: simulación de los escenarios modelados.....	55
9.4.6.	Fase siete: presentación y análisis de los resultados obtenidos	55
9.5.	Resultados esperados.....	56
10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN	59
10.1.	Recopilación de datos.....	59
10.2.	Elaboración de perfiles de generación y demanda	59
10.3.	Simulación de escenarios	60
10.4.	Evaluar la seguridad y estabilidad del sistema.....	60
10.5.	Análisis de datos	61
10.6.	Realización de tablas	61
11.	CRONOGRAMA	63
12.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO.....	65
	REFERENCIAS.....	67

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Árbol de problemas	12
2.	Fuentes de energía	22
3.	Tipos de fuentes de energía	23
4.	Suministro de energía primaria en Guatemala para el período 2001- 2016	24
5.	Generación Distribuida	26
6.	Diagrama básico de SCADA	38
7.	Simulador NEPLAN	42
8.	Cronograma de la investigación	63

TABLAS

I.	Definición de variables	50
II.	Definición operativa de las variables	50
III.	Resultados esperados	56
IV.	Gastos del estudio	65

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Amperios
kW	Kilowatts
KWh	Kilowatts hora
MW	Megawatts
%	Porcentaje
Q	Quetzales
V	Voltios

GLOSARIO

AMM	Administrador del Mercado Mayorista. Entidad encargada de la operación técnica y comercial del mercado mayorista en Guatemala.
CNEE	Comisión Nacional de Energía Eléctrica
DEORSA	Distribuidora de Electricidad de Oriente, S.A.
GD	Generación Distribuida.
NCC	Normas de Coordinación Comercial. Norma utilizada para la coordinación comercial del mercado mayorista en Guatemala.
NEPLAN	Es un <i>software</i> de análisis de sistemas de potencia utilizado en sistemas de transmisión, distribución y generación, así como en sistemas industriales, energías renovables y aplicaciones Smart Grids.
PMU	Unidad de Medición Fasorial. Es un dispositivo tecnológico que permite realizar, con gran precisión y velocidad, el análisis dinámico del estado de un sistema eléctrico de transmisión/distribución.

SCADA

Supervisión, Control y Adquisición de Datos. No es una tecnología concreta sino un tipo de aplicación. Cualquier aplicación que obtenga datos operativos acerca de un sistema, con el fin de controlar y optimizar ese sistema, es una aplicación SCADA.

UML

Lenguaje Unificado de Modelado. Desempeña un rol importante no solo en el desarrollo de *software*, ya que es una forma de mostrar visualmente el comportamiento y la estructura de un sistema o proceso.

1. INTRODUCCIÓN

Desde sus inicios, el despacho de generación es una parte importante en la gestión de los sistemas eléctricos, porque se busca el abastecimiento proporcionado de la demanda de energía, para el desarrollo adecuado de cualquier país. Sin embargo, con el paso del tiempo se han presentado muchos cambios significativos en el entorno de la generación a nivel nacional, que motivan una producción más eficiente en beneficio de la conservación del medio ambiente. Esto es parte de la búsqueda de la eficiencia energética con el uso de tecnología de energías renovables, lo que implica un reto para el operador de la red para afrontar el impacto de la integración de generación distribuida.

Esto favoreció a que en este estudio (que prácticamente no ha sido tratado a nivel de distribución en Guatemala) se busque evaluar el efecto por medio de escenarios de reparto potencia activa y reactiva, así como lo que cada generador distribuido provoca en la red, sean positivos o negativos. Además, determinar y presentar las repercusiones e implicaciones en las que incurrió por medio de la implementación de un despacho óptimo.

En el primer capítulo se presentarán los antecedentes de la investigación, que resume investigaciones previas sobre el tema. Se hará una exploración bibliográfica de los temas, que serán útiles y como base teórica de la aplicación propuesta. Se presentará la factibilidad de la elaboración del proceso de despacho, con base en la determinación de los beneficios que ofrece la correcta penetración de GD en la infraestructura eléctrica.

En el segundo capítulo, este estudio de despacho óptimo presentará y evaluará las posibles causas potenciales que generan los incrementos de pérdidas de potencia y desbalance de tensión, en la red de distribución de DEORSA de Guatemala durante los últimos años. Por ejemplo, la poca o nula regulación sobre los generadores distribuidos, que establezca una serie de requisitos específicos sobre los parámetros eléctricos con los que operan en la red. Por la falta de un programa en el que un operador posea el control y monitoreo de los flujos y perfiles de tensión, que garanticen la calidad y seguridad del suministro. También la falta de estudios técnicos profundos sobre la adecuada localización y conexión a la red, como la falta de protocolos de operación entre generador y distribuidor.

En el tercer capítulo, a partir de los datos que serán obtenidos del análisis de los perfiles de generación y simulaciones, se podrá evidenciar que la propuesta es una opción para el aprovechamiento del despacho. De esta manera, se obtendrá una correcta gestión activa de la creciente demanda y se planteará la necesidad de establecer un acuerdo de colaboración entre el distribuidor y el GDR, para manejar el gran potencial que permite la energía renovable en la eficiencia e integración del sistema. Por tal razón, esta investigación beneficiará a la empresa distribuidora DEORSA en la planificación y operación de la red, porque permitirá disminuir la cantidad de pérdidas y un mayor aprovechamiento de la aportación de estos agentes generadores.

En el cuarto capítulo se elaborarán diferentes escenarios de generación, considerando la operación efectiva de dichos actores, de manera que se encuentre un equilibrio y funcionamiento correcto de la red. Se hará una valoración para retrasar la tentación de apresurarse a construir una nueva infraestructura eléctrica ante el incremento inevitable de la demanda. Esto proporcionará una solución para el control y empleo de la generación distribuida

existente a lo largo de la red, así como la futura integración de este tipo de tecnología que en el corto plazo representa una opción más económica. Además, es más rápida para reducir las pérdidas y desaprovechamiento de los beneficios de su incorporación.

En el quinto capítulo se presentará la discusión de los resultados obtenidos, tomando como base los objetivos que inicialmente se plantearon. Asimismo, se profundizará en las repercusiones positivas y negativas que podría generar la adecuada administración de la generación que se encuentra a disposición, así como las consideraciones que se deben tener presentes antes de tomar una decisión en favor de la demanda que se encuentre en la red de distribución.

2. ANTECEDENTES

En Guatemala no existen publicaciones relacionadas con el despacho de generadoras distribuidas renovables; sin embargo, en países como Colombia, Chile, México y Perú se encontraron investigaciones relacionadas con el despacho de fuentes de energías renovables, las cuales ayudarán como en la presente investigación. En los siguientes párrafos se mencionan algunas publicaciones que detallan información útil.

Montoya, Grajales, Grisales y Castro (2017), en su publicación titulada *Ubicación y Operación Eficiente de Almacenadores de Energía en Microrredes en presencia de Generación Distribuida*, proponen un modelo matemático para el despacho económico de microrredes en presencia de generación distribuida con base en fuentes de energías renovables. En dicha publicación se resalta que para una operación eficiente “es necesario conocer los perfiles de demanda y generación para cada intervalo del período de estudio” (p. 103). A lo largo de la investigación se plantean las funciones objetivo, las cuales permiten establecer el balance de potencia activa que se perciben en la barra del sistema, los límites de capacidad de generación de potencia activa de la generación distribuida y los límites de capacidad de las líneas que lo interconectan. Estas consideraciones son similares a las que se deberán realizar para la implementación de un despacho óptimo, por lo cual representan un antecedente válido para el presente trabajo de investigación.

En la investigación titulada *Estrategias de control de calidad de energía en microrredes rurales*, de González, Cusgüen, Mojica y Pavas (2017), se plantea un panorama para la gestión de despacho, en el que se utiliza una

estrategia de control para la capacidad de atención denominada *Hosting Capacity*, que se trata de una asociación de restricción a la máxima cargabilidad, que puede tener un sistema según una generación y que esta no impacte en la calidad de la energía para los usuarios finales. Los procedimientos utilizados para implementarlos son métodos de control de las unidades de generación distribuida, mediante los valores de voltaje, frecuencia, como a su vez, manejo de la potencia activa y reactiva. En la investigación se plantearon escenarios que surjan en casos en los que se comprometiera la confiabilidad del sistema, para que de esa forma se obtuvieran los índices de desempeño y conocer cuánta generación distribuida puede ser conectada. De este modo, los resultados obtenidos demuestran que la inclusión de la generación distribuida dentro de las restricciones y la optimización del sistema tenga solución. También se puede establecer con mayor criterio la estabilidad y operación satisfactoria conjunta del sistema de distribución.

Rodríguez y Rojas (2018), en su investigación *Contribuciones en la modelación de energía renovable en sistemas de potencia* documentaron los aportes más valiosos en la búsqueda de soluciones óptimas, con el fin de aportar a la diversa cantidad de problemas operacionales y de planificación obtenidos, dado la imperativa y creciente penetración de generación de energía con fuentes renovables, que se presentan en los sistemas eléctricos. Dentro del compendio se desarrollaron formulaciones cualitativas sobre lo beneficioso que resulta la aplicabilidad de optimizaciones matemáticas, para determinar las características de incertidumbre durante la masificación de generación renovable, para la programación de un despacho, así como la disponibilidad de potencia que se tiene por la intermitencia y variabilidad de la fuente primaria de este tipo de generación. Las conclusiones permiten establecer que los usos de algoritmos “permiten garantizar robustez, estabilidad, eficiencia, flexibilidad y rentabilidad de dichos sistemas” (Rodríguez y Rojas, 2018, p.8).

Caicedo (2021) publicó un trabajo titulado *Control MCP distribuido para el despacho óptimo de potencia reactiva y activa en microrredes*, donde propone y explica el funcionamiento de un controlador MCP (siglas en inglés de Model Predictive Control) distribuido y centralizado, que permita la reacción ante las perturbaciones que ocurran durante la generación distribuida, así como los cambios que se perciben en la demanda eléctrica. Una consideración importante es que la mayoría de redes CA, en las que se vean involucradas fuentes renovables, son desbalanceadas porque son sistemas con alta dependencia de las condiciones ambientales. Por tal razón, dentro del funcionamiento del controlador se calcula en tiempo real las potencias que deben inyectar para ajustar la demanda y generación, de manera que permita un flujo óptimo de potencia activa, reactiva, así como el control de voltaje para la operación óptima del despacho.

Según Riveros y Rivera (2018), uno de los mayores retos en la actualidad, de la comunidad científica, consiste en el estudio de modelos y comportamiento de la tecnología renovable para su inserción en los sistemas energéticos y en despachos, de los que actualmente se consideran no programables, dada su intermitente conducta. Se plantea que la formulación para dicho comportamiento puede ser a partir de funciones de distribución de probabilidad, que tomen en cuenta las variables climáticas para el planteamiento de la función de optimización. De este modo, se puede asumir que hay un comportamiento constante de las variables medioambientales y ofrecer “un modelamiento económico que contenga las características de variabilidad e incertidumbre de estas fuentes de energía, y de esta manera incluirlas en el despacho de energía programable” (Riveros y Rivera, 2018 p. 51).

En España se menciona una situación similar a la que se pretende con este estudio, que fue realizada por Treballe, Frías, Maza, Tello y Rodríguez (2012) en su publicación *El control de tensión en redes de distribución con Generación Distribuida*, en la cual resaltan aspectos importantes sobre el aprovechamiento en la visibilidad del aporte de la generación en el sistema. Señala una adecuada relación y cooperación entre generador y empresa distribuidora, ya que existe margen de mejora en dicha participación para que resulte ventajoso. Además, hacen recomendaciones para enriquecer el normativo y destaca que una planificación, estudio y diseño de red, ante la incorporación de GD, no es lo suficientemente competente. Implica un aumento en la tensión e igualmente requiere de herramientas auxiliares en la gestión y flujo de información, que posibiliten al operador acoplarse a las situaciones variantes o cambiantes de la red. Resguarda en todo momento la seguridad y calidad del suministro, lo que permite presentar consignas específicas de operación en los generadores conectados al sistema de distribución.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

3.1. Contexto general

La generación distribuida renovable representa un cambio en el paradigma de generación de energía eléctrica centralizada. La importancia de los sistemas de Generación Distribuida se debe a los beneficios que representan la aplicación de diferentes tecnologías, tanto para el usuario como para la red de distribución. Esto diversifica los recursos y aumenta la autosuficiencia de una región o carga local, ante un incremento en la demanda. Además, permite que se ofrezca un servicio fiable, con un mejoramiento en la eficiencia y una reducción de pérdidas en las líneas de distribución y transmisión.

La implementación de proyectos de Generación Distribuida se enfoca en un mayor desarrollo sostenible, porque se busca aumentar la calidad de la energía; es decir, tener de forma ininterrumpida el servicio de energía eléctrica, con los respectivos parámetros eléctricos que la califiquen acorde a las necesidades de la red. Sin embargo, un aumento sin previo control y registro representa un problema para las empresas distribuidoras, por lo cual es necesario gestionar de manera coordinada, para suministrar electricidad de manera fiable.

3.2. Descripción del problema

Actualmente, el control sobre el aporte de generación distribuida renovable muestra una red de distribución inestable acerca de la calidad de

energía que perciben los clientes, ya que lo ideal en cualquier red es que se supla completamente la carga y haya reserva disponible en caso de mantenimientos o contingencia. Sin embargo, el creciente desarrollo de las fuentes de energía renovables, así como la necesidad de diversificación en las fuentes de energía, trae como consecuencia un aumento de la complejidad en la gestión del sistema eléctrico. Esto ocurre en las áreas de distribución, donde el planteamiento de un modelo pasivo de consumo energético está dando paso a un aumento de penetración de GDR y de la existencia de flujos de energía bidireccionales. En términos económicos, esto se traduce en aumento de costos operativos en las líneas de la empresa distribuidora.

De esta manera, se hace evidente la importancia de un control en la operación y regulación de potencia en las salidas de generación (para una gestión estable y económicamente eficiente en ambas situaciones) que, además de abastecer la creciente demanda en áreas urbanas o rurales, su correcto uso y funcionamiento contribuye al aumento de la eficiencia energética del sistema. Lo anterior disminuye las pérdidas de potencia, por lo que el control debe regular la tensión y repartir la carga entre los distintos GDR.

Partiendo de lo anterior, se pretende analizar los beneficios de la implementación de un despacho adecuado de las GDR, las cuales se encuentran conectadas a la actual red de distribución de DEORSA mediante simulaciones. Por medio de casos de estudio, que contengan ejemplos experimentales con datos proporcionados, se obtenga una perspectiva económica y de seguridad energética, con la finalidad de proponer las mejoras necesarias y, a su vez, indagar si el esquema actual se adapta adecuadamente a la gestión del reparto de la carga en distintos GDR.

3.3. Formulación del problema

Por medio del siguiente esquema se lograron identificar las posibles causas y consecuencias del problema que se estudió.

3.3.1. Pregunta principal

¿Cuál es el beneficio de la implementación de un despacho de las centrales de generación distribuida con base en la curva de demanda de carga de una red de distribución?

3.3.2. Preguntas auxiliares

Derivado del análisis de la pregunta principal, surgieron las siguientes preguntas auxiliares:

- ¿De qué manera se puede evaluar el impacto de pérdidas en la infraestructura de la red actual con la planificación de un despacho óptimo?
- ¿Qué aspectos se deben tomar en cuenta para el establecimiento de protocolos de operación y despacho, para velar por el cumplimiento y cubrimiento de la demanda?
- ¿Cómo se puede determinar el impacto económico en la distribuidora, con el aumento de la eficiencia en la calidad del producto de una generadora distribuida renovable?

Figura 1. **Árbol de problemas**



Fuente: elaboración propia, hecho con Word 2016.

3.4. **Delimitación del problema**

A continuación, se presenta la delimitación contextual, geográfica e histórica del problema de investigación de este trabajo.

3.4.1. Delimitación contextual

El estudio de eficiencia para un despacho óptimo se contextualiza en el ámbito de los escenarios de pérdidas económicas y de potencia, que se han presentado en los últimos años en la red de distribución de Guatemala y que no ha sido estudiado a profundidad. Lo mencionado involucra a variables que influyen directa e indirectamente, en el cumplimiento del abastecimiento adecuado de la demanda que se presenta en el país. Involucró principalmente las variables que permiten establecer los casos de estudio de la red actual, demanda, flujos de potencia y voltaje.

3.4.2. Delimitación geográfica

Para el estudio se utilizarán datos de la empresa distribuidora ENERGUATE, de las Generadoras Distribuidas Renovables conectadas en la zona oriente del país y pertenecientes a la Distribuidora de Electricidad de Oriente, S. A. (DEORSA), con los datos de informes de aporte de energía en la red de distribución sobre la demanda que se tiene en esa región. Esta delimitación tiene como objetivo estudiar el comportamiento que tendría la infraestructura actual, en la que se utilizará únicamente el generador más representativo de cada departamento.

3.4.3. Delimitación histórica

Se tomarán los datos de informes estadísticos de la generación aportada por las Generadoras Distribuidas Renovables, en contraste con la demanda que se tuvo en los circuitos de la red de distribución DEORSA durante el primer trimestre del 2022. Adicional a esto, se aprovecharán los datos del 2021 para generar un dato precursor a la problemática a investigar.

4. JUSTIFICACIÓN

La elaboración y ejecución de la presente investigación se justifica en la línea de investigación de gestión de sistemas de generación, transmisión, comercialización y distribución eléctrica de la Maestría en Gestión de Mercados Eléctricos Regulados. Este estudio contribuirá a la mejora de la eficiencia del aporte de generación distribuida renovable en la red distribución, por medio del análisis de la implementación de un despacho óptimo de las mismas.

Con este trabajo se obtendrán resultados sobre el control de la generación de las energías renovables conectadas a la red de distribución, en contraste con la demanda actual, para verificar las pérdidas económicas por incrementos o decrementos de la energía en la infraestructura. Además, valorizará el mejoramiento de los parámetros de voltaje y potencia para una adecuación de la curva de demanda de carga.

Se obtendrán datos del control de corrientes y tensiones en los diferentes generadores distribuidos renovables, así como de balance de potencia adaptados a las demandas de consumo local. Se hará una repartición que permita reducir los costes de operación y se mantendrá la fiabilidad del sistema, como la gestión de los flujos de potencia entre la red principal y la generadora.

Los productos obtenidos serán de utilidad para todos los usuarios que se encuentren asociados a la empresa Distribuidora de Electricidad de Oriente, S.A. (DEORSA), lo cual evidencia que el proceso de un despacho posibilita una adecuada calidad de suministro. Mediante esta información los operadores de la empresa distribuidora podrán hacer análisis en el centro de control,

específicamente para evidenciar y justificar la necesidad de realizar un proceso de despacho óptimo. También se plantea una planificación, coordinación y operación de las generadoras distribuidas renovables, para establecer protocolos.

Con el presente trabajo se busca que la adopción de nuevas fuentes de energía renovables, planteadas por los nuevos retos tecnológicos, represente una gestión adecuada. Que los impactos en la red sean positivos en la variación de voltaje y balance entre la potencia activa y reactiva del sistema, ya que la falta de gestión dificulta la competitividad de las energías renovables.

5. OBJETIVOS

5.1. General

Analizar el impacto de la ejecución de un despacho óptimo de centrales de Generación Distribuida Renovable, en la red de distribución de DEORSA durante el primer trimestre 2022.

5.2. Específicos

- Estimar, por medio de simulaciones, las repercusiones que poseen los flujos de potencia en la infraestructura de la red de distribución a través de los generadores que están en análisis.
- Detallar protocolos de coordinación y operación de las distintas centrales distribuidoras con el centro de control de la distribuidora, para el abastecimiento adecuado de la demanda local.
- Proponer una metodología de cálculo del impacto económico que percibe la distribuidora, asociado al monto de generación que se encuentra fuera del despacho óptimo.

6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN

Esta investigación pretende determinar el impacto causado por la implementación de un despacho óptimo de la generación distribuida renovable, tomando como base la curva de demanda de carga. También, busca establecer las repercusiones en la calidad de los parámetros de voltaje y frecuencia, importantes para la calidad de suministro: la valorización de las pérdidas de potencia activa y reactiva en los costos operativos de DEORSA.

Para la solución de la problemática planteada se pretende tomar como referencia los datos registrados de generación y demanda durante el primer trimestre del 2022, período que servirá para calcular las pérdidas asociadas a la generación excedente o decreciente. Además, se unificará al cambio tarifario para determinar el impacto económico y, a su vez, validar el comportamiento obtenido a lo largo del período de estudio. Posteriormente se realizarán simulaciones de despachos de electricidad, considerando las condiciones que se tuvieron en el año analizado, con el objetivo de revelar si existe una mejora con la correcta gestión de parte de la distribuidora.

A continuación, se harán simulaciones de despachos diarios de electricidad para el mismo horizonte de tiempo, pero se considerará la curva de demanda de carga conectada al circuito estudiado. Finalmente, los resultados obtenidos en ambas condiciones serán comparados, para determinar el impacto de las principales variables tras la implementación de un despacho óptimo en la red de distribución. Adicionalmente, para la validación de los protocolos de comunicación y operación entre empresa y generador distribuido, se basará en lo propuesto por la normativa vigente del país, como en las normas de

coordinación comercial definidas por el Administrador del Mercado Mayorista (AMM). Se realizará un compendio de lo indispensable y aplicable para su correcta función.

En términos de originalidad, es importante mencionar que actualmente no existe un estudio de tal índole. La implementación de despachos con fuentes de energía renovables es un tema abordado desde diferentes perspectivas dada su alta variabilidad e intermitencia; para dicho procesamiento existen numerables métodos, pero el que se plantea en esta investigación a nivel de posgrado no se ha realizado.

En cuanto a las herramientas que se utilizarán para realizar el estudio planteado, además de los resultados que se obtendrán, se cuenta con lo necesario para llevar a cabo las simulaciones de despachos de electricidad en la red de distribución, ya que el investigador labora para la empresa ENERGUATE. Esta compañía proporcionará las herramientas para efectuar la investigación, así como la información básica para la realización de las correspondientes simulaciones.

7. MARCO TEÓRICO

7.1. Fuentes de energía eléctrica

Según la Organización Latinoamericana de Energía, citada por Aldana (2012), “las fuentes de energía son aquellos elementos de la naturaleza que pueden generar energía utilizable por el hombre” (p.10). Así, la producción de energía es un proceso natural más o menos complejo, del que se saca provecho para llevar a cabo un trabajo específico o alcanzar una conveniencia para su aplicación; sin embargo, aunque hay incontables fuentes de producción, la mayor parte de toda la energía proviene de la irradiación solar (Martínez y Caro, 2010).

Por lo tanto, las fuentes de energía son un fenómeno natural capaz de producir energía utilizable para uso económico o biofísico. Estas fuentes pueden ser variadas (de naturaleza física o química); generalmente involucran la intervención humana para transformar y redirigir la energía para su disposición a voluntad, principalmente en forma de electricidad, movimiento o calor. Para efectos de esta investigación se enfocará únicamente en su forma eléctrica.

Figura 2. Fuentes de energía



Fuente: Rincón Educativo (2018). *Lámina interactiva sobre fuentes energéticas*.

7.1.1. Tipos de fuentes de energía

Según la organización medioambiental Greenpace, citada por Aldana (2012), “las fuentes de energía eléctrica se pueden dividir en dos grandes categorías: a) primarias y secundarias; b) fuentes de energía renovables y no renovables (según su capacidad de generación)” (p. 10).

De acuerdo con Vásquez (2012), la energía primaria incluye los productos energéticos extraídos o captados de los recursos naturales, tales como los ríos, lagos, el calor proveniente de la tierra, el viento, el gas, la biomasa y el petróleo, entre otros; la energía secundaria combina los productos

energéticos primarios obtenidos por los centros de conversión en productos con características específicas de consumo final.

Figura 3. Tipos de fuentes de energía



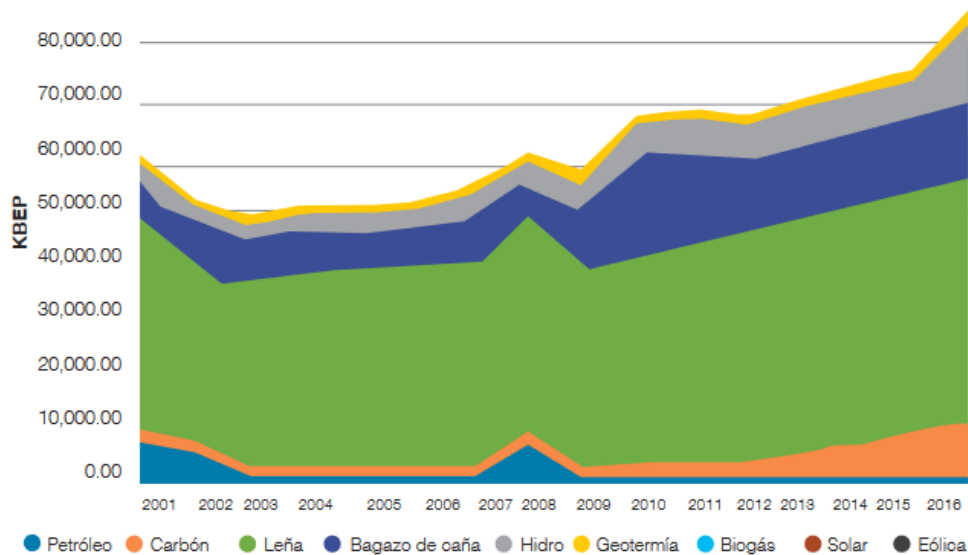
Fuente: Alonso (2015). *Esquema sobre energía*.

7.1.1.1. Fuentes de energía renovable

Para el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (2015) “la energía renovable es cualquier forma de energía de origen solar, geofísico o biológico” (p. 16), que se regenera mediante procesos naturales a un ritmo igual o superior al ritmo al que se utiliza. Proviene de flujos de energía continuos o recurrentes que ocurren en el entorno natural, incluidas las tecnologías bajas en carbono como la energía solar, hidráulica, eólica, mareomotriz y undimotriz, la energía térmica oceánica y los combustibles renovables como la biomasa.

Por lo tanto, se considera que todos estos recursos son producidos constantemente por la naturaleza y que no se agotarán. Es importante hacer hincapié que para Linares (2012) es indispensable e imperativo apoyar la generación mediante el uso de energías productivas renovables, para la mitigación del impacto climático y de los gases que generalmente son emitidos por grupos energéticos específicos. De esta manera se auspician incrementos o decrementos en las contaminaciones de dióxido de carbono en el medioambiente y se refuerza un futuro sostenible.

Figura 4. **Suministro de energía primaria en Guatemala para el período 2001-2016**



Fuente: Universidad Rafael Landívar (2018). *Perfil energético de Guatemala: bases para el entendimiento del estado actual y tendencias de la energía.*

7.1.1.2. Fuentes de energía no renovables

Son aquellas sustancias o material de la naturaleza que se encuentra en cantidades limitadas. No se actualizan pronto, por eso se agotan cuando se usan. Actualmente, la demanda mundial de energía se satisface en gran medida a través de este tipo de fuentes de energía. Los más comunes son el carbón, petróleo, gas natural y uranio. Sin embargo, este modelo de desarrollo energético basado en el petróleo está condenado al agotamiento de los recursos fósiles sin reemplazo posible, ya que se necesitan millones de años para que se formen.

Hoy por hoy se puede observar que los derivados de los combustibles fósiles como el petróleo, el gas y el carbón proveen cerca del 80 % de la energía utilizada a nivel mundial. Al respecto, la Comisión Económica para América Latina (2013) concluye y coincide en sus diferentes estudios y análisis de la evolución de la demanda energética mundial, que los principales incrementos de dicha demanda provendrán de los países en desarrollo. Además, enfatiza la dificultad de reemplazar, al menos en los próximos 20 años, el creciente uso de los combustibles fósiles, en especial petróleo, gas y carbón (es aproximadamente el 65 a 70 % de la matriz energética mundial en el futuro previsible).

7.2. Generadores Distribuidos Renovables

Existen diversas definiciones acerca de la normativa vigente de cada país, regulaciones y composición de su infraestructura eléctrica. Conforme a lo constituido por la CNEE en la resolución CNEE-227-2014, normativo aplicado al sistema regulatorio de Guatemala, los generadores distribuidos renovables es toda “aquella persona, individual o jurídica, titular o poseedora de una central de

generación eléctrica, que utiliza recursos energéticos y participa en la actividad de Generación Distribuida Renovable” (pág. 6). Aunado a los generadores distribuidos renovables, la CNEE-227-2014 señala que la generación distribuida renovable es la “modalidad de generación de electricidad, producida por unidades de tecnologías de generación con recursos renovables, que se conectan a instalaciones de distribución cuyo aporte de potencia neto es inferior o igual a cinco megavatios (5 MW)” (p. 6). A su vez, para la CEPAL (2022), la generación distribuida “se define como aquella generación que se encuentra interconectada a un circuito de distribución con altas concentraciones de centros de carga (es decir, cuya capacidad instalada es menor que la demanda del circuito de distribución al que está conectado)” (p. 3).

Figura 5. **Generación Distribuida**



Fuente: Ministerio de Energía y Minas (2017). *La Ley de Régimen de Fomento a la Generación Distribuida de Energía Renovable Integrada a la Red Eléctrica Pública.*

7.2.1. Clasificación de Generadores Distribuidos Renovables

Para Serrano (2021) se distinguen tres modelos generales para generadores: “a) despachables, b) no despachables y c) unidades de almacenamiento”. Se detallan a continuación únicamente las aplicables a esta investigación.

7.2.1.1. Generadores despachables

De acuerdo con Serrano (2021), se consideran como generadores despachables a un generador cuya fuente de energía principal puede generar cualquier cantidad de energía eléctrica, y adecuar su potencia de salida a pedido de un operador. También pueden ser conectados a la red o desconectados de ella, para satisfacer las necesidades del sistema eléctrico en cualquier momento; solo está limitada por el rango de operación del generador. Suelen ser generadores síncronos o también llamados generadores convencionales, como los generadores de combustibles fósiles (diésel o carbón) o las pequeñas centrales hidroeléctricas, que tienen mucha potencia. Sin embargo, se ignora la disponibilidad de la fuente de energía, aunque en algunos casos también puede ser un generador renovable como una pila de combustible o la energía geotérmica.

7.2.1.2. Generadores no despachables

Según Serrano (2021), los generadores no despachables son aquellos cuya generación de energía está limitada a la disponibilidad de su fuente de energía primaria, por lo tanto, no pueden proporcionar ninguna cantidad de electricidad que esté programada para ellos y generalmente están diseñados para utilizar todas las fuentes de energía disponibles. Estos están relacionados

principalmente con las energías de producción renovable más comunes, como las centrales fotovoltaicas y los aerogeneradores. La proporción de energía que entregan depende exclusivamente de la proporción del viento o el sol que haya; pero son incapaces de controlar su nivel de producción en tiempo real que, a diferencia de los generadores tradicionales, utilizan sistemas de conversión de energía tal como DC/AC (también conocidos como inversores) o AC/AC para paneles fotovoltaicos, como lo es para los aerogeneradores. Sin embargo, de acuerdo con accenture (2018), “la tecnología digital y el almacenamiento convertirán a la generación de energía renovable en energía más despachable” (p. 3), por lo que en los próximos años permitirá mitigar las variaciones de potencia para este tipo de generación intermitente; proporcionará estabilidad y flexibilidad a los sistemas de potencia.

7.3. Ventajas de la generación distribuida

Según Ramos (2020), “la Generación Distribuida, al estar conectada a la red del distribuidor, genera múltiples beneficios a la demanda del sistema donde está directamente conectada, así como al mercado eléctrico en general” (p. 10-12). Dichos beneficios pueden estar agrupados en económicos, medioambientales y técnicos, los cuales se detallan a continuación, cuya mención tendrá relevancia:

7.3.1. Beneficios económicos

En los siguientes ítems se mencionan algunos de los beneficios que proporcionan.

7.3.1.1. Limitación de costos de construcción o expansión de líneas de transporte

La generación distribuida reduce la necesidad de construir nuevas líneas de transmisión o abastecer las líneas de transporte actuales, así como los costos de financiación, ejecución y conservación asociados a esta infraestructura, ya que pueden proporcionar los aumentos de carga locales necesarios. Los beneficios incluirán ahorros en la demanda total de electricidad, equivalentes a nuevas inversiones en la red de transporte y tarifas, así como honorarios partícipes que ya no se aplicarán a la demanda (Ramos, 2020).

Cabe mencionar que esto no evita que la modernización y expansión de la red eléctrica no sea necesaria para mantenerse al día con las nuevas tecnologías, las nuevas fuentes de suministro y las crecientes necesidades energéticas de una sociedad en crecimiento. Las actualizaciones de la red también pueden hacer un uso más eficiente de los recursos, reducir las pérdidas de energía causadas por la transmisión a larga distancia y fomentar la innovación mediante el uso de nuevas tecnologías, para garantizar la continuidad del servicio (TRECSA, 2022).

7.3.1.2. Mejorar estabilidad energética y resiliencia de los sistemas y actividades económicas

Ramos (2020) señala que la producción distribuida beneficia a la seguridad energética del país y el progreso de las labores económicas, ya que reduce significativamente el riesgo de desequilibrio entre la oferta y la demanda de energía eléctrica a largo, mediano y corto plazo. Su implantación contribuye a la fiabilidad del sistema eléctrico ante situaciones imprevistas que amenacen el normal funcionamiento del suministro y la actividad económica. Ahorra tanto

costes de racionamiento como aumento repentino de los costes marginales en dichas situaciones.

7.3.2. Beneficios medioambientales

A continuación, se mencionan algunos de los beneficios que proporcionan.

7.3.2.1. Disminución de dispersión de partículas contaminantes

Ramos (2020) considera que la expansión de generación mundial de electricidad implica encontrar proyectos que consideren la limitación de las emisiones de monóxido de carbono (CO), azufre (SOx) y dióxido de carbono (CO₂). De estas emisiones, el dióxido de carbono representa el 86 % del total de las partículas que aceleran el cambio climático.

De este modo, la principal ocupación que incide en la generación de partículas de dióxido de carbono es la obtención de energía mediante la quema de combustibles fósiles tales como el carbón y derivados del petróleo. Reducir el impacto ambiental o las emisiones contaminantes, especialmente en el caso de múltiples centrales distribuidas y proyectos que utilizan principalmente energías limpias (transición energética), ayudará significativamente a reducir las emisiones de gases contaminantes, y evitar la operación de equipos que utilicen combustibles fósiles (descarbonización) (Ramos, 2020).

7.3.2.2. Incremento de la cobertura eléctrica

Por medio de la generación distribuida se extenderá la cobertura de energía en áreas remotas, para aliviar las condiciones locales de abastecimiento y ser accesible a una adaptación, a las condiciones del lugar específico donde se desee implementar. En otras palabras, la generación distribuida puede contribuir significativamente al pleno acceso de los servicios eléctricos a parte de la población que se encuentra retirada de los puntos centrales de carga (Ramos, 2020).

7.3.2.3. Confiabilidad del sistema debido a cortes de energía

La confiabilidad del sistema de distribución de energía se refiere a la capacidad de proporcionar servicios eléctricos, como servicios técnicos comerciales y calidad del producto, con interrupciones mínimas. (Chusin, Salazar y Escobar, 2015)

Ramos (2020) indica que la puesta en marcha de proyectos de generación distribuida representa “para los usuarios un incremento de confiabilidad en los usuarios y disponibilidad de la fuente energética, así como una reducción en el número de interrupciones (apagones)” (p. 12).

Entre los beneficios que la generación distribuida proporciona a los usuarios están favorecer la confiabilidad y acrecentar las características importantes de la energía, reducir la cantidad de cortes, usar la energía de manera eficiente, reducir los costos de energía (debido a los costos de electricidad en horas pico), usar energía renovable, adaptarse fácilmente al sitio, condiciones ambientales y reducir la contaminación (Calderón, 2007).

7.3.3. Beneficios técnicos

A continuación, se mencionan algunos de los beneficios que proporcionan.

7.3.3.1. Disminución de las pérdidas técnicas

La inyección directa en la red de distribución reduce la necesidad de importar energía desde otras ubicaciones en el área de distribución. Los beneficios serían una reducción significativa de estas pérdidas, lo que beneficiaría tanto a la empresa distribuidora y a los consumidores finales conectados al sistema como a la demanda en general (Ramos, 2020).

Para estimar la reducción de pérdidas técnicas, Arroyave y Lezama (2013) indican que los efectos de la Generación Distribuida sobre las pérdidas activas y reactivas, la distribución de tensión y la sobrecarga o congestión de la red se pueden cuantificar por medio de índices, en los que básicamente comparan el rendimiento de la red con y sin Generación Distribuida. Destacan que son una herramienta que puede ayudar a los planificadores de red a tomar decisiones.

7.3.3.2. Control voltaje-potencia para calidad de suministro

Estos van desde reducir las pérdidas en las líneas de transporte de energía por su proximidad al punto de consumo, aumentar la confiabilidad del sistema debido a la coexistencia de múltiples fuentes, tolerar fallas que no provoquen la falla de toda la red, operar con potencia reducida y capacidad instalada. (Ramos, 2020)

Según lo concluido por Treballe, Marín, Ortega y Ramos (2012), la presencia de generación distribuida en la red de distribución cambia la circulación de energía que atraviesa la red. En esencia, las redes pasivas, las condiciones de diseño y la arquitectura de la red suponen un flujo unidireccional desde el punto fronterizo de la red de transporte hasta el consumidor final. Al administrar adecuadamente los valores de voltaje y potencia, las redes conectadas mejoran la calidad de la electricidad (oscilaciones, estabilidad de tensión, potencia reactiva y modificación del factor de potencia).

7.4. Despacho en sistemas eléctricos

En el siguiente párrafo, se detalla información que será útil en la implementación de un despacho.

7.4.1. Despacho a redes de distribución con fuentes de energía convencionales

Según Barragán, García y Trujillo (2013), la programación de un despacho es el proceso de asignación de cargas a diferentes agentes de suministro de energía. El objetivo del proceso es distribuir la demanda total del sistema a los generadores disponibles, de tal manera que el costo global de producción de electricidad se vea mínimamente afectado por las limitaciones tecnológicas y ambientales.

Posteriormente enfatizan en la importancia de la planificación del despacho de energía, muestran que el objetivo es evitar el descuido de la demanda, prevenir el colapso del sistema energético y reducir el tiempo de racionamiento y restauración. Forman el sistema de criterios principales para

evaluar la confiabilidad de la energía eléctrica en sus niveles de generación, transmisión y distribución. (Barragán, García y Trujillo, 2013)

Finalmente, concluyen que los problemas de garantizar condiciones de operación realista para los sistemas de despacho energético suelen resolverse en el día a día. Para este tipo particular de despacho, en ocasiones debe considerarse conectar o desconectar generación individual como en grupos, dependiendo de los cambios o variación en el uso por hora que se establezca de la demanda. Sin embargo, la inclusión de agentes de generación distribuida tiene desventajas relacionadas con la tecnología de integración adecuada y los problemas de equilibrio de carga proporcionados por GD. (Barragán, García y Trujillo, 2013)

Desde una perspectiva no lineal, la inclusión de recursos de generación distribuida (aerogeneradores, celdas fotovoltaicas, sistemas de biomasa, minihidráulica [PeR], centrales diésel y sistemas FLYWEEL) representa un factor importante en el sistema de despacho para el proceso de distribución. (Barragán, García y Trujillo, 2013)

7.4.2. Despacho con generación distribuida

Según el Electric Power Research Institute (citado por Barragán, García y Trujillo, 2013), la Generación Distribuida (GD) se interpreta como "la utilización de tecnologías modulares de generación de pequeña capacidad, dispersas a lo largo del sistema de distribución" (p. 37).

Las utilidades que proporciona la generación distribuida contienen la disminución en las circulaciones de energía, en los sistemas de reparto y transporte de un sistema de potencia; restringe el aumento de la demanda,

aminora el deterioro de la infraestructura en transporte y distribución. De este modo, aumenta las características eficientes en el suministro de electricidad, la seguridad y solidez de la red en que se encuentren conectados. Sin embargo, la colocación de generación distribuida en las redes tradicionales de reparto de energía presenta algunas dificultades, ya que estos sistemas están bosquejados para una circulación de energía unidireccional; es decir, desde un alimentador primario hasta el consumidor final, por lo que una desacertada administración provoca flujos bilaterales. (Barragán, García y Trujillo, 2013)

Dentro de estos defectos cabe destacar los causados por fallas de corta duración, donde la corriente inyectada en el GD puede provocar la falla del fusible antes de la primera maniobra rápida del reconectador de aguas arriba del sistema de distribución. Se debe tomar en consideración que si el nivel de penetración de GD en la línea de distribución es alta (superior al 35 %), la falla de la línea adyacente provocará la apertura del interruptor automático principal conectado a la conexión. (Barragán, García y Trujillo, 2013)

Cuando se trata de proteger los sistemas de distribución de energía, se debe tomar en cuenta que la intensidad eléctrica de la carga abastecida por el GD cambiará el rango del dispositivo de protección, lo que cambiará la sensibilidad del medidor. Dará como resultado un requisito de corriente más alto y provocará una reacción protectora sistémica. Por otro lado, la no linealidad que brinda la GD y la reducción de confiabilidad de la protección del sistema requieren una constante adaptación a los escenarios dinámicos. En este sentido, se optimizan los algoritmos clásicos de planificación de operaciones, incluyendo conexiones de control para desconexión, conexión y reconexión de carga. Incluso, se han implementado cálculos flexibles para la organización de redes de reparto, incluida generación distribuida, donde el control de estos

sistemas se asegura mediante múltiples funciones objetivo, que las resuelven con la ayuda de algoritmos genéticos. (Barragán, García y Trujillo, 2013)

Por otro lado, concluyen que las deficiencias mencionadas revelan una nueva situación, en la que el despacho en redes de distribución de generación distribuida necesita introducir nuevos criterios de confiabilidad y seguridad, así como políticas que “involucren a los agentes activos y pasivos de la red”. (Barragán, García y Trujillo, 2013, p. 36).

También se considera que Abdullah (2012), en su conferencia *Calculation of Load Point Indices of Distribution Systems Due to Inserting a DG Device in Radial Systems*, propone un modelo de planificación basado en el análisis de la topología de la red, la mensuración de la circulación de potencia anterior y seguidamente de la falla, el mecanismo de disparo, la desconexión y la cesión de carga. En este modelo, la pérdida de carga se calcula con indicadores cuantitativos para hacer frente a distintos límites de situaciones inesperadas, de modo que se pueda valorar la solidez y susceptibilidad de la red.

7.5. Gestión de despacho en sistemas eléctricos

A continuación, se mencionan algunos de los sistemas que se utilizan para una adecuada gestión.

7.5.1. Sistema SCADA

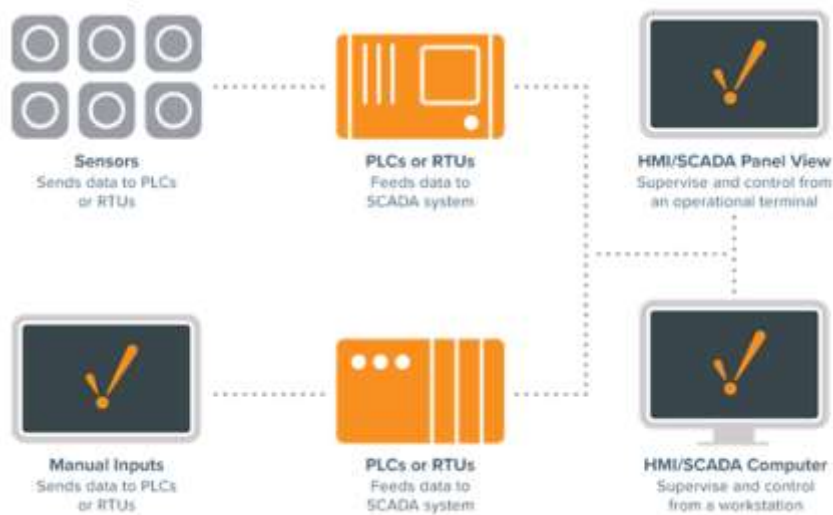
Para Nair y Zhang, en su publicación *SmartGrid: Future networks for New Zealand power systems incorporating distributed generation* (citada por Arias, Rivas y León, 2017), los sistemas SCADA son usados en tareas de

gestión que reciben datos de detectores, que hacen posible el seguimiento de la circunstancia en que se encuentran las subestaciones y equipos de protección, los cuales pueden cambiar su rango en función de la conexión o desconexión de componentes de GD aguas arriba o aguas abajo. El bus principal, que es muy importante por la alta prevalencia de GD en la red.

Dulau, Abrudean y Bica, en su publicación *Distributed Generation Technologies and Optimization* (citada por Arias, Rivas y León, 2017), dicen que un aspecto importante en el procedimiento de conexión al sistema de GD es la monitorización y el poder sobre las unidades de almacenamiento, sus conexiones de inversores y los indicadores de transición al conectar y desconectar los inversores a la red. Para coordinar estas tareas, los sistemas SCADA han demostrado ser una herramienta muy versátil.

En la publicación *A Management Application for the Small Distributed Generation Systems of Electric Power Based on Renewable Energy*, Dumitru y Gligor (2014) se destaca que actualmente gran parte de la administración de la red, incluidas las grandes direcciones generales y su evaluación de impacto, se sostiene con el apoyo de sistemas SCADA, que consisten básicamente en *software* de toma de decisiones, interfaces hombre-máquina con módulos de accesibilidad e instrumentos de inspección, componentes de comunicación local y remota, generalmente compatible con Ethernet. El objetivo principal de SCADA es la tecnología de seguimiento e inspección, que comienza desde el monitoreo de parámetros eléctricos y no eléctricos en el sistema híbrido de producción y consumo de energía renovable, hasta los sistemas de toma de decisiones del elemento de control. Finaliza con la puesta en práctica de la observación de sistemas.

Figura 6. Diagrama básico de SCADA



Fuente: NV Tecnologías S.A. (2022). *¿Qué es SCADA?*

7.5.2. PMU

En la publicación *Integration of distributed generation in the power distribution network: The need for smart grid control systems, communication and equipment for a smart city - Use cases*, Ruiz, Colmenar, Mur-Pérez y López (2014) señalan que desarrollar un nuevo esquema para la administración del sistema de distribución implicaba rediseñar los equipos de medida actuales como PMUs y ordenadores en la administración del flujo de información (que incluya los vectores de fase de intensidad eléctrica, tensiones, variaciones en las oscilaciones, circulación de potencia y energía, entre otros). Los sistemas de reparto de carga, que cuentan con componentes de generación distribuida, se caracterizan por una alta dinámica, lo que significa altas exigencias de los instrumentos de medición en términos de potencia de tratamiento de datos y su actuación al instante del procesamiento. Se busca aumentar el espacio para la

acumulación de información e incorporar sistemas de administración, en respuesta al propósito que anticipadamente fue determinado.

La PMU proporciona las fases de tensiones e intensidades eléctricas y sus correspondientes ángulos de fase, los cuales están cuantificados mediante la referencia de sincronización, proporcionada por el receptor del Sistema de Posicionamiento Global (GPS). Este receptor GPS aumenta la frecuencia de muestreo para el seguimiento, a lo largo del tiempo, de cada componente del sistema, lo cual facilita la toma de decisiones, permite estudiar el comportamiento futuro de la red y en general registra todos los cambios irrealizables a través del monitoreo convencional (registradores de fallas y calidad y analizadores de registro). (Arias, Rivas y León, 2017)

7.5.3. UML

Recientemente se menciona que al utilizar UML se logran examinar las interacciones entre los componentes del sistema de control, como enlaces estructurales de labores características, lo que ayuda mucho en la estructura de objetos y sus subrutinas. Las subrutinas se asocian con parámetros y comportamientos definidos en UML; luego se programan en varias plataformas tecnológicas, como microcontroladores, controladores lógicos programables (PLC) y computadoras personales. (Arias, Rivas y León, 2017)

Para modelar un sistema automatizado desde un nivel de control superior, utilizando componentes de *software*, debe tener la cualidad inherente de independencia de cualquier tecnología o lenguaje de programación. En ese sentido, elegir UML como marco de desarrollo de *software* libre es una opción viable. El principal provecho que se obtiene al usar UML es por su lenguaje general, aunque esto a veces puede ser una desventaja porque las situaciones

o funciones específicas del dominio no se pueden representar en todas las dimensiones y detalles. (Barragán, García y Trujillo, 2013)

7.6. Simulación de redes de distribución con uso del *software* NEPLAN

A continuación, se describe parte del funcionamiento que se espera con el *software* NEPLAN.

7.6.1. Simulación de redes de distribución

La simulación es el uso de un modelo de sistema que intenta aproximar las propiedades de la realidad, para reproducir la naturaleza de la operación real. Nuevamente, esta es una representación de un proceso real, utilizando un modelo o sistema que, dado un conjunto de condiciones, reacciona como una situación real. (Plata, 2014)

Partiendo de ese punto, dado el tamaño de un sistema de potencia y su estado siempre activo, es imposible probarlo. Por ejemplo, no es posible intentar instalar diferentes tipos de equipos para ver cuál funciona mejor para el sistema; tampoco es posible probar diferentes estándares del uso de agua en centrales hidroeléctricas, para su generación y dar la pauta de conectarse y descubrir cuál nos conviene más. Por ello, es importante tener un modelo que nos permita experimentar diferentes opciones y evaluar las consecuencias asociadas con cada elección de modelo. Un tipo de modelo que permita estimar cuál es el valor de algunas variables mientras el sistema está funcionando; esto destaca la importancia de la simulación de dichos sistemas, sean de transmisión, generación o distribución. (Chaer, 2008)

Por otro lado, se menciona específicamente el papel que juega la generación de electricidad con la ayuda de energías renovables. Con la aparición de estas fuentes de energía y su creciente participación en la matriz energética, los parques eólicos y las plantas de energía solar con mayor potencia se conectan cada vez más a la red. Esto obliga a los gestores de la red a desarrollar disposiciones y regulaciones de red más estrictas, para garantizar la seguridad y firmeza de la red, donde el papel de la simulación se vuelve crítico. (INDIELEC, 2021)

Dentro de las herramientas para la aplicación y simulación de estudios eléctricos se destaca NEPLAN. Este *software* se utiliza para el análisis, planificación, optimización y control de redes eléctricas. Es posible instalar e ingresar rápidamente, calcular y evaluar el sistema interactivo con diferentes niveles de tensión y número de nodos, adaptado a las necesidades de planificación, que incluye diferentes módulos de cálculo entre los que sobresalen flujo de potencia óptimo, estabilidad de voltaje, confiabilidad, contingencia y cortocircuito. (Arcos y Flores, 2007)

Esta herramienta proporciona varias opciones, que incluyen gestión de datos simples, incluida la exportación a programas externos, la capacidad de generar diagramas unifilares, utilizando sistemas CAD. También tiene disponibilidad de funciones de importación/exportación, para datos de topología y carga de datos, conexiones integradas a bases de datos ampliamente distribuidas, exploración de datos SQL en MS-Access, Oracle, gestión y control de varias variantes de red. Además, tecnología multicapa, opciones de visualización de resultados flexibles, biblioteca completa de elementos de red y dispositivos de protección, interfaz directa con sistemas de información geográfica (GIS) y sistemas SCADA. (Arcos y Flores, 2007)

8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

OBJETIVOS

RESUMEN DEL MARCO TEÓRICO

INTRODUCCIÓN

1. MARCO REFERENCIAL

1.1. Antecedentes

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Fuentes de energía eléctrica

2.1.1. Fuentes de energía renovable

2.1.2. Fuentes de energía no renovables

2.2. Generadores Distribuidos Renovables

2.2.1. Clasificación de Generadores Distribuidos
Renovables

2.2.1.1. Generadores despachables

2.2.1.2. Generadores no despachables

2.3. Ventajas de la generación distribuida

2.3.1. Beneficios económicos

- 2.3.1.1. Limitación de costos de construcción o expansión de líneas de transporte
 - 2.3.1.2. Mejorar la estabilidad energética y la resiliencia de los sistemas y actividades económicas
 - 2.3.2. Beneficios medioambientales
 - 2.3.2.1. Disminución de dispersión de partículas contaminantes
 - 2.3.2.2. Incremento de la cobertura eléctrica
 - 2.3.2.3. Confiabilidad del sistema debido a cortes de energía
 - 2.3.3. Beneficios técnicos
 - 2.3.3.1. Disminución de las pérdidas técnicas
 - 2.3.3.2. Control voltaje-potencia para calidad de suministro
- 2.4. Despacho en sistemas eléctricos
 - 2.4.1. Despacho a redes de distribución con fuentes de energía convencionales
 - 2.4.2. Despacho con generación distribuida
- 2.5. Gestión de despacho en sistemas eléctricos
 - 2.5.1. Sistema SCADA
 - 2.5.2. PMU
 - 2.5.3. UML
- 2.6. Simulación de redes de distribución con uso del *software* de NEPLAN
 - 2.6.1. Simulación de redes de distribución

3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

- 3.1. Revisión bibliográfica

- 3.2. Revisión para elaboración de protocolo de coordinación y operación con las centrales
- 3.3. Identificación del problema a investigar
- 3.4. Elaboración de los perfiles de generación-demanda diarios, mensuales y anuales
- 3.5. Diseño de los escenarios modelo
- 3.6. Simulación de los escenarios modelados
- 3.7. Presentación y análisis de los resultados obtenidos

4. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

APÉNDICES

ANEXOS

9. METODOLOGÍA

El desarrollo de esta investigación se llevará a cabo con base en la metodología planteada, para el desarrollo del presente estudio del despacho óptimo de generación distribuida renovable en la red de distribución DEORSA.

9.1. Características del estudio

A continuación, se presentan las características del estudio.

9.1.1. Diseño

El diseño en el que se fundamenta la investigación es no experimental, porque el estudio del despacho óptimo de la generación distribuida, tomando en cuenta la demanda, como también la generación que percibe el circuito del cual se realizará la simulación, no se manipulará ninguna variable (de las cuales algunas son independientes y otras son dependientes). De esa manera, se analizará el comportamiento de las pérdidas y estabilidad del sistema, permitiéndonos hacer un estudio de tendencia, por lo cual el análisis de la investigación puede determinarse como longitudinal. Por último, las características propias de la red de DEORSA son las variables independientes, mientras que las repercusiones (sean negativas o positivas) que tuvo dicha red ante escenarios de máxima o mínima generación en presencia de generadores distribuidos son las variables dependientes.

9.1.2. Enfoque

El enfoque del estudio propuesto fue del tipo mixto. Por una parte, lo cuantitativo en esta investigación se basa en el análisis de la implementación del despacho óptimo en la red de distribución DEORSA. Se utilizarán diferentes procedimientos, basados en la medición del impacto que posee dicha red ante eventuales escenarios de generación escasa o excesiva de los generadores distribuidos, ya que estos son datos susceptibles de cuantificar; a su vez, serán mediciones de tipo continuo, asociados a datos porcentuales de pérdidas de potencia y variación de voltaje, que servirán para su posterior análisis. Por otro lado, la parte cualitativa resulta de la recopilación de información necesaria para detallar un protocolo, para la correcta coordinación y operación entre despachador y generador distribuido, procediendo de lo establecido en las normas comerciales publicadas por el AMM.

9.1.3. Alcance

La presente investigación se realizó de manera descriptiva y de tipo pronóstico, dado que esta se centrará en analizar aspectos concretos de la implementación de un despacho óptimo, los cuales no habían sido analizados a profundidad en el tema de generación distribuida. Lo anterior, permitirá efectuar medidas correctivas y mitigación de pérdidas a nivel de red, como también de parte del usuario generador y de la distribuidora; estas podrían ser más complejas respecto de su contexto particular y geográfico, porque permitirán abordar nuevos problemas referentes a calidad energética en Guatemala. Además, dicho estudio se puede categorizar de manera documental, ya que para obtener los insumos para la realización de las simulaciones se realizó la consulta de documentos y tratamiento de la información, para obtener los resultados esperados.

9.2. Unidades de análisis

La población objeto de estudio en la presente investigación son los generadores distribuidos renovables de la zona oriente del país, conectados a la red de distribución perteneciente a DEORSA. Se evaluará el comportamiento de implementación de despacho, bajo un escenario modelo que resultó del análisis de los parámetros eléctricos de potencias y voltajes resultantes; así como la condición con que actualmente operan dichos generadores, con el fin de validar la estabilidad del mismo.

9.3. Variables

Las variables que se analizarán serán la variación de voltaje del sistema en términos porcentuales, las pérdidas de potencia y el factor de potencia. A continuación, en la tabla I, se presentará la descripción de las variables que se evaluarán en el presente estudio.

Tabla I. Definición de variables

Variable	Definición teórica	Definición operativa
Voltaje nominal del sistema [kV]	Se denomina así al valor de la tensión eléctrica para el cual fue diseñada la red. Para DEORSA los valores de los circuitos son de 13.8 kV o 34.5 kV.	Será usado como parámetro para cuantificar la calidad del servicio eléctrico por parte del distribuidor en presencia de GDR.
Índice de desbalance de tensión [%]	Es la tolerancia admitida en la desviación porcentual, respecto de las tensiones nominales. Está definida por el nivel tensión nominal y resultante de salida del circuito de la red de distribución.	Se obtendrá por medio del uso de la herramienta Neplan, para las simulaciones y determinar de esta manera si el valor porcentual se encuentra dentro de los límites permisibles.
Pérdidas de potencia [kW, MW]	Estas representan la diferencia entre la potencia que ingresa a la red con la que es entregada al usuario final.	Se obtendrá por medio de información proporcionada por ENERGUATE, en la que se utilizará <i>power BI</i> para obtener los flujos de carga horarios a partir de simulaciones.
Factor de potencia	Es una medida de la eficiencia o rendimiento de nuestro sistema eléctrico. Este indicador mide el aprovechamiento de la energía.	Se obtendrá por medio de información proporcionada por ENERGUATE, en la que se utilizará Neplan para obtener los flujos de carga horarios a partir de simulaciones.

Fuente: elaboración propia, hecho con Word 2016.

Tabla II. Definición operativa de las variables

Variable	Propiedad	Escala de medición	Dimensiones
Voltaje nominal del sistema [kV]	Numérica discreta	Razón	<ul style="list-style-type: none"> Voltaje
Índice de desbalance de tensión [%]	Numérica continua	Intervalo	<ul style="list-style-type: none"> Voltaje
Pérdidas de potencia [kW, MW]	Numérica continua	Intervalo	<ul style="list-style-type: none"> Demanda Potencia activa
Factor de potencia	Numérica continua	Intervalo	<ul style="list-style-type: none"> Potencia activa. Potencia reactiva.

Fuente: elaboración propia, hecho con Word 2016.

9.4. Fases del estudio

A continuación, se describen las fases que comprenderán este estudio.

9.4.1. Fase uno: revisión bibliográfica

Se hará una exploración sobre los conceptos generales de la generación distribuida, sus características, estructura y funcionamiento dentro de una red de distribución, con el objetivo de sentar las bases analíticas y críticas para el presente estudio. Se hará énfasis en los beneficios que se derivan de una correcta aplicación y gestión. Para lograrlo se realizará una revisión y consulta de fuentes bibliográficas relacionadas con la temática tratada, con artículos científicos, normas, libros e informes a nivel nacional e internacional.

9.4.2. Fase dos: revisión para elaboración de protocolo de coordinación y operación con las centrales

Se tratará el tema de los protocolos de coordinación y operación en un despacho, sus procedimientos, metodologías, especificaciones y condiciones técnicas mínimas de aplicación, para establecer los criterios de una operación segura y eficiente; tendrá la finalidad de asegurar un balance generación-carga con esta penetración de generación distribuida en la red.

Para la elaboración del mismo es necesario hacer una revisión de las normas comerciales del administrador del mercado mayorista; extraer lo indispensable con la finalidad de que sea aplicable a las necesidades para el ejercicio de dichas funciones. Finalmente, este servirá de uso interno en la distribuidora, con el propósito de que ellos consideren lo adecuado a sus pretensiones.

Se procederá a leer todos los requisitos acerca de la elaboración de un documento de esta índole; luego se analizará cada uno de los aspectos que se han incluido para tener una interpretación, la cual se llevará a cabo con revisiones bibliográficas y reuniones con el asesor del trabajo de graduación.

9.4.3. Fase tres: identificación del problema a investigar

El primer paso para saber el impacto de la GD en las pérdidas consiste en cuantificar este impacto. La necesidad de esta fase surge porque inicialmente la distribuidora debe realizar un estudio técnico para la localización y optimización del uso de la generación distribuida; con ello, evitar un impacto negativo en los parámetros de la calidad de suministro. Aunado hasta el momento en que se realizará la conexión del generador distribuido a la red, genera un margen en el que pueden variar las condiciones, restricciones y limitaciones operativas bajo las cuales se evaluó la autorización.

Por lo tanto, con los datos proporcionados se debe sentar un precedente que justifique y demuestre que existe una dificultad en la red actual, en cuanto al perfil de tensión, calidad de suministro y modificación de los flujos de potencia, ya que en Guatemala no existe un documento de consulta pública que permita al lector constatar e identificar tal inconveniente.

9.4.4. Fase cuatro: elaboración de perfiles de generación-demanda diarios, mensuales y anuales

Como punto de partida, para entender y determinar los efectos de la Generación Distribuida en el sistema de distribución de la empresa DEORSA, es necesario estudiar el comportamiento de la demanda eléctrica, lo cual nos permitirá conocer la demanda máxima y mínima del circuito en análisis. Esto

nos brindará la oportunidad de cuantificar y planear la generación adecuada de un despacho operacional, para cumplir con las restricciones de demanda y seguridad del sistema.

Para lograrlo se utilizará la base de datos proporcionada por ENERGUATE, que incluye los valores obtenidos de la medición primaria de los equipos, los cuales generan potencia, voltaje. Estas corrientes son medidas cada quince minutos y de esta manera se establecen los flujos de generación y carga horarios, para conocer las posibles variaciones de carga y principalmente las condiciones de generación, ya que, por ser una fuente renovable, se debe adecuar a las características del clima.

La importancia de esto radica en el factor de potencia. En la operación de los sistemas de distribución incide en que muestra la forma en que puede presentarse una variación de tensión, vista desde el punto de alimentación primaria; es decir, vista desde la barra. La operación de una GDR, en donde el flujo de potencia reactiva sea más significativo que la potencia activa, buscará elevar el nivel de tensión en la cual está conectado, especialmente en el caso de la red de distribución DEORSA, que idealmente es un circuito con tensión regulada. Por lo tanto, por medio de los perfiles de generación se podrá velar por los conflictos, para mantener los criterios operativos de la variación de tensión dentro de la tolerancia permisible en el sistema.

Los perfiles también nos ayudarán en el cálculo económico de las pérdidas que se tienen en la red de distribución, ya que por medio de ellos se podrá observar la generación excedente para la demanda, específicamente menor.

- Fase cinco: diseño de los escenarios modelo

Para determinar las repercusiones que tendrá la red por el despacho óptimo, debido a la generación distribuida, deberá realizarse la modelación del escenario del sistema por medio del *software* de NEPLAN, que permite la simulación de flujos de potencia; pero a la vez, se pueden modelar los componentes de la red eléctrica con sus características y parámetros.

Los parámetros que se tomarán en cuenta en la modelación serán:

- Red equivalente: se utilizará para representar el circuito en estudio de una manera simplificada.
 - Líneas de distribución: únicamente se tomarán en cuenta los parámetros eléctricos propios de la línea, como la característica y longitud del conductor.
 - Cargas: en este parámetro se incluye la demanda que posee el circuito, la cual debe alimentarse.
 - Unidades de Generación Distribuida: acá se incluirán fuentes de generación que se adapten a las características que poseen. Dentro de la simulación, estos valores irán variando para verificar las condiciones de los escenarios que se describirán a continuación:
- Demanda máxima
 - Demanda mínima

Lo anterior nos permitirá obtener los valores de voltaje en los diferentes puntos del sistema, pérdidas de potencia, la cargabilidad en los elementos de la red de distribución y evaluar el rendimiento a medida que se incremente o disminuya la potencia de las unidades de generación.

9.4.5. Fase seis: simulación de los escenarios modelados

Esta es la parte más importante del estudio, ya que en esta etapa se obtendrán los resultados que sustentarán el análisis e interpretación. Permitirá validar lo que en la fase tres se plantea, pero también dará una pauta para pronosticar y anticipar lo que sucederá en la red cuando el operador desee saber sobre los aspectos técnicos, así como en las situaciones cambiantes en que se encuentra el sistema de distribución. A la vez, permitirá que se use de manera didáctica para el centro de control. Facilita la lectura de los perfiles de generación-demanda, para la correcta y adecuada toma de decisiones en beneficio de la red y que se tenga un mejor aprovechamiento de lo que hay a disposición. Con ello, se espera aportar a la reducción de pérdidas de energía, incrementar la productividad y competitividad de los generadores conectados al sistema, mejorar la calidad de la energía y que un futuro próximo permita aumentar la capacidad de alojamiento de fuentes de energías renovables en la distribuidora, así como una apropiada gestión.

9.4.6. Fase siete: presentación y análisis de los resultados obtenidos

Los resultados de las simulaciones realizadas se presentarán al llevar a cabo los escenarios planteados, para corroborar si es viable implementar un despacho óptimo. Así mismo, dentro del análisis será importante considerar que en la introducción de generación distribuida en los sistemas de distribución,

además del beneficio económico y una correcta gestión, se debe asegurar la fiabilidad, seguridad y calidad de suministro en el sistema de distribución, el cual debe cumplir con las restricciones técnicas de los criterios operativos. Debido a que en algunas de ellas su fuente primaria de energía es variable, como es el caso de la energía eólica o solar, no existe garantía de que se cumplan los criterios operativos mencionados. En este punto es donde se deben hacer las correcciones necesarias para velar por una armonía entre la generación y la demanda.

9.5. Resultados esperados

A continuación, se presentará una tabla que contiene las preguntas de investigación, los objetivos planteados, las fases que responden a cada objetivo y los resultados que tendrán cada uno de ellos.

Tabla III. **Resultados esperados**

Preguntas de investigación	Objetivos	Fase de investigación	Resultados esperados
Pregunta principal	General	Fase III, IV y VII	Ser capaces de definir si una regulación en la generación distribuida, por medio de un despacho, proporciona los beneficios positivos a la red para cumplir en su operación diaria en cuanto a la seguridad, fiabilidad y calidad del suministro.
¿Cuál es el beneficio de la implementación de un despacho de las centrales de generación distribuida, con base en la curva de demanda de carga de una red de distribución?	Analizar el impacto de la ejecución de un despacho óptimo de centrales de Generación Distribuida Renovable, en la red de distribución DEORSA durante el primer trimestre de 2022.	Identificación del problema. Elaboración de perfiles de generación-demanda diarios, mensuales y anuales Presentación y análisis de los resultados obtenidos.	

Continuación de la tabla III

Preguntas de investigación	Objetivos	Fases de investigación	Resultados esperados
Auxiliares	Específicos	Fase V y VI	Determinar si la operación de los generadores en sus parámetros actuales está correctamente ajustados de acuerdo a la demanda, con el fin de evitar un impacto importante en los niveles de tensión y flujos de potencia.
¿De qué manera se puede evaluar el impacto de las pérdidas en la infraestructura de la red actual con la planificación de un despacho óptimo?	Estimar, por medio de simulaciones, las repercusiones que poseen los flujos de potencia en la infraestructura de la red de distribución a través de los generadores que están en análisis.	Diseño de los escenarios modelo. Simulación de los escenarios modelados	
¿Qué aspectos se deben tomar en cuenta para el establecimiento de los protocolos de operación y despacho para velar por el cumplimiento y cubrimiento de la demanda?	Detallar protocolos de coordinación y operación de las distintas centrales distribuidas con el centro de control de la distribuidora, para el abastecimiento adecuado de la demanda local.	Fase I y II Revisión bibliográfica Revisión para la elaboración de protocolo de coordinación y operación con las centrales.	Proporcionar las directrices técnicas necesarias al operador en la toma de decisiones, para lograr el perfil de operación más aceptable entre la generación distribuida aislada en la red y la demanda local, acordes a las restricciones mismas de la red.
¿Cómo se puede determinar el impacto económico en la distribuidora, con el aumento de la eficiencia en la calidad del producto de una generadora distribuida renovable?	Proponer una metodología de cálculo del impacto económico que percibe la distribuidora, asociado al monto de generación que se encuentra fuera del despacho óptimo.	Fase IV Elaboración de perfiles de generación-demanda diarios, mensuales y anuales.	Por medio de los perfiles de generación y de cada circuito a evaluar, obtener la sumatoria de la generación excedente a la demanda, para que posteriormente se asocie a la tarifa de pago por kilovatio hora.

Fuente: elaboración propia, hecho con Word 2016.

10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

A efecto de cumplir con los objetivos planteados en la investigación, es importante detallar las herramientas y técnicas que se utilizarán para llevar a cabo el análisis de toda la información obtenida.

10.1. Recopilación de datos

Se solicitará información del registro de las mediciones primarias de los equipos pertenecientes a ENERGUATE, que están contenidas en la base de datos.

10.2. Elaboración de perfiles de generación y demanda

Se evaluará la condición actual de los generadores, entre su generación y la demanda perteneciente al circuito en el que se encuentran conectados por medio del uso de Power BI. Emplearemos la técnica de visualización temporal, que nos permitirá representar los datos de alto volumen numérico en una forma visual, más fácil de procesar. De esta manera, se tendrá una forma significativa de contrastarlos para mostrar los cambios que se producen de forma continua durante un período determinado, lo cual mostrará un panorama general para la toma de decisiones, que será útil para la simulación de los escenarios que se realizarán.

10.3. Simulación de escenarios

Por medio de los perfiles contrastados se podrá definir lo que origina el estudio de la simulación, se establecerán o construirán los escenarios para cada caso con el uso de NEPLAN. Se asumirá en cada uno la variación continua en sus horarios de mínima y máxima, generación y demanda, para determinar y cuantificar los alcances y limitaciones de la interacción de estos con la red eléctrica.

En este punto es necesario subrayar que se requiere un escenario pesimista, un optimista y un intermedio para que la variable de respuesta sea realmente relevante. Dentro del desarrollo de la investigación esto juega el papel más importante, ya que para dicha implementación de despacho podrá usarse de manera didáctica por los operadores. Por medio de ello podrán actuar de manera intuitiva, conocerán los aspectos técnicos asociados a los perfiles horarios realizados y simulados, y este modo incluirlo en los procedimientos de operación y coordinación.

10.4. Evaluar la seguridad y estabilidad del sistema

Con los datos obtenidos de las simulaciones se realizará el análisis de seguridad y estabilidad del sistema, porque se tendrán los valores resultantes de voltaje, potencia activa y potencia reactiva de cada caso respecto de los valores nominales de la red eléctrica de la distribuidora. Además, se tendrá un indicador de desbalance de tensión, con el cual se sabrá cuánto se desvía del valor que otorga un confiable suministro del servicio.

10.5. Análisis de datos

Con los datos obtenidos de las simulaciones se evaluarán de manera predictiva los resultados finales de los escenarios. Esto es importante porque permitirá crear una planificación para tomar decisiones futuras, ya que se toma en consideración lo sucedido (gracias al análisis e interpretación de datos históricos confiables), por qué ha sucedido, qué puede pasar y qué acciones deben tomarse como medidas de prevención o corrección, de ser necesario.

10.6. Realización de tablas

Luego de haber analizado todos los datos, se procede a realizar tablas para tener una mejor apreciación de los resultados. Estas tablas nos darán una mejor lectura de los objetivos planteados.

12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

El estudio lo llevará a cabo el estudiante con apoyo del *software* de NEPLAN, Power BI (ambos de acceso libre) y las herramientas e insumos proporcionados por ENERGUATE para su desarrollo. Se cuenta con el permiso para utilizar la información de la base de datos, efectuar las simulaciones necesarias y hacer un análisis de las evaluaciones resultantes.

En la tabla IV se presenta un detalle de los gastos que se proyectan para la realización del estudio.

Tabla IV. **Gastos del estudio**

Descripción	Costo
Honorarios para el asesor	Q. 700.00
Matrícula estudiantil	Q.1,031.00
Cursos restantes de la maestría	Q. 6,600.00
Papelería	Q. 100.00
Materiales de impresión	Q. 150.00
Servicios de electricidad e internet	Q. 2,300.00
Imprevistos	Q. 500.00
Total	Q.11,381.00

Fuente: elaboración propia, hecho con Excel 2016.

Los gastos descritos en la tabla IV serán cancelados por el estudiante. Dado que esa cantidad es accesible y se cuenta con los recursos suficientes para la investigación, el trabajo de investigación es factible.

REFERENCIAS

1. Abdullah, A.M. (2012). *Calculation of Load Point Indices of Distribution Systems Due to Inserting a DG Device in Radial Systems*. Conferencia IEEE PES innovative smart grid technologies. Congreso llevado a cabo en Columbia, Estados Unidos.
2. Arias, L. A., García, D.F. y Rivas, E. (2013). Modelo de gestión de redes de distribución mediante UML y BPL. *Revista Tecnura*, 17(37), 109-120. Recuperado de <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/Tecnura/article/view/6915?articlesBySameAuthorPage=2>
3. Arias, L.A., Rivas, E. y León, L.M. (2017). Propuesta de modelo de Gestión para redes eléctricas con Generación Distribuida a través de Unidades de Medición Fasorial. *Revista Información tecnológica*, 28 (2), 15-28. Recuperado de https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-07642017000200003&script=sci_abstract
4. Caicedo, E. (2021). *Control MCP distribuido para el despacho óptimo de potencia reactiva y activa en microrredes* (tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Colombia. Recuperado de <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/79601/1085321613.2021.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

5. Comisión Económica para América Latina (2022). *Síntesis de definiciones clave para la transición energética en México*. Chile: Autor.
6. Comisión Económica para América Latina (2013). *Energía: Una visión sobre los retos y oportunidades en América Latina y el Caribe*. Chile: CAF.
7. Comisión Nacional de Energía Eléctrica (2008). *Norma Técnica de Generación Distribuida Renovable y usuarios autoprodutores con excedentes de energía NTGDR* (Resolución CNEE-227-2014). Guatemala: Autor.
8. Dulau, L.I., Abrudean, M. y Bica, D. (2014). Distributed Generation Technologies and Optimization. *Revista Procedia Technology*, 12, 687-692. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212017313007354>
9. Dumitru, C.D. y Gligor, A. (2014). A Management Application for the Small Distributed Generation Systems of Electric Power Based on Renewable Energy. *Revista Procedia Economics and Finance*, 15(14), 1428-1437. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221256711400608X>
10. González, N.Y., Cusgüen, C., Mojica, E. y Pavas, A. (2017). Estrategias de control de calidad de energía en microrredes rurales, *Revista UIS Ingenierías*, 16(2), 93-104. Recuperado de

<https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistausingenierias/article/view/5746/6943>

11. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. (2014). *Guía Metodológica: Uso y acceso a las energías renovables en territorios rurales*. Costa Rica: Autor.
12. Labandeira, X., Linares, P., y Würzburg, K. (2012). Energías renovables y cambio climático. *Revista Cuadernos Económicos de ICE*, 83(s.n.), 37-59. Recuperado de <https://doi.org/10.32796/cice.2012.83.6032>
13. Larios Vasquez, A. (2014). La energía renovable en México: perspectivas desde el Balance Nacional Energía 2012. *Revista Economía Informa*, 385(s.n.), 90-99. Recuperado de <http://www.economia.unam.mx/assets/pdfs/econinfo/385/07lariosvazquez.pdf>
14. Martínez, A.C. y Caro, R. (2010). Fuentes energéticas. *Revista La Nueva Geopolítica de la Energía*, (s.n.), pp. 21-34. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4548648>
15. Montoya, O.D., Grajales, A., Grisales, L.F. y Castro, C.A. (2017). Ubicación y Operación Eficiente de Almacenadores de Energía en Micro-redes en presencia de Generación Distribuida. *Revista CINTEX*, 22(1), 97-117. Recuperado de <https://revistas.pascualbravo.edu.co/index.php/cintex/article/view/290>

16. Nair, N.-K.C. y Zhang, L. (2009). Smart Grid: Future networks for New Zealand power systems incorporating distributed generation. *Revista Energy Policy*, 37(9), 3418-3427. Recuperado de <http://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.03.025>
17. NEPLAN (s.f.). *Evaluación de Redes de Distribución para la Conexión de Generación Distribuida con NEPLAN*. Recuperado de: <https://gers.com.co/backend/wp-content/uploads/2021/02/Brochure-Generacion-Distribuida.pdf>
18. Calderón, L.R. (24 de mayo, 2007). La Generación Distribuida en Redes e Instalaciones Eléctricas [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://www.mundohvacr.com.mx/2007/06/la-generacion-distribuida-en-redes-e-instalaciones-electricas-2>
19. Organización Latinoamericana de Energía (2010). *Guía práctica de la energía, consumo eficiente y responsable*. Ecuador: Autor.
20. Ramos, E. (2020). La generación distribuida: El camino hacia la producción descentralizada de electricidad y pautas para su reglamentación. *Revista de Derecho*. 8(11), 07-35. Recuperado de <https://doi.org/10.21678/forseti.v8i11.1255>.
21. Rivera, S.R. y Dorado, S.A. (2018). Contribuciones en la modelación de energía renovable en sistemas de potencia. *Revista Ontare*, 6(s.n.), 7-34. Recuperado de <https://doi.org/10.21158/23823399.v6.n0.2018.2362>

22. Ruiz, S., Colmenar, A., Mur, F. y López, A. (2014). Integration of distributed generation in the power distribution network: The need for smart grid control systems, communication and equipment for a smart city – Use cases. *Revista Renewable and Sustainable Energy*, 38(s.n.), 223-234. Recuperado de <http://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.082>
23. Torres Riveros, J. y Rivera, S. (2018). Despacho de energía óptimo en múltiples períodos considerando la incertidumbre de la generación a partir de fuentes renovables en un modelo reducido del sistema de potencia colombiano. *Revista AVANCES: INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA*, 15(1), 48-58. Recuperado de <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.4732>
24. Treballe, D.T., Marín, P.F., Maza, J.M. y Martínez, J. L. (2012). El control de tensión en redes de distribución con Generación Distribuida (I). *Revista Anales de Mecánica y Electricidad*, 13(s.n.), 21-28. Recuperado de https://revista-anales.icaei.es/web/n_13/pdf/seccion_3.pdf
25. TRECESA (17 de enero, 2022). Los beneficios de la expansión y modernización de la red eléctrica [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://www.trecsa.com.gt/noticias-informacion-corporativa/los-beneficios-de-la-expansion-y-modernizacion-de-la-red-electrica/>

26. Salazar, G.B., Chusin, L. y Escobar, S. (2015). Análisis de confiabilidad de sistemas de distribución eléctrica con penetración de generación distribuida. *Revista Politécnica*, 36(1), 35. Recuperado de https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/508