

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA MADRE Y MAESTRA
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**



**MODELADO DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE EDENORTE EN SOFTWARE DE
CÓDIGO ABIERTO (OPENDSS + QGIS)**

Un Proyecto de Grado presentada como requisito parcial para optar por el título de
Ingeniero Eléctrico Concentración Sistema Eléctricos de Potencia e Ingeniero Electromecánico
Concentración Eléctrico en la Pontificia Universidad Católica Madre y Maestra.

Por:

Rafael Antonio Pérez Batista
Moisés Andrés Ureña Guzmán

Asesor: Ing. Abraham Espinal, MS
Profesor, Escuela de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

**Santiago de los Caballeros, República Dominicana
Agosto, 2023**

**Todos los conceptos expuestos
en la presente investigación son de
exclusiva responsabilidad del autor.**

Asesor: Ing. Abraham Espinal, MS
Profesor, Escuela de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a quienes han impulsado mi carrera académica con gran respeto y sincera gratitud. A mi familia, en especial a mis padres y hermanos, cuyo inquebrantable apoyo y sacrificios me han permitido seguir adelante. A mis amigos, por su apoyo y comprensión durante mis momentos de reclusión. A mis mentores, cuyos conocimientos y consejos moldearon mi desarrollo intelectual. Este trabajo refleja su fe en mí y estoy feliz de celebrar su finalización con usted. Gracias por convertirse en pilares de fortaleza para mí a lo largo de este viaje.

Rafael Pérez

Dedico este proyecto de grado a mis abuelos Manuel de Jesús Ureña y Ana Celeste Blanco, que en paz descansen. Gracias a ellos y a mi familia he podido seguir adelante siendo un hombre de bien. También por haberme educado para ser un buen profesional dispuesto ayudar a los demás. De igual forma a mi Familia por siempre apoyarme y brindarme su ayuda en todo momento. Y Finalmente a mis primos por siempre mantenerse positivos y darme felicidad en los momentos más difíciles.

Moisés Ureña

AGRADECIMIENTOS

Quisiéramos agradecer a Dios en primer lugar por permitirnos a pesar de los obstáculos poder presentar dicho proyecto. A nuestras familias por ser pacientes y siempre brindarnos su apoyo durante estos años y todo el proceso que pasamos para graduarnos. También agradecer al ing. Joan Núñez de parte de EDENORTE quién siempre estuvo al tanto y dando soporte en el desarrollo del proyecto siempre manteniendo la iniciativa y el optimismo de nuestro desarrollo. Del mismo modo, agradecer al ing. Ramón Emilio Grullón por guiarnos en los procesos finales del proyecto y mostrándonos su apoyo desde un principio.

Por otro lado, agradecer a nuestro asesor el ing. Abraham Espinal por no permitirnos rendirnos durante el desarrollo y siempre incentivarnos a mejorar para seguir adelante y motivarnos a nunca darse por vencidos a pesar de las adversidades.

En general, agradecer a todos aquellos que nos brindaron apoyo y estuvieron presente durante el desarrollo del proyecto de investigación. Honor especial al ing. Juan José Pichardo quién nos tuvo paciencia y nos ayudó en la fase final de la investigación.

Rafael y Moisés

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO I: ASPECTOS INTRODUCTORIOS.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN	2
1.2 ANTECEDENTES DEL ESTUDIO	4
1.3 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA.....	6
1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	7
1.5 DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA.....	9
1.6 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	10
1.7 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	11
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	12
2.1 RED DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA.....	13
2.1.1 Subestación de distribución	13
2.2 COMPONENTES DE UNA SUBESTACIÓN DE DISTRIBUCIÓN.....	14
2.2.1 Transformador.....	14
2.2.2 Interruptores (breakers).....	14
2.2.3 Switchgear.....	14
2.2.4 Barra colectora	15
2.2.5 Regulador de voltaje	15
2.2.6 Sistema de protección contra rayos.....	15
2.2.7 Sistema de protección y control.....	15
2.2.8 Equipos de protección y monitoreo	16

2.2.9	Sistema de puesta a tierra.....	16
2.3	REDES INTELIGENTES	17
2.4	IMPACTO DE LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA EN LA RED.....	18
2.4.1	Principio de funcionamiento	19
2.4.2	Alta penetración de energía solar fotovoltaica.....	19
2.4.3	Impacto en la República Dominicana	20
2.5	INVERSORES FOTOVOLTAICOS CONECTADOS EN LA RED	22
2.6	CONTROLADOR MPPT	23
2.7	IMPACTOS CARGADORES DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS CONECTADOS A LA RED	24
2.7.1	Niveles de cargadores eléctricos	25
2.7.2	Caso de estudio de impacto de cargadores eléctricos	26
2.8	SOFTWARE DE MODELADO Y SIMULACIÓN DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA....	26
2.9	SOFTWARES GEORREFERENCIALES GIS	27
2.10	SOFTWARES DE CÓDIGO ABIERTO: VENTAJAS Y DESVENTAJAS	29
2.10.1	Ventajas del código abierto:	29
2.10.2	Desventajas del código abierto	30
2.11	COMPLEMENTO QGIS2OPENDSS	31
2.12	GUÍA DE REFERENCIA DE OPENDSS	33
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN		35
3.1	INTRODUCCIÓN	36
3.2	POBLACIÓN	36
3.3	DESCRIPCIÓN TÉCNICA DEL CIRCUITO DE NIBAJE (NIBA103).....	37
3.4	ESQUEMA DE LA INVESTIGACIÓN	41

3.5	RECURSOS UTILIZADOS EN EL DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN.....	43
3.6	ERRORES DE SIMULACIÓN DURANTE EL DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN	43
CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS		47
4.1	CASO DE ESTUDIO	48
4.2	PENETRACIÓN DE PANELES SOLARES EN FUNCIÓN AL FACTOR DE DEMANDA DEL CIRCUITO NIBA103	51
4.2.1	Impacto de la penetración PV en media tensión	53
4.2.2	Impacto de la penetración PV en baja tensión	55
4.3	PENETRACIÓN DE VE EN FUNCIÓN AL FACTOR DE DEMANDA DEL CIRCUITO NIBA103	56
4.3.1	Impacto de la penetración VE en media tensión.....	57
4.3.1	Impacto de la penetración PV en baja tensión	59
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES.....		61
BIBLIOGRAFÍA		64
APÉNDICE.....		66

LISTAS DE FIGURAS

FIG. 1: DIAGRAMA DE UNA SUBESTACIÓN DE DISTRIBUCIÓN.....	13
FIG. 2: IMPACTO GRÁFICO DE LAS DIFERENTES FUENTES DE ENERGÍA Y SU CAPACIDAD	21
FIG. 3: RADIACIÓN SOLAR EN LA REP. DOM.....	22
FIG. 4: DIAGRAMA DE CONEXIÓN DE LOS INVERSORES FV	23
FIG. 5: GRÁFICO [I] VS [V] PARA LA DETERMINACIÓN DE LA POTENCIA MÁXIMA EXTRAÍDA DE LOS PV	24
FIG. 6: REPRESENTACIÓN DE UN MODELADO DE RED DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA	27
FIG. 7: REPRESENTACIÓN DE CLIENTES EN NIBA103	37
FIG. 8: RED MT DEL CIRCUITO NIBA103	38
FIG. 9: RED BT DEL CIRCUITO NIBA103.....	39
FIG. 10 (PROMEDIO DE FALLAS O DISPAROS ANUAL 2023 DE NIBA103).....	40
FIG. 11: REPRESENTACIÓN NIBA103.....	48
FIG. 12: REPRESENTACIÓN NIBA103 UTILIZANDO VOLG101	50
FIG. 13: REPRESENTACIÓN GRÁFICA EN QGIS DE LA PENETRACIÓN PV	51
FIG. 14: GRAFICA DE LOS PERFILES DE VOLTAJE DE NIBA103 CON EL FLUJO DE PV ACTUAL	52
FIG. 15: PÉRDIDAS ELÉCTRICAS DEL CIRCUITO A MEDIDA QUE SE INCREMENTA LA PENETRACIÓN DE PV	54
FIG. 16: TRAMO ELEGIDO PARA LA SIMULACIÓN BT DE LOS PV	55
FIG. 17: REPRESENTACIÓN GRÁFICA EN QGIS DE LOS VE	56

FIG. 18: TRAMO ELEGIDO PARA LA SIMULACIÓN BT DE LOS VE.....	59
FIG. 19: EVOLUCIÓN IMPORTACIÓN VE A RD	66
FIG. 20: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA CONDUCTORES DESNUDOS DE ALEACIÓN DE ALUMINIO AAC	67
FIG. 21: PLACA TÉCNICA DEL TRANSFORMADOR DE POTENCIA DE NIBA103.....	67
FIG. 22: IZQUIERDA: CAMPO CREADO POR EDENORTE. DERECHA: CAMPO CREADO POR EL USUARIO BASADO EN LA GUÍA.	68
FIG. 23: INTERFAZ QGIS2OPENDSS.....	70
FIG. 24: CARACTERÍSTICAS DE LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN	71
FIG. 25: PÉRDIDAS MÁXIMAS EN LOS TRANSFORMADORES.....	71
FIG. 26: GRAFICA DE LOS PERFILES DE VOLTAJE DE NIBA103 CON EL FLUJO DE PV EN UN 20% DE PENETRACIÓN.....	72
FIG. 27: GRAFICA DE LOS PERFILES DE VOLTAJE DE NIBA103 CON EL FLUJO DE PV EN UN 40% DE PENETRACIÓN.....	72
FIG. 28: GRAFICA DE LOS PERFILES DE VOLTAJE DE NIBA103 CON EL FLUJO DE PV EN UN 60% DE PENETRACIÓN.....	73
FIG. 29: GRAFICA DE LOS PERFILES DE VOLTAJE DE NIBA103 CON EL FLUJO DE PV EN UN 80% DE PENETRACIÓN.....	73
FIG. 30: GRAFICA DE LOS PERFILES DE VOLTAJE DE NIBA103 CON EL FLUJO DE PV EN UN 100% DE PENETRACIÓN.....	74

LISTAS DE TABLAS

TABLA 1: LEYENDA CIRCUITO SIMULADO EN QGIS	48
TABLA 2: PARÁMETROS ACTUALES DE PENETRACIÓN PV DEL CIRCUITO NIBA103.	52
TABLA 3: IMPACTO DE LA PENETRACIÓN PV EN MT DEL CIRCUITO NIBA103	53
TABLA 4: IMPACTO DE LA PENETRACIÓN PV EN BT DEL CIRCUITO NIBA103	55
TABLA 5. IMPACTO DE LA PENETRACIÓN VE EN MT DEL CIRCUITO NIBA103	57
TABLA 6: IMPACTO DE LA PENETRACIÓN VE EN BT DEL CIRCUITO NIBA103	59

RESUMEN

En la actualidad, República Dominicana está pasando por una transición energética, trayendo consigo el surgimiento y masificación de nuevas tecnologías como los vehículos eléctricos, sistemas de generación distribuida y almacenamiento, entre otras fuentes de energía. En respuesta a estas nuevas tecnologías, se estableció como objetivo el poder analizar y determinar el impacto que puede presentar la incorporación y penetración de los vehículos eléctricos y paneles solares en la red de distribución de la ciudad de Santiago de los Caballeros, específicamente en un circuito del sector de Nibaje siendo este el NIBA103. Para ello, se utilizaron herramientas de simulación y código abierto QGIS y OPENDSS más el complemento de traducción QGIS2OPENDSS en donde se realizaron corridas de flujos de carga a diferentes escenarios de penetración vehicular y concentración de paneles solares evaluando el comportamiento de la red de distribución analizando la demanda máxima del transformador de potencia asociado al circuito, pérdidas, tensión de las redes MT, tensión de las redes BT, caída de tensión e intensidad de corriente en el alimentador de la red. Los resultados obtenidos de las simulaciones permiten afirmar y visualizar que la infraestructura y capacidad del circuito actual no está apta para soportar una penetración considerable de paneles solares y vehículos eléctricos. En los resultados se puede evidenciar como el circuito NIBA103 al incrementar los flujos de penetración de ambas cargas las pérdidas permisibles fueron superadas. Con estos datos resultantes, se verificó que tan efectivo es el modelado de redes de distribución con softwares de código abierto y su implementación en las empresas de distribución eléctrica de la Republica Dominicana.

CAPÍTULO I: ASPECTOS INTRODUCTORIOS

1.1 Introducción

El aumento de la demanda eléctrica e incorporación de nuevas fuentes de energía renovables, en donde se puede evidenciar cómo en parte de la República Dominicana, el surgimiento y masificación de nuevas tecnologías como los vehículos eléctricos, sistemas de generación distribuida y almacenamiento (paneles solares), entre otros [1]. A raíz, de estas nuevas cargas anexadas a la red del sistema eléctrico de potencia del país, no se tiene constancia de manera exacta la calidad y distribución del servicio de energía eléctrico tomando en cuenta dicho tipos de cargas acopladas a la red y qué posibles tipos de implicaciones técnicas y tecnológicas se presentan con los actores principales. Es decir, clientes activos consumidores-generadores, clientes consumidores con poder de decisión sobre su demanda y la empresa de distribución eléctrica (EDENORTE), debido a estas cargas altamente aleatorias como lo son los vehículos eléctricos y paneles solares [2].

De modo que, como establece el título del proyecto de estudio técnico e investigativo propuesto y mediante a la contribución de EDENORTE se presentará un modelado de red de distribución de uno de los circuitos del sector de Nibaje en Santiago de los Caballeros, Rep. Dominicana por medio de un código abierto y la utilización de herramientas computacionales o softwares competentes referentes al tema para el análisis de comportamiento de dicho circuito al aumentar el factor de demanda de dichas cargas.

Uno de los simuladores propuestos a utilizar durante el desarrollo de este proyecto es OPENDSS el cual es una herramienta integral de simulación de sistemas de energía eléctrica principalmente

para sistemas de distribución de energía de servicios públicos eléctricos. El cual es compatible con casi todos los análisis de dominio de frecuencia (estado estacionario sinusoidal) que se realizan comúnmente en los sistemas de distribución de energía de las empresas y/o instituciones eléctricas. Además, admite muchos tipos nuevos de análisis que están diseñados para satisfacer las necesidades futuras relacionadas con la red inteligente, la modernización de la red y la investigación de energías renovables. De modo que, el desarrollo de dicha simulación estará también complementado con QGIS otro software el cual mediante su creciente gama de capacidades a través de sus funciones básicas y complementos. Puede visualizar, gestionar, editar, analizar datos, y diseñar mapas imprimibles.

En sentido general, el desarrollo de modelado de la simulación de dicho circuito tiene como propósito el analizar, identificar y cuantificar la demanda que tiene este tipo de cargas y las posibles fallas que se puedan detectar y/o generar simulando varios escenarios en cuestión, para observar el comportamiento del circuito de ese sector y como va interactuando en la red.

1.2 Antecedentes del estudio

El modelado de redes de distribución en software de código abierto ha sido una herramienta trascendental desde la introducción de esta tecnología. El software de código abierto es un software desarrollado y mantenido a través de una colaboración abierta, y está disponible, generalmente sin costo alguno, para que cualquiera lo use, examine, altere y redistribuya como quiera. En el aspecto eléctrico, se han llevado a cabo un sinnúmero de investigaciones, pruebas y análisis utilizando simulaciones elaboradas en softwares de código abierto, principalmente en OpenDSS. Aunque es cierto que existen algunas limitaciones en dichos softwares, cabe destacar que han ayudado realizar mejoras y casos de estudio que tienen suma importancia.

El documento más relacionado al tema a tratar fue escrito por un conjunto de ingenieros de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Costa Rica en el año 2016. El propósito de este documento es describir un complemento de software que genera el modelo de red OpenDSS directamente desde un entorno de software GIS de código abierto. El complemento no solo evita la exportación de archivos, sino que también permite actualizaciones simples del modelo de red en caso de que se realice un cambio o corrección en la base de datos GIS. El complemento puede detectar partes desconectadas, así como datos incorrectos o faltantes. Además, asigna un perfil de demanda a cada carga en función del tipo y uso de energía de los clientes. Este complemento es una de una serie de herramientas que se están desarrollando para ayudar a los ingenieros eléctricos a analizar la tecnología Smart Grid. [3]

El fragmento titulado “Modelado y simulación de sistemas activos de distribución eléctrica utilizando el OpenDSS” usa las capacidades de modelado del programa de código abierto OpenDSS, esta investigación describió técnicas para abordar dificultades específicas que pueden surgir en las redes de distribución de energía a medida que aumenta la adopción de GD. Se discutieron los efectos de los grandes niveles de penetración de GD en las redes de distribución, cubriendo no solo los efectos técnicos sino también los económicos. Se examinaron las funcionalidades inteligentes de los inversores de energía, ya que estos dispositivos tienen un potencial significativo para desempeñar un papel clave en la operación y el control de los futuros sistemas de energía. Las herramientas de modelado y análisis de OpenDSS se describieron en detalle, cubriendo los aspectos clave para modelar cargas, unidades de almacenamiento, sistemas fotovoltaicos y otros componentes eléctricos lineales y no lineales.

El artículo “Análisis de Sobretensiones Internas en Devanados de Transformadores durante Transitorios en Redes Eléctricas” examina el efecto de fenómenos transitorios en un modelo de una red eléctrica de media tensión durante operaciones de maniobra y fallas a tierra sobre sobretensiones en sistemas de aislamiento interno de devanados de transformadores. La investigación se basa en simulaciones de sobretensiones en devanados de transformadores realizadas en el Programa de transitorios electromagnéticos/Programa de transitorios alternativos (EMTP/ATP) utilizando un modelo con parámetros concentrados de devanados de transformadores. La investigación analiza cómo la longitud de la línea de cable y el valor de la resistencia de falla a tierra afectan las distribuciones internas de sobrevoltaje.

El documento “Interfaz Python-OpenDSS de código abierto para simulación híbrida de estudios de impacto fotovoltaico” describe una herramienta de simulación Python-OpenDSS de código abierto en la que el software de simulación de fasores OpenDSS se interconecta con una herramienta de simulación de tipo de programa transitorio electromagnético (EMT) escrita en Python. La herramienta está destinada a realizar un análisis del efecto de la integración fotovoltaica (PV) en los sistemas de distribución. Se compone de un modelo EMT de un sistema fotovoltaico conectado a la red y un modelo fasorial de red de distribución. La herramienta sugerida es un complemento que amplía las capacidades de OpenDSS para realizar varios estudios de impacto de PV que OpenDSS no puede realizar intrínsecamente debido a la necesidad de un modelado integral.

1.3 Antecedentes del problema

Los problemas con la red eléctrica en Rep. Dominicana no son recientes, es evidente que estas complicaciones presentan un trasfondo tanto político, económico y social que por consecuencia afectan la red eléctrica desde la generación, transmisión, distribución y su consumo.

Tomando en cuenta, que Santiago de los Caballeros es la segunda ciudad con mayor concentración poblacional en la Rep. Dominicana y es aprovisionada del servicio eléctrico mediante la distribuidora eléctrica EDENORTE. Está claro que al pasar el tiempo la misma se ha visto envuelta en diversos problemas técnicos en sus circuitos principalmente en las redes de distribución que a su vez afectan el servicio que proporcionan. Es decir, al fin al cabo el

resultado que brindan a los clientes no es el eficiente debido a las fallas técnicas que presentan en las redes de distribución.

Actualmente, en Santiago de los Caballeros está experimentando una alta demanda de energía (Que seguirá evolucionando al pasar el tiempo). A su vez la incorporación de fuentes renovables y el surgimiento de nuevas tecnologías para el transporte (vehículos eléctricos). A raíz de estas cargas acoplarlas a la red, no se tiene constancia de manera exacta la calidad y distribución del servicio de energía eléctrico tomando en cuenta dicho tipos de cargas acopladas a la red y qué posibles tipos de implicaciones técnicas y tecnológicas se presentan con los actores principales (Clientes - Consumidores, Clientes - Generadores y la misma distribuidora).

La idea de realizar este proyecto de investigación es que a través de análisis y simulaciones mediante softwares de código abierto presentar casos particulares en unos de los circuitos de Santiago poder analizar las implicaciones y/o fallas que se presentan éstos al aumentar la demanda de dichas cargas y así mediante la contribución con EDENORTE poder proporcionar soporte para casos futuros y mejorar la calidad de energía brindada en la red.

1.4 Planteamiento del problema

Actualmente el país se encuentra en penuria de medios para la mejora del sistema eléctrico nacional. Por lo cual, evaluar los impactos potenciales del aumento de los recursos de energía distribuida y los equipos de sistemas de distribución avanzados de una manera más integral, es necesario establecer entornos de simulación unificados, eficientes y altamente precisos. La

problemática principal que se presenta para este tipo de investigación es que cada propuesta debe estar sustentada, es decir, debe ser puesta a prueba lo cual, en el caso particular de las redes eléctricas, normalmente no es posible de realizar o analizar para una red real en operación.

Por ende, para evitar estos inconvenientes, existen softwares que permiten emular el funcionamiento de la red eléctrica de forma simulada, permitiendo probar el comportamiento de los sistemas diseñados en un entorno controlado y libre de posibles daños. Dichas herramientas de simulación dependen de modelos de componentes y técnicas de análisis numérico. Por ende, el modelado de componentes y el análisis de sistemas también son elementos clave en el diseño, la optimización y la gestión en tiempo real de los sistemas de distribución eléctrica.

No obstante, la cuestión precisa de la investigación es analizar el comportamiento de microrred dentro de uno de los circuitos de Nibaje, Santiago de los Caballeros (NIBA103) por medio de su modelado y simulación usando el programa computacional OpenDSS y la ayuda de QGIS como complemento, con el propósito de analizar los efectos contraproducentes que generan los diferentes tipos de cargas, qué consecuencias futuras traerá el aumento de fuentes renovables y vehículos eléctricos en ese circuito, además de cómo influiría dicho análisis para EDENORTE en cuestión de mejorar la calidad de energía y soporte a la red.

Por lo tanto, la elección de dicho circuito es basada tomando en cuenta el crecimiento que presenta el sector tanto a nivel residencial como comercial y la alta demanda energética que va obteniendo al pasar los años. A su vez, teniendo como referencia el circuito de Villa Olga

el cual ya presenta regulación de fuentes fotovoltaicas y evitar dicha regulación en las redes de distribución de la zona norte en un futuro.

1.5 Delimitación del problema

La presente investigación se delimitó en cuanto a diferentes aspectos como su área geográfica, unidad de análisis y por el tiempo en que fue desarrollada la investigación. Por lo tanto, el proyecto se realizó en uno de los circuitos del sector de Nibaje en Santiago de los Caballeros. El cual es un sector que, al pasar los años, al igual que otros sectores de la misma ciudad han aumentado al nivel poblacional y por ende aumentado en cuanto a demanda energética se refiere.

El circuito electo es el NIBA103 el cual presenta lugares de mucha importancia y demanda, entre ellos se encuentra el Hospital Regional Universitario Cabral y Báez, el ayuntamiento, el centro médico de Cibao, entre otros. Por lo tanto, el proceso de investigación se conformó por las siguientes unidades de análisis la primera está constituida por el Departamento de redes de EDENORTE y la segunda por el proyecto de investigación “Plataforma de datos abiertos para el análisis espacial de la resiliencia energética y comunitaria” realizado por Ramon Emilio de Jesús Grullón, Dartiza Nicodemo Santana, Oscar Atahualpa López, Abraham Espinal y Rafael Omar Batista en el circuito de Villa Olga utilizando el complemento y guía QGIS2OPENDSS.

Por último, se debe de tomar en cuenta el tiempo que se ha desarrollado la investigación la cual tuvo lugar en dos periodos académicos de la Pontificia Universidad católica Madre y

Maestra (PUCMM). La primera etapa en Enero – Abril (2-2022-2023) para la propuesta de proyecto y Mayo – Agosto (3-2022-2023) para la realización de proyecto.

1.6 Justificación de la investigación

En casi todos los ámbitos de la vida, es una práctica común crear modelos, generalmente en versiones reducidas, para representar situaciones de la vida real. Los modelos se crean para una variedad de propósitos. No importa cuál sea el propósito, los modelos permiten visualizar una condición dada de la vida real y analizar los impactos que tendría si se introdujera un aspecto en el que uno está interesado.

En este proyecto, la simulación y solución de mucho de los problemas que enfrenta hoy en día el país hará que en el futuro cercano se logre un avance en la distribución eléctrica nacional. Se va a requerir de mucho tiempo y paciencia en la búsqueda de la mejor solución posible a las fallas que ocurren hoy en día. Una red de distribución eléctrica bien diseñada y mantenida garantiza un suministro de electricidad confiable y constante, lo que reduce la probabilidad de cortes e interrupciones de energía. Además, una mejor red de distribución eléctrica puede incorporar tecnología de red inteligente, que permite monitorear y administrar la red eléctrica en tiempo real, mejorando su confiabilidad y eficiencia.

1.7 Objetivos de la investigación

a) Objetivo general:

- Modelar y simular el circuito de Nibaje (NIBA103), localizado en Santiago de los Caballeros, Rep. Dominicana. Para analizar el comportamiento de dicha red de distribución por medio del programa computacional OpenDSS en complementación con QGIS (QGIS2OPENDSS).

b) Objetivos específicos:

- Analizar los aspectos tecnológicos y regulatorios relativos a las redes inteligentes en el circuito NIBA103 en la ciudad de Santiago de los Caballeros, Rep. Dom.
- Identificar la efectividad de la realización del modelado de redes de distribución utilizando software de código abierto.
- Analizar los efectos y/o implicaciones técnicas y tecnológicas que podría causarles tanto a clientes activos consumidores-generadores, clientes consumidores con poder de decisión sobre su demanda y a la empresa de distribución eléctrica (EDENORTE) al incorporar cargas altamente aleatorias como lo son los vehículos eléctricos y recursos fotovoltaicos.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Red de distribución eléctrica

2.1.1 Subestación de distribución

Normalmente, el sistema de distribución comienza con la subestación de distribución, que es alimentada por una o más líneas de subtransmisión (Ver Fig. 1). En determinadas circunstancias, la subestación de distribución se alimenta directamente de una línea de transmisión de alta tensión y no es probable que exista un sistema de subtransmisión. Esto difiere de una empresa a otra. Cada subestación de distribución dará servicio a uno o más alimentadores principales. Salvo casos excepcionales, los alimentadores son radiales, lo que implica que la electricidad fluye desde la subestación de distribución hasta el consumidor a través de una sola línea.

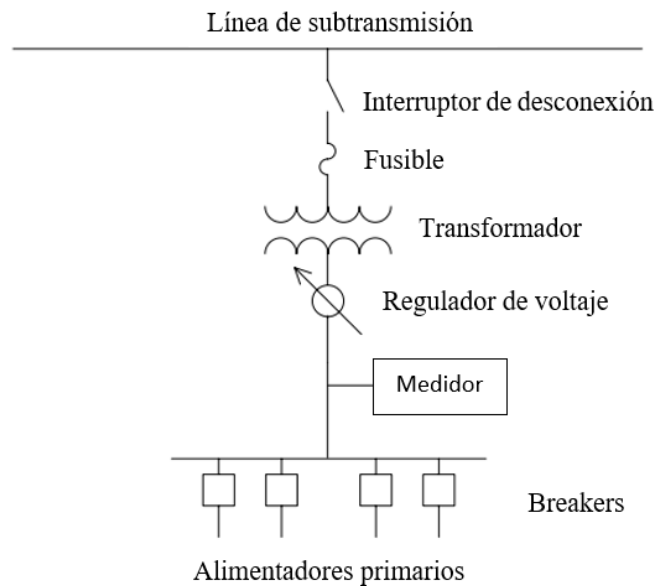


Fig. 1: Diagrama de una subestación de distribución

Fuente: Tomada de [4]

2.2 Componentes de una subestación de distribución

2.2.1 Transformador

El transformador es el componente principal de una subestación de distribución. El dispositivo reduce el alto voltaje de las líneas de transmisión a un voltaje más bajo que es apropiado para propósitos de distribución. Los transformadores se clasifican en varios tipos, incluidos los transformadores llenos de aceite, de tipo seco y montados en pedestal.

2.2.2 Interruptores (breakers)

Los interruptores automáticos se emplean para salvaguardar el sistema de distribución contra sobrecargas y fallas. Los disyuntores están diseñados para interrumpir la corriente eléctrica en caso de falla o condición anormal. Esto sirve para proteger el equipo de daños y mantener la seguridad de la red de distribución.

2.2.3 Switchgear

Switchgear se refiere a una colección de dispositivos utilizados con el propósito de controlar, proteger y aislar equipos eléctricos. Los componentes de un sistema eléctrico pueden incluir interruptores de desconexión, fusibles y disyuntores. Switchgear facilita la ejecución segura de actividades de mantenimiento y resolución de problemas en equipos de subestaciones.

2.2.4 Barra colectora

Las barras colectoras son barras conductoras que se utilizan como punto de conexión central para múltiples componentes dentro de una subestación. Son los encargados de distribuir la energía eléctrica desde el transformador hasta los distintos alimentadores y equipos.

2.2.5 Regulador de voltaje

Los reguladores de voltaje se emplean en las subestaciones de distribución para garantizar un nivel de voltaje constante en las líneas de distribución, lo que garantiza electricidad estable y confiable para los consumidores.

2.2.6 Sistema de protección contra rayos

Los pararrayos se utilizan para proteger las subestaciones y sus equipos contra sobretensiones resultantes de la caída de rayos u otros sucesos transitorios. Redirigen el alto voltaje a tierra para proteger la subestación de posibles daños.

2.2.7 Sistema de protección y control

Los sistemas de control y protección comprenden relés, sensores y paneles de control, los cuales son responsables de monitorear el funcionamiento de las subestaciones y reaccionar ante condiciones anormales. Contribuyen a la seguridad y eficacia del sistema de distribución.

2.2.8 Equipos de protección y monitoreo

El equipo de medición y monitoreo se refiere a los dispositivos utilizados para medir el flujo de electricidad en una subestación. Estos dispositivos se utilizan con fines de facturación y control. El equipo de monitoreo se utiliza para rastrear parámetros como el voltaje, la corriente y la calidad de la energía.

2.2.9 Sistema de puesta a tierra

Un sistema de puesta a tierra bien diseñado es crucial para garantizar la seguridad. El sistema de puesta a tierra facilita la disipación segura de las corrientes de falla hacia el suelo, minimizando así el potencial de descarga eléctrica y manteniendo la estabilidad eléctrica de la subestación.

2.3 Redes inteligentes

Diseñada hace décadas, la red eléctrica convencional era predominantemente unidireccional, lineal e incapaz de adaptarse al panorama energético dinámico y diverso de hoy. A medida que la población mundial se expande y los estilos de vida modernos se vuelven más intensivos en energía, las limitaciones de esta infraestructura convencional se vuelven cada vez más evidentes. La necesidad de una red de energía más adaptable y resistente se destaca por problemas como las interrupciones de energía, las ineficiencias en la distribución de energía, la integración limitada de fuentes de energía renovable y la respuesta inadecuada a las fluctuaciones de la demanda.

Presentamos la red inteligente: una red eléctrica modernizada que utiliza tecnología de la información, sistemas de comunicación y automatización para abordar estos desafíos de frente. Una red inteligente, en su base, facilita la comunicación bidireccional entre los proveedores de electricidad y los consumidores, otorgando a ambas partes acceso a datos en tiempo real y control sobre el consumo y la distribución de energía. Incorpora un conjunto integral de tecnologías y estrategias que aumentan la flexibilidad de la red, optimizan el uso de la energía, reducen el impacto ambiental y aseguran la confiabilidad de la red a pesar de los eventos disruptivos.

La red eléctrica es responsable de transportar la electricidad desde las centrales eléctricas hasta los usuarios residenciales y comerciales. Para este propósito se utilizan dos sistemas principales, el Sistema de Transmisión (TS) y el Sistema de Distribución (DS). Las

subestaciones de transmisión (TS) toman la electricidad generada en las centrales eléctricas y la transmiten a las subestaciones de distribución (DS), donde luego se distribuye a los hogares y empresas. El término "red eléctrica" se ha utilizado a menudo para referirse a un sistema de transmisión vinculado basado en analógico.

Las redes inteligentes, por otro lado, es una frase genérica que abarca una amplia gama de características destinadas a mejorar la confiabilidad y la eficiencia del sistema eléctrico. Un sistema de control y comunicaciones digitales se encuentra en el corazón de una red inteligente, que está diseñado para mejorar la confiabilidad, la eficiencia y la rentabilidad de la red de distribución de electricidad. [5]

2.4 Impacto de la energía solar fotovoltaica en la red

Los paneles solares, que aprovechan la irradiación del sol para generar electricidad, se han convertido en una tecnología viable en la búsqueda de fuentes de energía sostenibles y ambientalmente aceptables. Los paneles solares han ganado cada vez más atención como una alternativa limpia, sostenible y factible a las fuentes de energía existentes a medida que el mundo enfrenta la apremiante tarea de alejarse de los combustibles fósiles y reducir los efectos del cambio climático. Este fragmento presenta los paneles solares profundizando en sus conceptos fundamentales, su impacto a la red y su impacto en la República Dominicana.

2.4.1 Principio de funcionamiento

A través del método fotovoltaico, el panel solar recibe energía fotónica y la convierte en electricidad. La potencia de corriente directa generada se convierte en cargas de corriente alterna adecuadas para uso residencial. Los paneles solares se componen de varias celdas solares que están conectadas en serie y en paralelo para generar una cantidad específica de energía. Debido a que una sola celda fotovoltaica solo puede proporcionar alrededor de 0.5 voltios, no es práctico para la mayoría de los propósitos. Por ejemplo, cuando se conectan seis celdas en serie, se supone que cada celda tiene la misma corriente que una sola celda y un voltaje ideal de 3 voltios (6 de 0.5 voltios). Para aumentar la capacidad de corriente, las celdas en serie también se conectan en paralelo. Si seis celdas pueden producir 2 amperios, un sistema en serie-paralelo de doce celdas debería proporcionar 4 amperios y 3 voltios. [6]

2.4.2 Alta penetración de energía solar fotovoltaica

Los beneficios ambientales de los paneles solares son uno de los motivos más convincentes para usarlos. A diferencia de los combustibles fósiles, la generación de energía solar emite pocos gases de efecto invernadero, lo que ayuda a reducir el dióxido de carbono y otros contaminantes que contribuyen al cambio climático. Podemos reducir nuestro impacto ambiental, mejorar la calidad del aire y crear un paisaje energético más limpio y sostenible cambiando a la energía solar. Si bien la energía solar tiene numerosas ventajas, su alta penetración en la combinación energética puede presentar una serie de desafíos que deben abordarse para garantizar un sistema energético confiable y sostenible.

Con su generación impredecible, la penetración de la energía solar fotovoltaica (PV) presenta diferentes dificultades de estabilidad de la red en la operación del sistema de distribución. El problema principal es un aumento considerable de voltaje en el alimentador de distribución, lo que hace que los equipos de control de voltaje existentes, como los cambiadores de tomas en carga y los reguladores de voltaje de línea, funcionen con más frecuencia. Como resultado, se reduce la vida operativa del mecanismo de control de voltaje.

El crecimiento de la penetración fotovoltaica y los desafíos resultantes han acelerado la incorporación de inversores solares fotovoltaicos avanzados para mitigar los impactos potenciales de una alta penetración solar fotovoltaica. Los inversores fotovoltaicos modernos, a diferencia de los inversores fotovoltaicos tradicionales, son reconocidos como inteligentes porque pueden proporcionar funcionalidades más avanzadas que simplemente convertir la salida de corriente continua de los paneles solares en corriente alterna. [7]

2.4.3 Impacto en la República Dominicana

Según reporte el Organismo Coordinador, la República Dominicana tiene una capacidad instalada en potencia de 5,647.2 MW (esto incluye carbón, gas natural, fuel oil No.2, fuel oil No.6, Biomasa, hidroeléctrica, eólica y solar) (Ver Fig. 2). La energía solar conforma un 10.3% de la potencia instalada en todo el país. [8]

Capacidad Instalada [MW]

[08/04/2023]

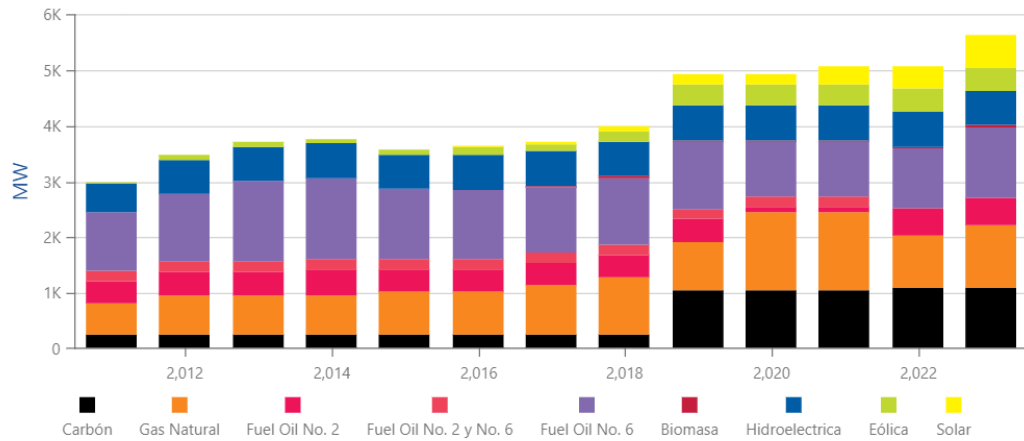


Fig. 2: Impacto gráfico de las diferentes fuentes de energía y su capacidad

Fuente: Tomada de [8]

En República Dominicana se utiliza la energía solar, especialmente para calentar agua y proporcionar energía en lugares remotos y aislados. El estudio SWERA (Evaluación de recursos de energía solar y eólica) del Fondo para el Medio Ambiente Mundial analizó la cantidad de energía solar que se podría utilizar en la República Dominicana. La cantidad promedio de luz solar que llega a un área plana varía de 5,25 a 5,50 kWh/m² por día en la mitad este del país a entre 5,50 y 6,00 kWh/m² por día en la mitad occidental (Ver Fig. 3). Este número tiene que ser alto y permite utilizar calentadores solares, sistemas solares fotovoltaicos y, en teoría, incluso plantas de energía solar fotovoltaica y plantas termosolares conectadas al SENI. [9]

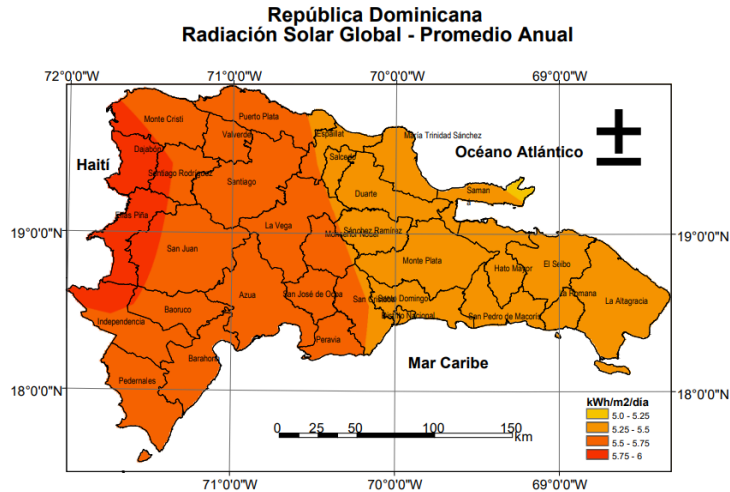


Fig. 3: Radiación solar en la Rep. Dom.

Fuente: Tomada de [9]

2.5 Inversores fotovoltaicos conectados a la red

Convertir electricidad de corriente continua (CC) en corriente alterna (CA) es una de las muchas funciones que puede realizar un inversor. Como resultado del rápido crecimiento de la tecnología de electrónica de potencia, ha habido un aumento en el número de sistemas fotovoltaicos conectados a la red. Debido a que funciona como un conducto a través del cual el sistema solar fotovoltaico y la red eléctrica pueden comunicarse entre sí, el inversor es un componente esencial de los sistemas fotovoltaicos conectados a la red. Después de recibir una señal de baja y alta de acuerdo con la disponibilidad de la red, el inversor comenzará el proceso de isla. En un sistema conectado a la red con una sola etapa, el inversor es responsable tanto del MPPT como de la sincronización con la red (Ver Fig.4).

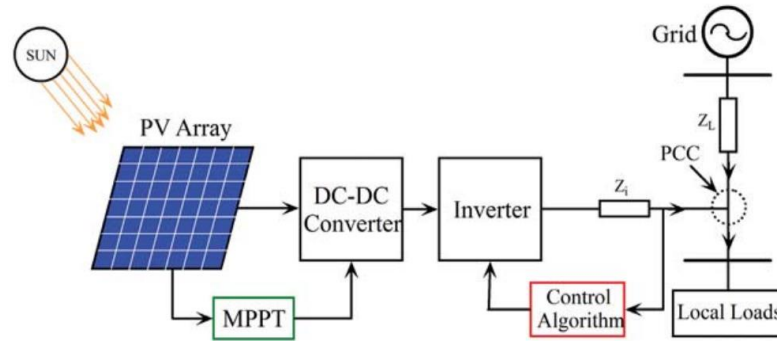


Fig. 4: Diagrama de conexión de los inversores FV

Fuente: Tomado de [10]

Tanto el seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) de los paneles solares como el voltaje en el punto de acoplamiento común (PCC) deben ser sinusoidales y al mismo nivel de voltaje de la red para que un sistema conectado a la red funcione correctamente. Las empresas de servicios públicos de todo el mundo pueden acudir a una variedad de grupos internacionales para obtener orientación sobre el cumplimiento de ciertos requisitos. [10]

2.6 Controlador MPPT

El controlador MPPT es el mecanismo que hace funcionar el PV para recolectar la mayor cantidad de electricidad. La eficiencia del sistema fotovoltaico aumenta si el controlador opera a propósito en MPP, independientemente de las condiciones meteorológicas. Esto debería lograrse sincronizando correctamente la fuente fotovoltaica con la carga para cualquier condición climática a fin de lograr la máxima potencia de salida.

La potencia máxima se puede extraer de un conjunto fotovoltaico mediante uno de dos métodos: seguimiento mecánico o eléctrico. En el seguimiento mecánico, la orientación del panel fotovoltaico varía a medida que varían los meses y las estaciones a lo largo del año, pero en el seguimiento eléctrico, la curva IV se utiliza para ubicar el MPP (Ver Fig. 5).

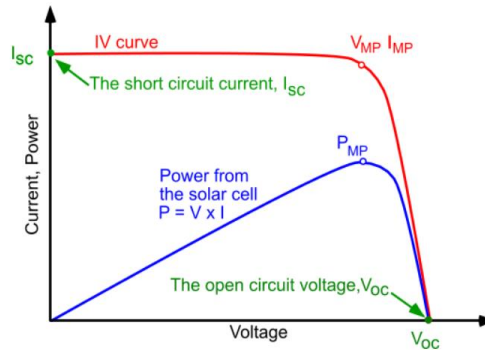


Fig. 5: Gráfico [I] vs [V] para la determinación de la potencia máxima extraída de los PV

Fuente: Tomada de [10]

MPPT es un componente esencial de los sistemas de energía contemporáneos que permite la máxima penetración de energía en la carga/baterías/motores y la red eléctrica para aplicaciones fuera y dentro de la red, respectivamente.

2.7 Impactos cargadores de vehículos eléctricos conectados a la red

La industria automotriz ha experimentado cambios significativos como resultado de la adopción generalizada de vehículos eléctricos (EV), lo que ha llevado a una transición notable hacia modos de transporte más amigables con el medio ambiente. Sin embargo, este cambio no se limita únicamente a los automóviles; también abarca la infraestructura subyacente. La

implementación de cargadores de vehículos eléctricos (EV) ha inaugurado una etapa novedosa en el ámbito de las redes de distribución de energía, por lo que ofrece varias perspectivas y plantea ciertos obstáculos. Esta introducción examina la influencia sustancial de los cargadores de vehículos eléctricos en la red eléctrica, aclarando cómo esta integración transforma los patrones de consumo de energía, los requisitos de infraestructura y la resiliencia de la red.

2.7.1 Niveles de cargadores eléctricos

Los cargadores de nivel 1 son los más comunes y básicos. Se cargan lentamente utilizando un tomacorriente doméstico de 120 voltios. Los vehículos eléctricos suelen venir con cargadores de nivel 1 que se conectan a tomas de corriente regulares. Son lentos, pero útiles para cargar durante la noche en casa.

Los cargadores de nivel 2 se cargan más rápido que los de nivel 1. Al igual que las secadoras, utilizan 240 voltios. Las estaciones de carga públicas, las empresas y los hogares tienen cargadores de nivel 2. Pueden cargar la mayoría de los vehículos eléctricos de forma rápida y diaria.

Los cargadores de nivel 3, a menudo conocidos como cargadores rápidos de CC o cargadores rápidos, cargan vehículos eléctricos rápidamente. Trabajan a mayores voltajes y corrientes para cargar rápidamente la batería del vehículo. Los cargadores de nivel 3 generalmente se encuentran en los puntos de carga de la autopista para recargas rápidas. La carga de nivel 3 requiere infraestructura especializada y capacidades del vehículo, por lo tanto, no todos los vehículos eléctricos pueden administrarla.

2.7.2 Caso de estudio de impacto de cargadores eléctricos

El análisis de un artículo del impacto de la integración de estaciones de carga rápida en el sistema de distribución de energía de una ciudad intermedia de América Latina, utilizando a Cuenca, Ecuador como estudio de caso, ofrece información valiosa. El estudio sugiere que una inversión modesta de alrededor de 1,2 millones de dólares para 23 estaciones de carga rápida podría respaldar una penetración inicial de vehículos eléctricos del 10% en el área urbana, proporcionando una solución económica en comparación con el consumo de combustibles fósiles.

El análisis técnico revela interrupciones menores, con una caída de voltaje mínima, cambios de flujo de energía manejables y cambios de distorsión armónica insignificantes. El potencial de reducción de las emisiones de CO₂ se alinea con los objetivos de movilidad sostenible, mientras que las consecuencias económicas y ambientales más amplias requieren una mayor investigación.

Esta investigación establece un marco para la implementación de infraestructura de carga rápida y la evaluación de impacto en entornos urbanos, lo que podría influir en estudios similares en ciudades intermedias de América Latina.

2.8 Software de modelado y simulación de sistemas de distribución eléctrica

Los sistemas de simulación en tiempo real (RT) juegan un papel crucial en el análisis de ingeniería eléctrica. Estos sistemas permiten la validación de diseños y facilitan la toma de decisiones al simular escenarios reales y generar y leer señales para interactuar con equipos

externos (Ver Fig. 6). Existe un gran interés en la ingeniería asistida por computadora en la industria eléctrica, ya que facilita el rápido desarrollo de metodologías, tecnologías y soluciones para abordar los desafíos actuales en este campo. Para abordar este problema, es imperativo proporcionar a los ingenieros de diseño y operación herramientas rentables que les permitan simular de cerca las mediciones del mundo real.

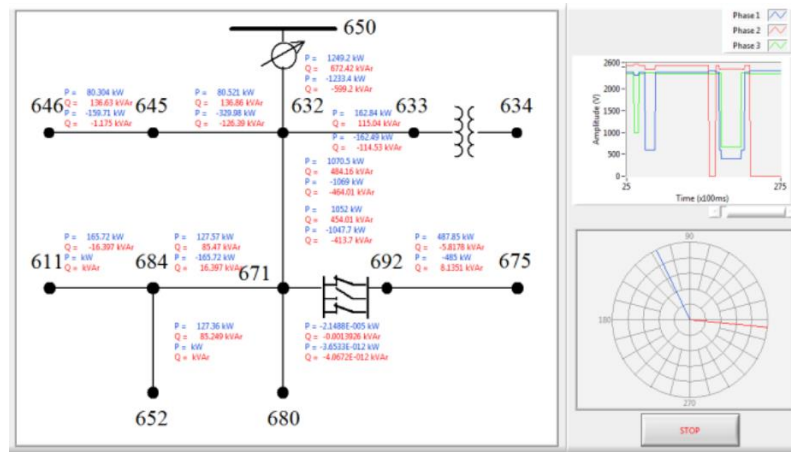


Fig. 6: Representación de un modelado de red de distribución eléctrica

Fuente: Tomado de [11]

2.9 Softwares georreferenciales GIS

La utilización del software del Sistema de Información Geográfica (SIG) es de suma importancia en el ámbito de la organización, el análisis y la representación visual de datos espaciales. El sistema incorpora varias características fundamentales, incluida la adquisición de datos de fuentes como GPS e imágenes satelitales, la organización y recuperación de datos, análisis espacial para la identificación de patrones y relaciones, la creación de mapas personalizables para una comunicación de datos eficiente, consultas geoespaciales para la

extracción de información específica y capacidades de modelado para simular escenarios del mundo real.

El software del Sistema de Información Geográfica (GIS) juega un papel crucial en la facilitación de los procesos de toma de decisiones por su capacidad para ofrecer información basada en el análisis de datos.

Además, promueve la cooperación entre equipos al proporcionar una plataforma para compartir y analizar información espacial. Además, el software GIS permite el estudio de datos distantes a través de mapas interactivos en línea, lo que mejora la accesibilidad y la usabilidad de la información geoespacial.

Las alternativas de software del Sistema de Información Geográfica (SIG) prominente incluyen ArcGIS, que proporciona un conjunto completo de herramientas para el análisis y la visualización de datos espaciales; QGIS, una alternativa de código abierto reconocida por sus amplias funciones y capacidades; GRASS GIS, un programa especializado diseñado específicamente para el análisis geoespacial avanzado; y MapInfo Professional, reconocido por su interfaz intuitiva y fácil de usar.

El software GIS es una herramienta esencial en el análisis espacial contemporáneo y los procesos de toma de decisiones debido a su capacidad para transformar la gestión de datos en varios dominios, incluida la planificación urbana y la gestión de desastres. Se anticipa que el

papel de la tecnología continuará expandiéndose a medida que avanza, permitiéndole abordar dificultades espaciales complejas en varias áreas.

2.10 Softwares de código abierto: Ventajas y desventajas

El Open Source, o código abierto, es un tipo de software que proporciona a los usuarios y a otros desarrolladores el acceso al código fuente. Esta libertad permite a cualquier persona en la comunidad de código abierto utilizar, modificar, distribuir y contribuir al código de la forma que desee. Además, el software de código abierto proporciona una plataforma para la colaboración, la innovación y la libertad de elección [12]. La idea central detrás del Open Source es dejar visible el código fuente de un determinado software para que cualquiera pueda estudiarlo y mejorarlo. Esto tiende a producir un desarrollo formidable de los softwares, además de mantener a los programadores y clientes más felices. [13] A pesar de ser algo innovador los softwares de código abierto presentan tanto ventajas como desventajas para el usuario dentro de estas se pueden destacar:

2.10.1 Ventajas del código abierto:

- a) Transparencia: Los programadores tienen la visibilidad total de la base del código, garantizando la transparencia de todos los datos y lo más importante es que no tienen riesgos de bloqueo.
- b) Libertad de uso: Permiten la reinstalación, en la cantidad de máquinas que el usuario necesite. Debido a que su licencia es aplicable se extienden los derechos a todos los usuarios.

- c) Control: No necesita que la empresa autora de la solución realice las actualizaciones ni corrija los errores.
- d) Adaptación: Se adapta a las necesidades individuales, a otros productos y también acepta la interacción con otros sistemas y herramientas, sin requerir de la aprobación de la organización creadora.
- e) Bajo costo: No tiene gastos de adquisición, siendo un beneficio al momento de revisar los costos de implementar una solución; pero debemos destacar que puede acarrear costos por soporte o si se requiere reforzar la seguridad.
- f) No caduca: No tiene dependencia de un solo proveedor, puesto que pertenece a la comunidad, por lo tanto, son los encargados del desarrollo y las actualizaciones, asegurando la continuidad del programa.

2.10.2 Desventajas del código abierto

- a) Costos a largo plazo: Pueden generarse costos por requerir de soporte, capacitación o resolución de fallas.
- b) Soporte específico: Aunque dentro de sus ventajas está el soporte por parte de comunidades y algunas empresas, se debe tomar en cuenta que no existe un ente al cual reclamar o que se pueda exigir algún soporte técnico, asimismo no existen garantías por parte de los creadores.

- c) Conocimientos técnicos: la configuración demanda de ciertos conocimientos para ser utilizado.
- d) Riesgos de seguridad informática: Si no cuenta con apoyo de especialistas y con un sistema de protección, podrían verse comprometida la seguridad de los datos.
- e) Tiempo de espera: En algunas ocasiones tienen errores en lo que se refiere a velocidad web, afectando la carga y descarga de datos.

2.11 Complemento QGIS2OPENDSS

La integración de los sistemas de información geográfica (GIS) y el análisis del sistema de energía ha revolucionado la forma en que se diseñan y administran las redes de distribución eléctrica. QGIS2OPENDSS, un complemento para QGIS, el software GIS de código abierto ampliamente utilizado se encuentra a la vanguardia de esta convergencia. Este complemento sirve como puente entre los datos espaciales capturados en QGIS y el software OpenDSS (Open Distribution System Simulator), traduciendo sin problemas las características geográficas en parámetros eléctricos. Esta introducción profundiza en la importancia y la funcionalidad del complemento QGIS2OPENDSS, aclarando su papel en la mejora de la precisión y la eficiencia del modelado y análisis del sistema de distribución eléctrica.

QGIS2OPENDSS aborda una necesidad crítica en la ingeniería de energía moderna al permitir un camino directo y eficiente entre los datos GIS y la simulación del sistema de distribución. A medida que las empresas de servicios públicos y los investigadores confían cada vez más en

los datos geoespaciales para informar la toma de decisiones, el complemento emerge como una herramienta valiosa para transformar la información geográfica en información procesable dentro del contexto de los sistemas de energía. Al aprovechar las capacidades de QGIS, una plataforma reconocida por su interfaz intuitiva y herramientas cartográficas versátiles, QGIS2OPENDSS agiliza el proceso de traducción de atributos espaciales como ubicaciones de nodos, longitudes de conductores y distribución de carga al formato requerido por OpenDSS.

La funcionalidad central del complemento radica en su capacidad para automatizar el proceso de conversión de datos, reduciendo la posibilidad de errores y ahorrando un tiempo valioso. Al extraer datos relevantes de las capas de QGIS, como características de puntos y líneas, y convertirlos en elementos compatibles con OpenDSS, como autobuses y líneas, QGIS2OPENDSS garantiza una transición fluida entre los datos espaciales y los parámetros eléctricos. Esta integración no solo mejora la precisión del modelado del sistema de distribución, sino que también promueve la colaboración interdisciplinaria, ya que los expertos en GIS y los ingenieros de energía pueden intercambiar datos sin problemas en un formato que se alinea con sus respectivas necesidades.

En resumen, el complemento QGIS2OPENDSS representa un avance fundamental en el ámbito del análisis del sistema de energía al cerrar la brecha entre GIS y el modelado de distribución eléctrica. Su papel para facilitar la traducción de datos espaciales en parámetros eléctricos procesables dentro del marco OpenDSS subraya su importancia para mejorar la precisión, la eficiencia y el potencial de colaboración del análisis del sistema de distribución.

A medida que los campos de GIS y la ingeniería energética continúan interceptándose, QGIS2OPENDSS se erige como un testimonio de las soluciones innovadoras que surgen en la encrucijada de la tecnología y la utilidad. [14]

2.12 Guía de referencia de OpenDSS

La "Guía de referencia de OpenDSS" es un recurso completo y autorizado diseñado para capacitar a los usuarios en la comprensión y el uso efectivo de las capacidades de OpenDSS (Simulador de sistema de distribución abierto). Esta guía sirve como un compañero esencial para personas en todos los niveles de experiencia, desde principiantes que exploran el análisis del sistema de distribución hasta profesionales experimentados que buscan conocimientos avanzados.

La guía comienza presentando a los lectores los conceptos fundamentales, la arquitectura y la instalación de OpenDSS. Luego navega a través del intrincado proceso de creación de modelos precisos del sistema de distribución, cubriendo componentes como transformadores, líneas y cargas. Una de sus características sobresalientes es su exploración exhaustiva de cómo OpenDSS emplea matrices de impedancia para analizar el flujo de energía y las condiciones de cortocircuito. A través de ejemplos detallados, los lectores adquieren las habilidades para interpretar los resultados de la simulación y tomar decisiones informadas para mejorar la confiabilidad y eficiencia del sistema de distribución.

La "Guía de referencia de OpenDSS" no es solo un manual; es un compañero de confianza que facilita una comprensión profunda de las capacidades de OpenDSS. Ya sea para académicos,

investigadores o ingenieros, esta guía equipa a los usuarios para aprovechar con confianza el poder de OpenDSS, lo que lo convierte en un recurso invaluable para dominar la simulación y el análisis de sistemas de distribución. [15]

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 Introducción

El sistema de modelado de distribución de redes a pesar de todas las informaciones y desarrollos modernos es una innovación que ya en años anteriores ha tenido bastante repercusión, no solo en el país sino al nivel internacional, donde se exige y se contempla mayor demanda energética. Sin embargo, el no seguir una estrategia metodológica adecuada y detallada para su desarrollo es sumamente complicado. De modo, que a través de este proyecto de investigación además de los análisis y recopilación de datos de diferentes artículos científicos y/o antecedentes de estudio se tomarán unas series de pasos que más adelante serán detalladas en el plan de trabajo mediante actividades específicas.

En general, al seguir correctamente paso a paso las estrategias o actividades mediante el uso de softwares de código abierto y en el enfoque que se quiere, se logrará analizar los efectos y/o implicaciones técnicas y tecnológicas que podría causarles tanto a clientes activos consumidores-generadores, clientes consumidores al incorporar cargas altamente aleatorias como lo son los vehículos eléctricos y recursos fotovoltaicos. Y con esos resultados obtenidos llegar a consolidar una propuesta para darle soporte de red de los generadores distribuido. A su vez, contemplar las dificultades y ventajas que se pueden presentar en los softwares de código abierto en el modelado de redes de distribución.

3.2 Población

La ejecución del proyecto está ubicada en el sector de Nibaje específicamente el circuito NIBA103 el cual posee 2,899 clientes dentro de los cuales 36 son clientes industriales, 948 son clientes comerciales y el resto son clientes residenciales.

3.3 Descripción técnica del Circuito de Nibaje (NIBA103)

El circuito NIBA103, el cual ocupa los sectores Centro de la Ciudad, Los Colegios, Cerros del Castillo, Reparto Panorama y Alcaldía de Santiago. Está conformado por 2,899 clientes totales. A su vez presenta 17,527 metros de red MT (Media tensión) (Ver Fig. 7) y 11,731 metros de red BT (Baja tensión) (Ver Fig. 8), consta de 286 transformadores totales y una sumatoria de potencia instalada de 40,609 KVA. Según reportes de EDENORTE este circuito, presenta fallos y/o disparos generalmente causados por apertura de jumper de línea, mantenimiento general de la subestación y mayormente de fuentes desconocidas (En general presenta un promedio de 2 a 4 disparos por día) (Ver Fig. 9).



Fig. 7: Representación de clientes en NIBA103

Fuente: Información suministrada de la simulación en QGIS (2023)

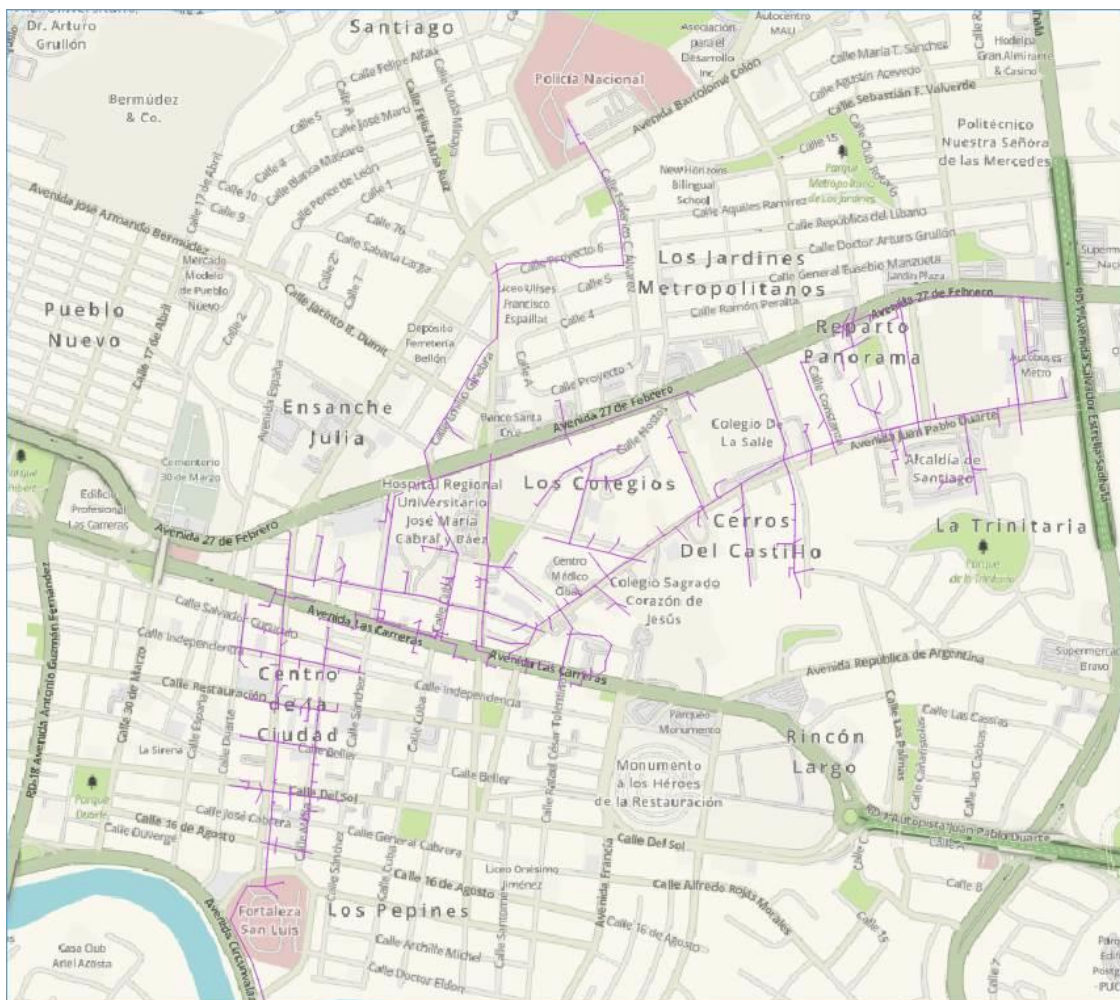


Fig. 8: Red MT del circuito NIBA103

Fuente: Información suministrada de la base de datos de EDENORTE (2023)

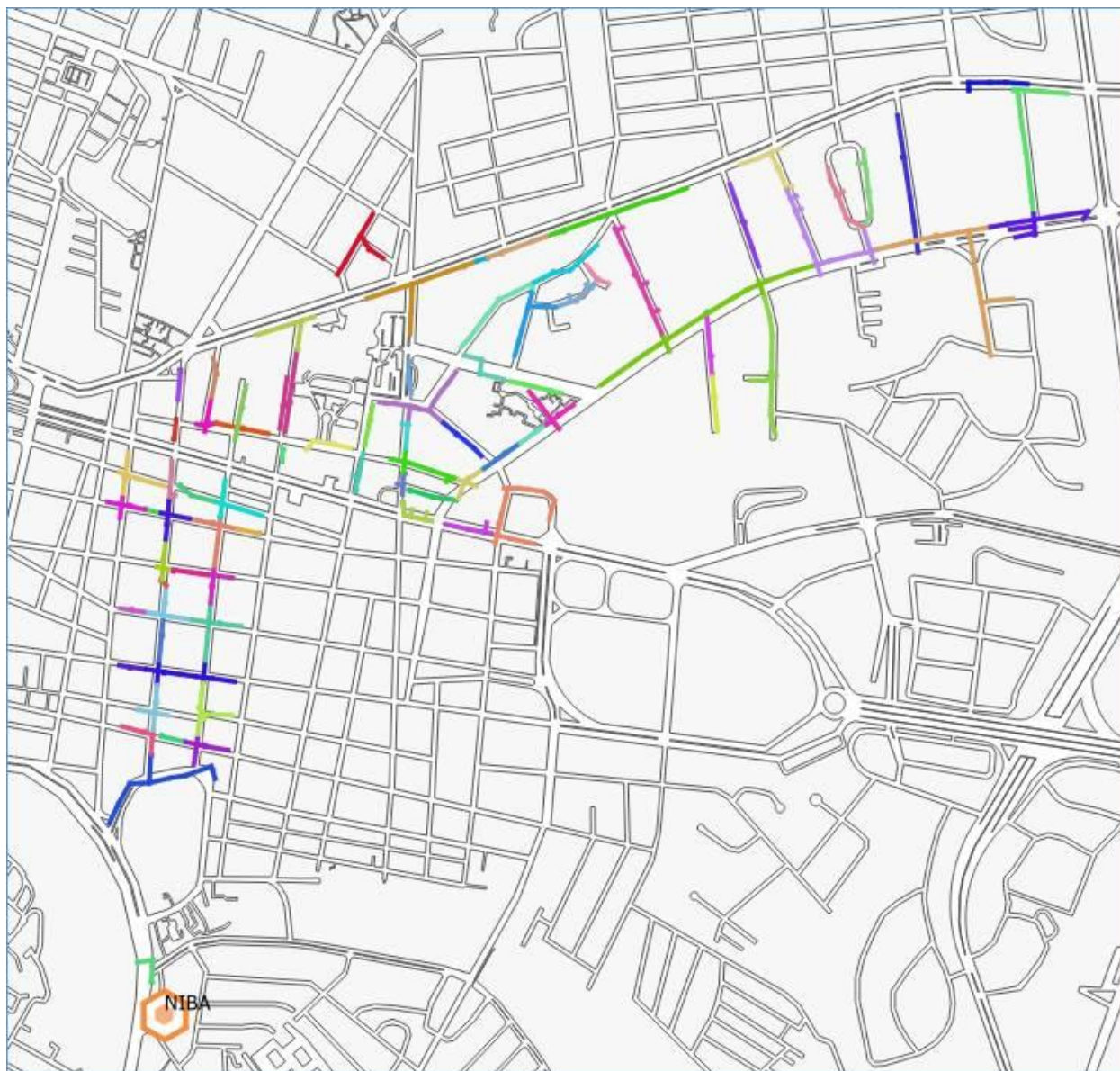


Fig. 9: Red BT del circuito NIBA103

Fuente: Información suministrada de la base de datos de EDENORTE (2023)

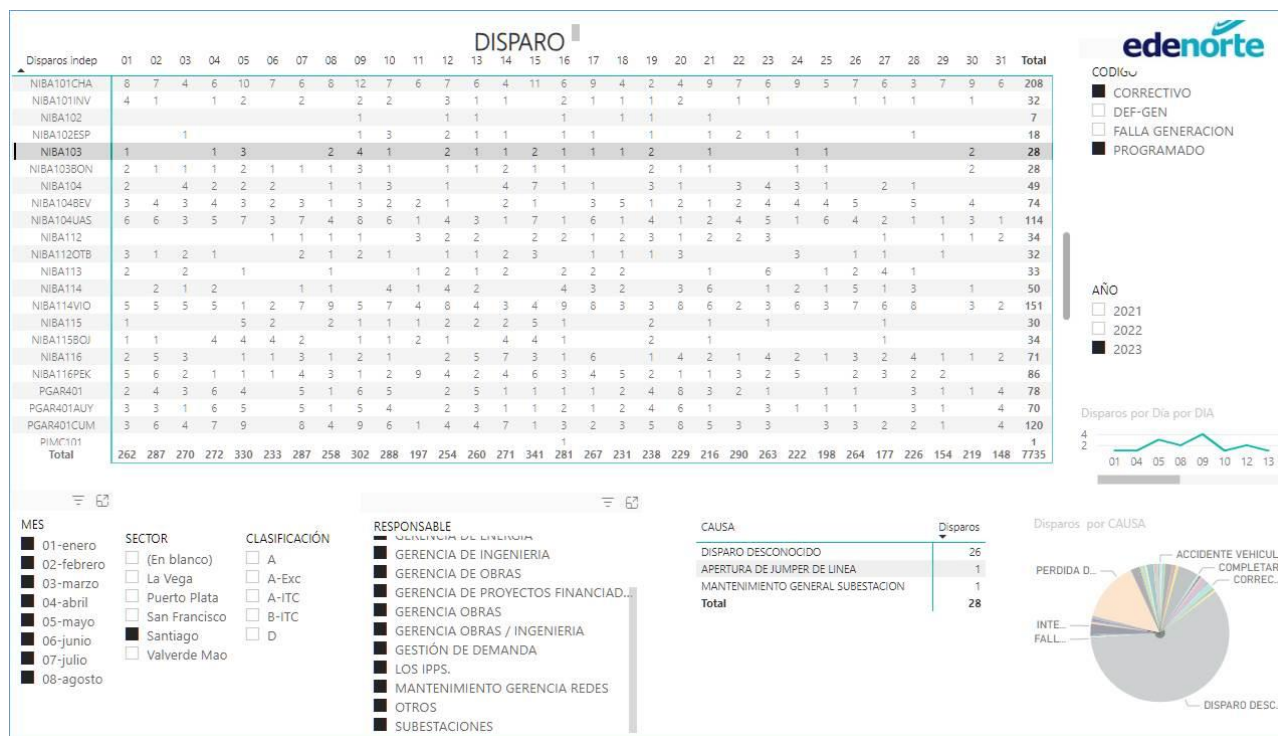


Fig. 10 (Promedio de fallas o disparos anual 2023 de NIBA103)

Fuente: Información suministrada de la base de datos de EDENORTE (2023)

3.4 Esquema de la investigación

Para cumplir con cada uno de los objetivos se realizará las siguientes actividades referentes:

Objetivo: Modelar y simular el circuito de Nibaje (NIBA103), localizado en Santiago de los Caballeros, Rep. Dominicana. Para analizar el comportamiento de dicha red de distribución por medio del programa computacional OpenDSS en complementación con QGIS (QGIS2OPENDSS).

✓ Actividades planificadas:

- 1) Recopilación de información acerca del circuito NIBA103. Ubicación de los lugares de mayor demanda y a su vez presenta alta cantidad de fallas en la red.
- 2) Aprender el manejo de los programas OpenDSS y QGIS a través de talleres y cursos proporcionado por nuestro asesor.

Objetivo: Analizar los aspectos tecnológicos y regulatorios relativos a las redes inteligentes en la ciudad de Santiago de los Caballeros, Rep. Dom. (Específicamente en el Circuito de Nibaje).

✓ Actividades planificadas:

- 1) Investigación de artículos científicos referente al modelado de distribución de redes y soporte de redes regulatorios en subestaciones eléctricas en Santiago a través de EDENORTE.
- 2) Plantear el uso de dichos programas de simulación evolucionará el soporte a redes con mayor facilidad y eficiencia.

Objetivo: Identificar la efectividad de la realización del modelado de redes de distribución utilizando software de código abierto.

✓ Actividades planificadas:

- 1) Corrección de errores presentados en la realización del modelado de software de código abierto.
- 2) Investigación del modelado en software, tomando en cuenta sus ventajas y desventajas.

Objetivo: Analizar los efectos y/o implicaciones técnicas y tecnológicas que podría causarles tanto a clientes activos consumidores-generadores, clientes consumidores con poder de decisión sobre su demanda y a la empresa de distribución eléctrica (EDENORTE) al incorporar cargas altamente aleatorias como lo son los vehículos eléctricos y recursos fotovoltaicos.

✓ Actividades planificadas:

- 1) Definir los diferentes tipos de fallas que se encuentran en los circuitos mediante, a la información proporcionado por EDENORTE.
- 2) Verificar si la infraestructura de una red de distribución es capaz de soportar la inserción de módulos fotovoltaicos y movilidad eléctrica.
- 3) Mediante el análisis de las fallas a través de las simulaciones en OPENDSS.
Identificar como mejorar el índice de calidad en la red del circuito.

3.5 Recursos utilizados en el desarrollo de la investigación

Para el desarrollo de la investigación se utilizaron recursos tecnológicos computacionales entre ellos para el análisis georreferencial se utilizó GGIS y para el análisis de datos y comportamiento del circuito OPENDSS a su vez el complemento GGIS2OPENDSS para la integración de los datos espaciales capturados en QGIS y el software OpenDSS traduciendo sin problemas las características geográficas en parámetros eléctricos. **(Ver Fig. 17, Apéndice: Interfaz del complemento QGIS2OPENDSS)**

3.6 Errores de simulación durante el desarrollo de la investigación

Durante el desarrollo del proceso de simulación se presentaron diversos errores en el complemento QGIS2OPENDSS los cuales impidieron la traducción de QGIS a OpenDSS del circuito de NIBA103 para el análisis de flujo de cargas de los paneles solares y los VE. Más adelante, en el proceso de análisis de los resultados se explica la medida que se tomó para realizar dichos escenarios de simulación y poder realizar el análisis propuesto.

A continuación, se detallan cada uno de los errores que se presentaron durante el proceso de simulación:

- 1) Error de cercanía:** La proximidad de la carga provocó "zonas de influencia" superpuestas, lo que confundió los cálculos de voltaje, invalidó la asignación de carga y sesgó los resultados de la simulación. La respuesta a este desconcertante problema fue simple pero poderosa: segregar las cargas superpuestas inducidas por la proximidad en los datos SIG antes de traducirlos. Esto requirió un análisis cuidadoso de la coordinación de cargas y la colocación proactiva de cargas en conflicto para garantizar una distancia de

separación suficiente. Separando cargas transformadas. Después de ajustar los datos GIS, el complemento QGIS2OpenDSS funcionó sin problemas y el análisis de distribución de energía cumplió con las expectativas. El problema subrayó la necesidad de mantener un espaciado adecuado entre los elementos de carga en los datos SIG para la precisión y validez de la simulación.

2) Error de data type: Después de análisis, se encontró un conflicto de tipos de datos en uno de los campos de atributos del conjunto de datos SIG. Un campo para parámetros eléctricos comprendía una combinación de entradas numéricas y de texto. Esta discrepancia interrumpió la estructura de datos de ejecución del complemento. El complemento QGIS2OpenDSS, como cualquier buena herramienta, necesitaba estructuras de datos predecibles. Una discrepancia en el tipo de datos provocó que se malinterpretaran los datos, lo que generó el mensaje de error. Este número hizo hincapié en la validación de datos y el cumplimiento del formato. El método incluía encontrar el campo con el tipo de datos en conflicto y corregir las entradas para garantizar la uniformidad. Después de un análisis riguroso y una purificación de datos, el campo se cambió para que solo contuviera los valores numéricos esperados, coincidiendo con las expectativas del complemento.

3) Error de NOMVOLT: La investigación del problema reveló una discrepancia en el voltaje nominal del conjunto de datos GIS. La tensión nominal determina el nivel de tensión de la red de distribución eléctrica. Para una construcción de modelos precisa y uniforme, el complemento QGIS2OpenDSS, que convierte datos metódicamente, necesita dichas propiedades.

Los valores de voltaje nominal asignados a los componentes de la red en el conjunto de datos GIS eran inconsistentes. Algunos valores estaban fuera del estándar de la red. Esta diferencia impidió que el complemento creara un modelo OpenDSS coherente y preciso.

La solución requirió armonizar los valores de voltaje nominal en todo el conjunto de datos para cumplir con los estándares de la red de distribución de energía. Esto requirió revisar el conjunto de datos, encontrar discrepancias y cambiar valores. La restauración de los niveles de voltaje nominal hizo que los datos cumplieran con las expectativas del complemento, lo que permitió una ejecución fluida y evaluaciones correctas de la distribución de energía.

- 4) **Error de DPX:** El complemento QGIS2OpenDSS tiene problemas para procesar cargas DPX a pesar de su capacidad para manejar otros tipos de carga. Las transformaciones únicas de las cargas DPX desafiaron los procedimientos automáticos de procesamiento de datos del complemento. Por lo tanto, el complemento tiene problemas para interpretar y convertir los atributos de carga DPX.

Se utilizaron dos estrategias para abordar este problema. Primero se examinaron las características de las cargas DPX y sus distinciones de otras clases de carga. Este conocimiento fue esencial para identificar desconexiones de carga del complemento-DPX. Las características de carga DPX requirieron ajustes del complemento en el segundo paso. Esto requiere cambios en la rutina de procesamiento de datos del complemento para reconocer, analizar y convertir con precisión los datos de carga DPX.

- 5) Error en el código del complemento:** Tras una investigación meticulosa, se hizo evidente que el error se debía a imperfecciones en el código fuente del complemento QGIS2OpenDSS. Los errores de codificación, que van desde contratiempos de sintaxis hasta fallas lógicas, se habían infiltrado en la arquitectura del complemento. Estos errores provocaron un comportamiento inesperado durante la ejecución, lo que provocó que el complemento fallara al intentar procesar ciertas configuraciones de datos o ejecutar funciones específicas.
- 6) Error con cargas trifásicas:** Se reveló que las rutinas de simulación y conversión de datos del complemento QGIS2OpenDSS enfrentaban desafíos para representar adecuadamente las cargas trifásicas. A diferencia de las cargas monofásicas, que son relativamente sencillas de simular, las cargas trifásicas requieren un manejo más complejo debido a la compleja interacción de las fases de voltaje.
- 7) Error de bus1=bus2:** Se hizo evidente que la salida de datos del complemento QGIS2OpenDSS asignaba consistentemente valores de bus1 y bus2 de manera incorrecta. En el contexto de las redes de distribución de energía, bus1 y bus2 representan los puntos finales conectados de un componente de la red, como una línea o un transformador. Sin embargo, el complemento asignaba erróneamente el mismo valor tanto al bus1 como al bus2, esencialmente conectando el componente consigo mismo dentro del modelo OpenDSS.

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Caso de estudio

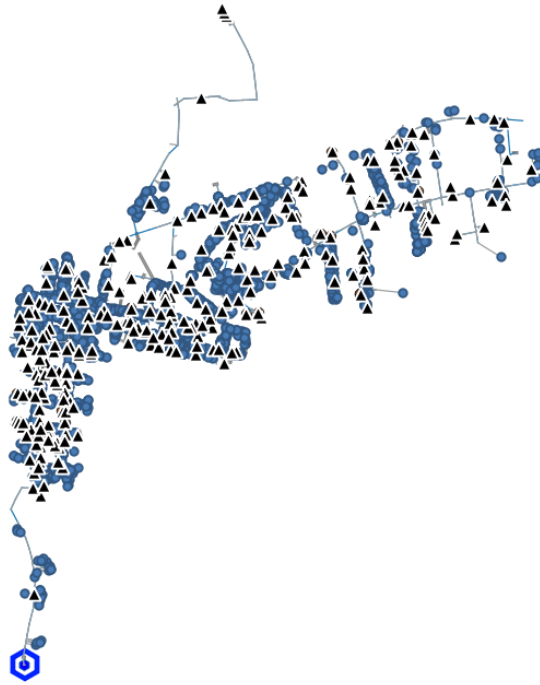



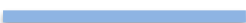




Fig. 11: Representación NIBA103

Fuente: Información suministrada de la simulación en QGIS (2023)

Tabla 1: Leyenda circuito simulado en QGIS

	Transformador
	Subestación
	Cargas
	Línea BT
	Línea MT aérea
	Línea MT soterrada

El desarrollo del análisis se conforma en la realización de la simulación en 3 diferentes escenarios. El primero, analizando el comportamiento de la red de distribución del circuito sin las cargas representativas de los PV y VE, es decir, su situación actual. Otro, que consiste en la incorporación de los paneles solares e ir aumentando la penetración y factor de demanda de estos en la red de distribución del circuito, tomando en cuenta la cantidad de clientes que esta acoplada a esa red de distribución. Solo se tomará en cuenta, el horario de mayor demanda en cada escenario, por lo tanto, para el de paneles solares el tiempo se comprenderá de 12:00 p.m. a 2:00 p.m. el cual es el horario en el cual los PV tienen mayor demanda en función a la irradiación solar. Mientras, que para el de VE se comprenderá entre un periodo de 7:00 p.m. a 12:00 a.m. ya que, es la hora que por lo regular las personas ponen a cargar sus vehículos. De tal forma el escenario se subdividirá en cinco casos de estudios, centrados en realizar un flujo de carga de la red de distribución de circuitos con la inserción de un 20 %, 40 %, 60%, 80%, 100% de paneles solares por cada cliente acoplado a la red.

Cabe destacar, que para el éxito de la realización de dicha simulación se tuvo que utilizar el esqueleto del circuito de Villa Olga (VOLG101) (Ver Fig. 12) que desarrollaron en la investigación “Plataforma de datos abiertos para el análisis espacial de la resiliencia energética y comunitaria” realizado por los ingenieros Dartiza Nicodemo Santana y Oscar Atahualpa López de Costa Rica, en colaboración con los ingenieros y profesores de PUCMM Ramón Emilio Grullón, Abraham Espinal Serrata y Rafael Omar Batista. Las razones de la utilización de dicho circuito es debido a los errores que se presentaron en el desarrollo del circuito NIBA103 en conjunto con el complemento (QGIS2OPENDSS) que se explican el acápite de la metodología, A eso sumarla el factor tiempo ya que se contaba con un límite de tiempo para la realización del proyecto.

Por último, se realizará otro escenario con la misma cantidad de estudio que los PV, pero ahora con la incorporación de los VE para analizar las siguientes variables: demanda máxima al transformador de potencia asociado al circuito (KVA), pérdidas (%), Tensión de las redes MT y BT (KV) e intensidad de corriente (A) en el alimentador de la red. Los resultados obtenidos para los distintos escenarios de penetración de PV y VE en el circuito seleccionado se muestran a continuación. **(Ver Tabla 2 a Tabla 4)**



Fig. 12: Representación NIBA103 utilizando VOLG101

Fuente: Información suministrada de la simulación en QGIS (2023)

4.2 Penetración de paneles solares en función al factor de demanda del circuito NIBA103

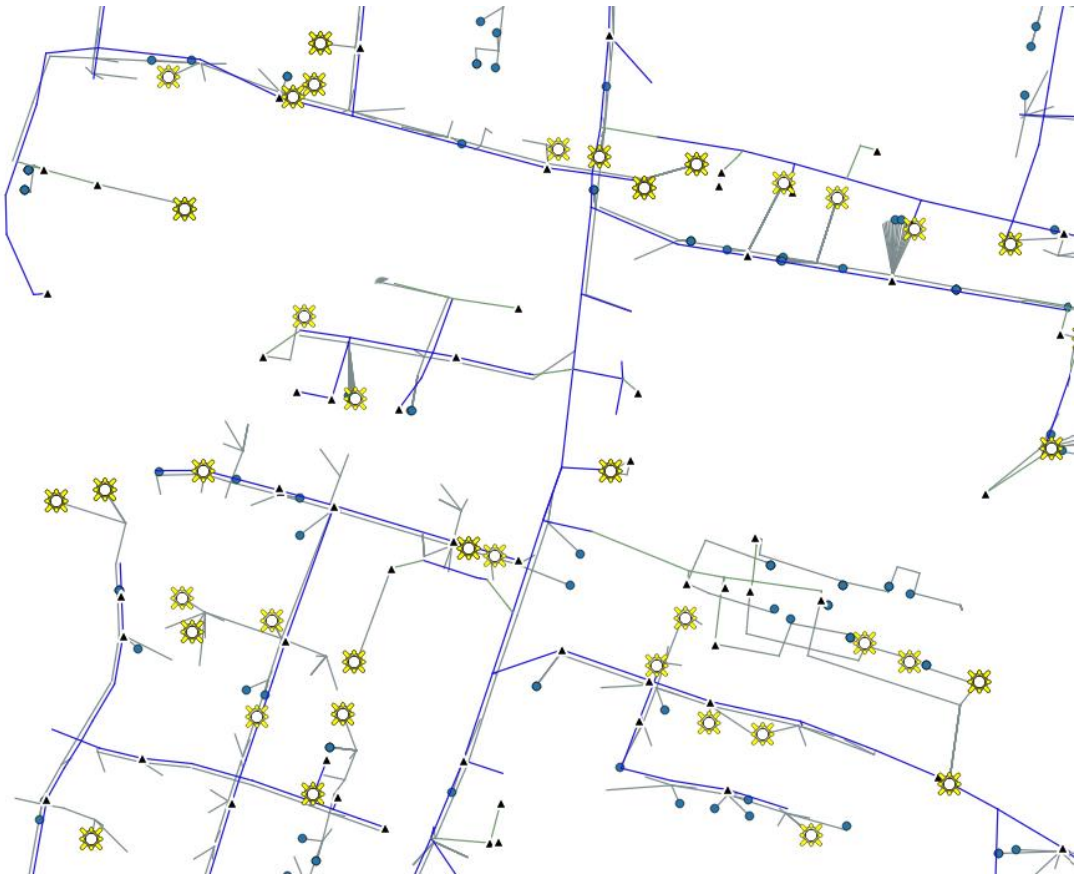


Fig. 13: Representación gráfica en QGIS de la penetración PV

Fuente: Información suministrada de la simulación en QGIS (2023)

Para el análisis de penetración de PV se analizó el consumo de energía total de las cargas para determinar el nivel de la potencia en módulos fotovoltaicos a instalar. Para así realizar la simulación y analizar el impacto que produce los paneles solares acoplados a la red de distribución. Utilizando la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{\text{Consumo mensual}}{\text{Irradiación solar} \times 30 \text{ días} \times \text{eficiencia del PV}} \right) \times 1000 \quad (\text{Ec. 1})$$

A continuación, se presenta la situación actual del circuito NIBA103 con una penetración total de 66 cargas con módulos fotovoltaicos representando el 0.023% de demanda en función a la cantidad de clientes. Los datos obtenidos son los siguientes (Ver Tabla 1):

Tabla 2: Parámetros actuales de penetración PV del circuito NIBA103.

Penetración PV	Demanda Max. (KW)	Tensión MT (KV)	Caída de Tensión (%)	Pérdidas (%)	Corriente (A)
0.023 %	-2500	13.4	1.42	6.83	111.72

Con los parámetros obtenidos se obtuvo la siguiente gráfica de los perfiles de voltaje L-N por unidad en función de la distancia (km) (Ver Fig. 10). Es decir, El perfil de tensión de los tramos del circuito desde su salida en la subestación.

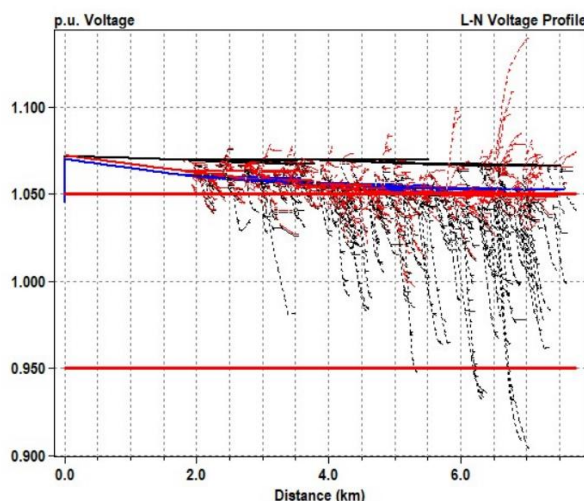


Fig. 14: Grafica de los perfiles de voltaje de NIBA103 con el flujo de PV actual

Fuente: Información suministrada de la simulación en OpenDSS (2023)

4.2.1 Impacto de la penetración PV en media tensión

A partir, de los parámetros actuales se incrementaron el % de penetración de PV en el circuito obteniendo los siguientes resultados (Ver Tabla 2):

Tabla 3: Impacto de la penetración PV en MT del circuito NIBA103

Penetración PV	Demanda Max. (KW)	Tensión MT (KV)	Caída de Tensión (%)	Pérdidas (%)	Corriente (A)
0 %	-2969	13.39	1.49	7.33	131.51
20 %	-332	13.40	0.60	5.93	31.36
40 %	2273	13.41	0.22	7.87	102.79
60 %	5854.4	13.38	1.49	16.05	256.63
80 %	7776.8	13.46	1.34	22.66	340.56
100 %	15011	13.41	2.68	65.42	668.26

Ante una inserción masiva de PV en las redes del Circuito NIBA103 se producen efectos radicales en todas las variables analizadas en esta investigación. Se puede observar cómo al incrementar el flujo de penetración de paneles solares en el circuito la demanda máxima (KW) a partir del 40% al 100% hay más inyección solar fotovoltaica que la potencia demandada por las cargas del circuito.

Cabe destacar, al utilizar el esqueleto del circuito de Villa Olga (VOLG101) el cual está capacitado para soportar más de 7000 cargas. Mientras, que el NIBA103 solo está capacitado para soportar

3000. Se puede apreciar que el porcentaje de caída de tensión desde el conductor troncal hasta el último circuito ramal en análisis no presenta una caída significativa de tensión.

Sin embargo, la corriente eléctrica en el alimentador troncal es una de las variables más críticas, debido a que si el conductor no tiene la capacidad de transportar la corriente demandada puede producir fallas en este. Se puede observar cómo al 100% de penetración de paneles solares la corriente aumenta a 668 A superando la ampacidad del conductor de la red AAAC 465 MCM el cual soporta 590 A. **(Ver Fig. 20, Apéndice: Especificaciones técnicas para conductores desnudos de aleación de aluminio AAC)**

Las pérdidas técnicas superan el valor establecido en los circuitos, mayor al 2.5 % establecido por la SIE en el Reglamento de Diseño y Construcción de Redes de Distribución eléctrica aérea. En el caso más crítico supera el 65.42 % de la potencia activa total transportada.

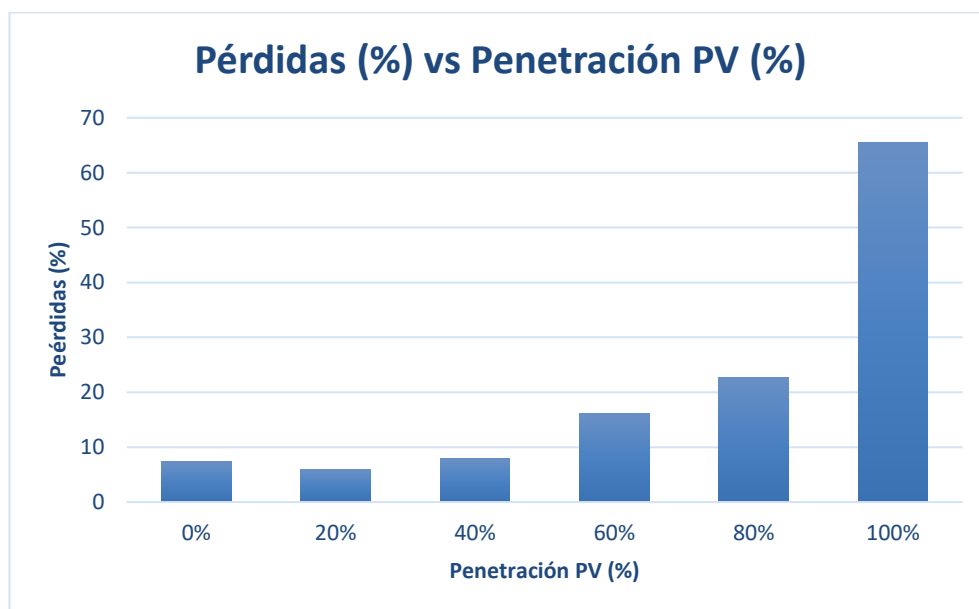


Fig. 15: Pérdidas eléctricas del circuito a medida que se incrementa la penetración de PV

4.2.2 Impacto de la penetración PV en baja tensión



Fig. 16: Tramo elegido para la simulación BT de los PV

Fuente: Información suministrada de la simulación en QGIS (2023)

Tabla 4: Impacto de la penetración PV en BT del circuito NIBA103

Penetración PV	Voltaje (V)	Corriente (A)
0%	127.5	5.27
20%	129.1	5.36
40%	129.4	5.47
60%	130.5	5.65
80%	131.4	5.67
100%	134.2	26.48

Para el análisis de BT se utilizó un solo tramo del circuito para observar el comportamiento de este a medida que se aumenta la inyección de energía solar fotovoltaica, Se puede evidenciar que al incrementar la inserción de módulos fotovoltaicos aumenta considerablemente todos los parámetros señalados (**Ver Apéndice: apartado Gráficas de los perfiles de voltaje con el incremento de flujo de PV. Págs. XX**). El caso más critico se muestra con una penetración del 100% de paneles solares donde la corriente en media tensión al sobrepasar los valores permisibles de los conductores ocasiona un aumento significativo en baja tensión.

4.3 Penetración de VE en función al factor de demanda del circuito NIBA103

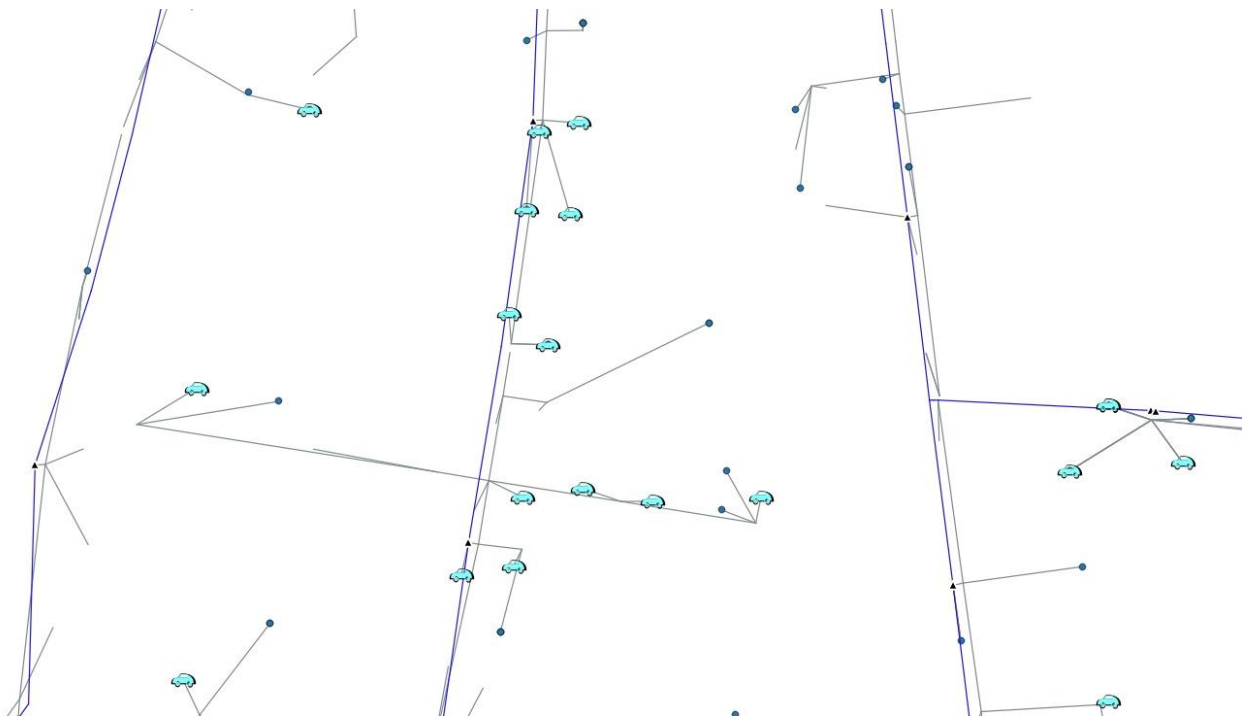


Fig. 17: Representación gráfica en QGIS de los VE

Fuente: Información suministrada de la simulación en QGIS (2023)

Para el desarrollo de la simulación del escenario de penetración de los VE se utilizó como modelo de vehículo un Tesla modelo 3 el cual presenta una capacidad de carga máxima de 11 KW. En donde se asumió que la cantidad de hora de carga promedio es de 5 horas diario al momento de cargar el vehículo. Para determinar esta carga vehicular y elección de modelo se utilizó la información propuesta que presenta la Asociación de Movilidad Eléctrica Dominicana (ASOMOEDO) representado 23.63% de uso al nivel nacional de este modelo de vehículo (Ver Fig. 19, Apéndice: Evolución importación VE a RD)

4.3.1 Impacto de la penetración VE en media tensión

A continuación, se presenta lo parámetros obtenidos el circuito NIBA103 al variar el flujo de penetración de VE:

Tabla 5. Impacto de la penetración VE en MT del circuito NIBA103

Penetración VE	Demanda Max. (KW)	Tensión MT (KV)	Caída de Tensión (%)	Pérdidas (%)	Corriente (A)
0 %	-2969	13.39	1.49	7.33	131.51
10 %	-3154.5	13.39	1.64	7.24	139.63
20 %	-3443.6	13.39	1.80	7.19	152.32
30%	-3538.5	13.39	1.87	7.22	156.5

De igual forma, ante una inserción masiva de VE en las redes del Circuito NIBA103 se producen efectos radicales en parte de las variables analizadas en esta investigación. En este caso se puede observar que la demanda de potencia (KW) del circuito incrementa al aumentar la penetración de vehículos eléctricos. Es decir, que la subestación tiende a suplir más debido a este tipo de carga

acoplada a la red. Al igual que en la penetración de PV, se puede apreciar que el porcentaje de caída de tensión desde el conductor troncal hasta el último circuito ramal en análisis no presenta una caída significativa de tensión.

Durante la simulación, se puede apreciar que la subestación eléctrica del circuito NIBA103 incrementa la corriente suministrada para satisfacer la demanda de energía de las cargas conectadas a la red. Por último, las pérdidas técnicas superan el valor establecido en los circuitos, mayor al 2.5 % establecido por la SIE en el Reglamento de Diseño y Construcción de Redes de Distribución eléctrica aérea.

4.3.1 Impacto de la penetración PV en baja tensión

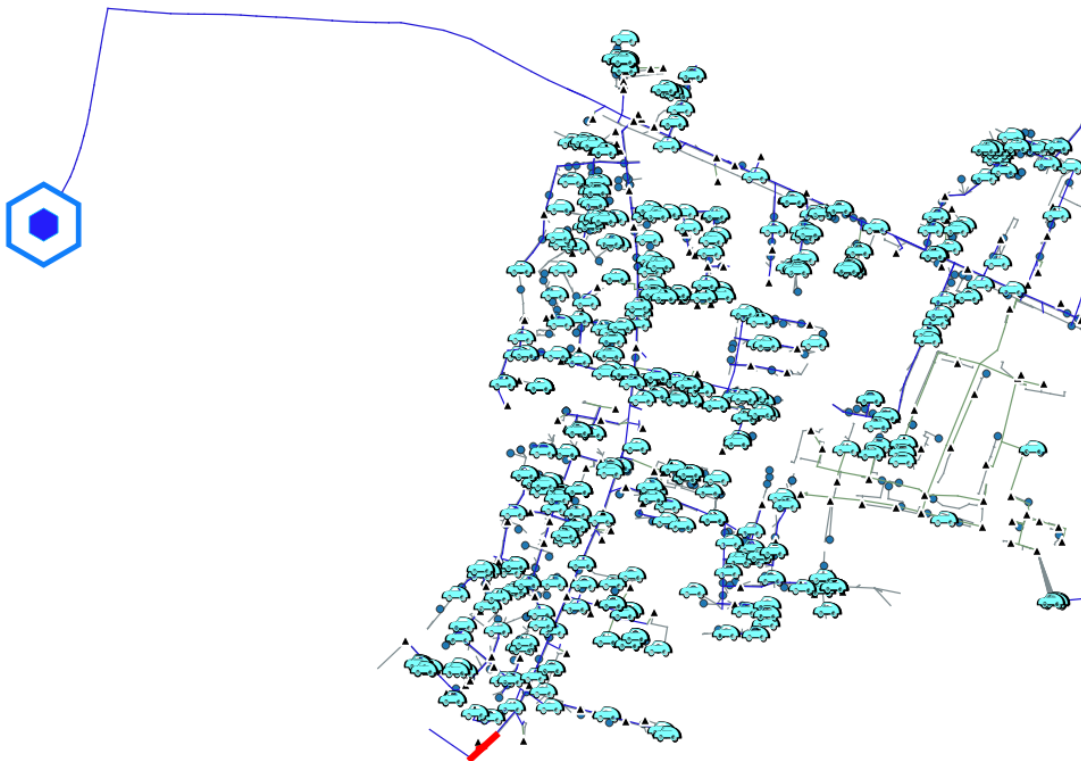


Fig. 18: Tramo elegido para la simulación BT de los VE

Fuente: Información suministrada de la simulación en QGIS (2023)

Tabla 6: Impacto de la penetración VE en BT del circuito NIBA103

Penetración VE	Voltaje (V)	Corriente (A)
0%	125.9	10.67
10%	125.7	10.66
20%	125.6	10.64
30%	125.5	10.65

Para el análisis de BT se utilizó un solo tramo del circuito para observar el comportamiento de este a medida que se aumenta la inyección de movilidad eléctrica, Se puede evidenciar que al incrementar la inserción de vehículo eléctricos el tramo utilizado disminuye sus parámetros debido a que hay más demanda en los otros tramos del circuito los cuales si aumentan.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES

En conclusión, en este estudio se realizó una extensa investigación sobre la incorporación de herramientas geoespaciales de código abierto y análisis de sistemas de distribución eléctrica. Esto quedó demostrado por la integración de QGIS y OpenDSS utilizando el complemento QGIS2OpenDSS para el desarrollo de éste. Explorando los dominios de la ingeniería eléctrica, el desarrollo de software y las plataformas colaborativas de código abierto, arrojando luz sobre las posibilidades de utilizar estas tecnologías con el fin de modelar redes de distribución complejas. Donde los resultados de esta investigación muestran la transformación en curso provocada por la era digital en los sistemas de energía y los paradigmas de software.

Además, la investigación sienta un precedente para esfuerzos futuros destinados a cerrar la brecha entre el modelado de infraestructura eléctrica y la visualización geoespacial, al hacer contribuciones significativas a los campos del análisis de redes de distribución, la cooperación de código abierto y la integración de tecnología sostenible.

Con los resultados obtenidos mediante el análisis, se observó que la red de distribución del circuito NIBA103 se vio afectado por el incremento de módulos fotovoltaicos y movilidad eléctrica. En el caso de la inserción de PV las pérdidas eléctricas superaron a los valores permisibles establecidos por la SIE. En adición, la potencia instalada de las cargas excedió la potencia suplida por el transformador del circuito. Mientras, que en los VE queda demostrado que la penetración considerable de estos puede conducir a una mayor demanda de energía suministrada por la subestación de distribución.

El aumento simultáneo de los sistemas fotovoltaicos (FV) y los vehículos eléctricos (EV) está impulsando cambios significativos en las redes de distribución. Los sistemas fotovoltaicos introducen fuentes de energía intermitentes, lo que requiere sistemas de red adaptables para gestionar las fluctuaciones en la generación de energía. Los vehículos eléctricos, por otro lado, generan demandas de carga máxima durante la carga, lo que requiere estrategias de gestión de la demanda para evitar sobrecargas de la red.

Aunque algunos de los valores implementados en QGIS para simular el circuito fueron alterados para lograr la simulación en OpenDSS, se mostró la capacidad del complemento para adaptarse y reflejar el panorama cambiante de la distribución de energía, en particular en respuesta a la creciente integración de la inyección solar y el incremento de vehículos eléctricos. Sin embargo, es importante comprender que, a pesar de los impresionantes avances, todavía queda un largo camino por recorrer antes de que el complemento QGIS2OpenDSS pueda alcanzar su máximo potencial. La versión actual es una prueba de ingenio, pero aún debe mejorarse y desarrollarse para su utilización en el modelado de redes de distribución a nivel nacional. Se requieren de mejoras para garantizar que el complemento pueda manejar una gama más amplia de dificultades a medida que los sistemas de energía se vuelven sofisticados y las necesidades de las partes interesadas cambian. Esto demuestra el carácter cooperativo de los proyectos de código abierto, donde el esfuerzo combinado de programadores, investigadores y profesionales será crucial para determinar el curso del complemento QGIS2OpenDSS en el futuro. Esta tesis sirve como un paso fundamental en el viaje continuo hacia la optimización del modelado de redes de distribución en el contexto del software de código abierto, mostrando tanto los logros alcanzados hasta ahora como el camino que queda por delante a medida que se desarrolla el mundo digital.

BIBLIOGRAFÍA

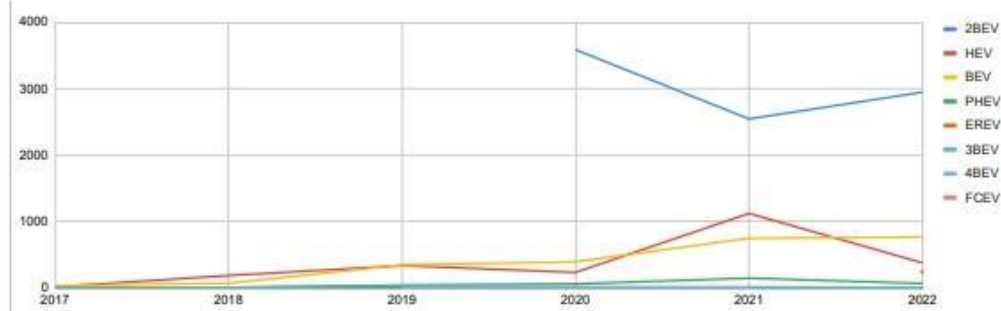
- [1] “IE_8454”.
- [2] L. Alejandro Arias Barragán, D. Fernando García, y E. Rivas Trujillo, “Management model of distribution networks through UML and BPL”.
- [3] G. Valverde, A. Arguello, R. González, y J. Quirós-Tortós, “Integration of open source tools for studying large-scale distribution networks”, *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 11, núm. 12, pp. 3106–3114, ago. 2017, doi: 10.1049/iet-gtd.2016.1560.
- [4] “Distribution System Modeling and Analysis”.
- [5] Institute of Electrical and Electronics Engineers y S. International Conference on Software Engineering (34th : 2012 : Zurich, 2012 *First International Workshop on Software Engineering Challenges for the Smart Grid (SE-SmartGrids) : proceedings : June 3, 2013, Zurich, Switzerland*.
- [6] A. S. Al-Ezzi y M. N. M. Ansari, “Photovoltaic Solar Cells: A Review”, *Applied System Innovation*, vol. 5, núm. 4. MDPI, el 1 de agosto de 2022. doi: 10.3390/asi5040067.
- [7] J. Dong *et al.*, “Operational Impacts of High Penetration Solar Power on a Real-World Distribution Feeder”, 2018. [En línea]. Disponible en: <http://energy.gov/downloads/doe-public-access-plan>
- [8] “OC > Capacidad Instalada”. <https://www.oc.do/Servicios/Reporte/CapacidadInstalada> (consultado el 3 de agosto de 2023).
- [9] “GERENCIA DE FUENTES ALTERNAS Y USO RACIONAL DE ENERGÍA”.
- [10] A. Kumar, N. Gupta, y V. Gupta, “A Comprehensive Review on Grid-Tied Solar Photovoltaic System Design and Implementation of Interleaved Inverter topology for shunt

- APF applications View project Two Sage Grid-tied Solar Photo voltaic Power Generating System View project A Comprehensive Review on Grid-Tied Solar Photovoltaic System”, *Journal of Green Engineering*, vol. 7, pp. 213–254, 2017, doi: 10.13052/jge1904-4720.71210.
- [11] “Sci-Hub | Real time OpenDSS framework for distribution systems simulation and analysis. 2012 Sixth IEEE/PES Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition (T&D-LA) | 10.1109/TDC-LA.2012.6319069”. <https://sci-hub.se/10.1109/TDC-LA.2012.6319069> (consultado el 4 de agosto de 2023).
- [12] “Explorando ambos lados: Ventajas y desventajas de un software Open Source”. <https://www.dongee.com/tutoriales/explorando-ambos-lados-ventajas-y-desventajas-de-un-software-open-source/> (consultado el 26 de agosto de 2023).
- [13] “(1) Ventajas y desventajas del código abierto | LinkedIn”. <https://www.linkedin.com/pulse/ventajas-y-desventajas-del-c%C3%B3digo-abierto-valio-spa/?originalSubdomain=es> (consultado el 26 de agosto de 2023).
- [14] “Manual de uso del complemento ‘QGIS2OPENDSS’”.
- [15] R. C. Dugan, “Reference Guide The Open Distribution System Simulator™ (OpenDSS) With edits by Andrea Ballanti”, 2016.
- [16] E. A. Álvarez Jerez *et al.*, “Potencial impacto energético de los vehículos eléctricos en la red de distribución del Distrito Nacional, República Dominicana”, *Ciencia, Ingenierías y Aplicaciones*, vol. 2, núm. 1, pp. 45–66, sep. 2019, doi: 10.22206/cyap.2019.v2i1.pp45-66.
- [17] “EETT0030-ESPECIFICACION-TECNICA-CONDUCTORES-DESNUDOS-AAAC”.
- [18] “Serie Mercado Eléctrico Minorista (MEMI) REGLAMENTO DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN PARA REDES ELÉCTRICAS DE DISTRIBUCIÓN AÉREAS”

APÉNDICE

Evolución importación vehículos eléctrico a RD

No.	Tipo	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Total
1	2BEV				3,592	2,547	2950	228	9,317
2	HEV	13	184	334	231	1,121	375	402	2,818
3	BEV	31	67	344	392	746	767	232	2,586
4	PHEV		3	40	57	145	64	17	326
5	EREV				1		242	8	251
6	3BEV	1	5	32	16	12	5		71
7	4BEV			1	3	2			6
8	FCEV				1				1
	Total	45	259	751	4,293	4,573	4,403	887	15,376
	Dependiente de electricidad	32	75	417	4,062	3,452	4,028	485	12,558



BEV= VEHICULO ELECTRICO DE BATERIA HEV= VEHICULO ELECTRICO HIBRIDO PHEV= VEHICULO ELECTRICO HIBRIDO CONECTABLE EREV= VEHICULO ELECTRICO DE RANGO ESTENDIDO
 3BEV= 3 RUEDAS VEHICULOS ELECTRICO DE BATERIA FCEV= VEHICULO DE CELDA DE HIDROGENO

Top 10 BEV por Marca Marzo 2023

No.	Marca	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Total	Penetración
1	TESLA	1	3	24	84	174	117	27	430	22.63%
2	BYD			5	19	92	149	57	322	16.95%
3	Nissan	13	29	149	38	41	7	6	286	15.05%
4	HYUNDAI	3	2	42	21	46	76	1	191	10.05%
5	CHEVROLET	2	9	27	41	71	21	5	176	9.26%
6	BAIC				60	51	44		155	8.16%
7	GO ELECTRIC				11	45	29	33	118	6.21%
8	FIAT		1	40	30	5	3		79	4.16%
9	AUDI					5	67	7	79	4.16%
10	KIA		1	1	1	17	42	2	64	3.37%
	total	19	45	288	305	547	555	138	1,900	100.00%

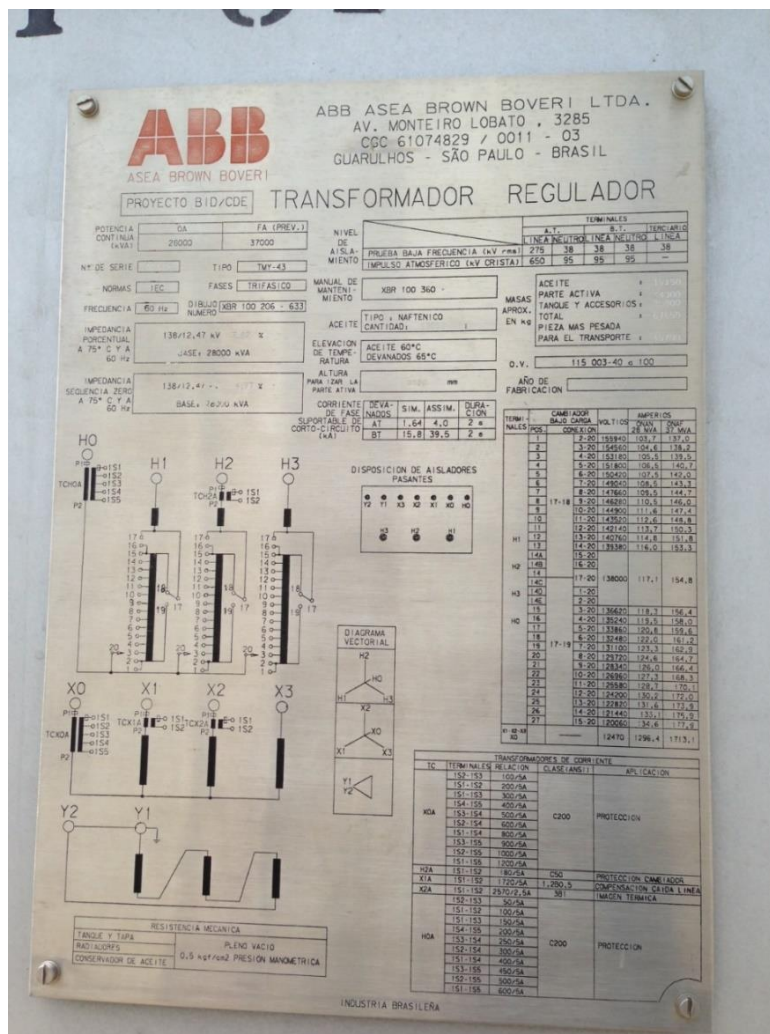
Fig. 19: Evolución importación VE a RD

Fuente tomada de [16]

CONDUCTOR	559 MCM (Darien)	465 MCM (Cairo)	312 MCM (Butte)	4/0 AWG (Alliance)	2/0 AWG (Anaheim)	1/0 AWG (Azusa)
Intensidad máxima admisible (A)	663	590	460	395	296	256

Fig. 20: Especificaciones técnicas para conductores desnudos de aleación de aluminio AAC

Fuente tomada de [17]



Proceso de traducción QGIS a OpenDSS

Este acápite es dedicado a los autores responsables de la guía utilizada para la traducción de los datos, titulada “Guía para traducir datos del sig de EDENORTE para el complemento QGIS2OPENDSS”. Para los autores: La guía sirvió como un faro de conocimiento, brindando claridad e información sobre el plugin QGIS2OPENDSS. La profundidad de la investigación, la organización del contenido y la claridad de las explicaciones lo han convertido en una referencia indispensable para cualquiera que busque comprender y dominar el plugin QGIS2OPENDSS. No se puede subestimar el impacto de su guía en mi comprensión y crecimiento, y estoy increíblemente agradecido por la oportunidad de aprender de su experiencia.

En pocas palabras, la guía explica el conjunto de campos que necesitan las capas obtenidas de EDENORTE en QGIS para que el plugin las identifique para realizar la transferencia a OpenDSS. Para ejemplificar lo redactado, para una capa creada por EDENORTE, donde existe un campo que muestra el calibre del cableado se crea un campo con la información redactada por la guía para que el plugin la identifique:

bit_fas ▲	PHASESIZ
1/0 AWG	1/0
2 AWG	2
2 AWG	2
2 AWG	2
2 AWG	2
2 AWG	2
2 AWG	2
2/0 AWG	2/0

Fig. 22: Izquierda: campo creado por EDENORTE. Derecha: campo creado por el usuario basado en la guía.

A continuación, les mostraré el conjunto de pasos tomados para el procedimiento de traducción basado en mi experiencia con el uso de la guía. Dichos pasos no resaltarán exactamente el proceso realizado por los autores de la guía, debido a que algunos pasos se obviaron debido a que la información fue previamente facilitada.

Se exportó a QGIS toda la información necesaria con respecto al circuito en cuestión, que en este caso es NIBA103. Se necesitan capas de las líneas de baja tensión, de media tensión, transformadores, cargas y de la subestación.

Se crearon los campos para las líneas de media tensión aérea y soterradas, las cuales necesitaban las siguientes expresiones:

PHASESIZ	PHASEMAT	NOMVOLT
PHASEDESIG	NEUTSIZ	NEUTMAT
LINGEO	LENUNIT	LENGTH

Se crearon los campos para los transformadores, las cuales necesitaban las siguientes expresiones:

PHASEDESIG	PRIMVOLT	SECVOLT	PRIMCONN	SECCONN
KVAPHASEA	KVAPHASEB	KVAPHASEC	RATEDKVA	TAPSETTING

Se crearon los campos para las líneas de baja tensión aérea y soterradas, las cuales necesitaban las siguientes expresiones:

PHASESIZ	PHASEMAT	NOMVOLT	NEUTSIZ
----------	----------	---------	---------

NEUTMAT	TYPE	LENUNIT	LENGTH
---------	------	---------	--------

Se crearon los campos para las cargas en baja y en media tensión, las cuales necesitaban las siguientes expresiones:

NOMVOLT	KWHMONTH	PF	SERVICE	CLASS
---------	----------	----	---------	-------

Se completaron los campos necesarios dentro del plugin para realizar la traducción:

Fig. 23: Interfaz QGIS2OPENDSS

Parámetro	Redes de Media Tensión
Tensión Nominal Primaria	12.47 Grd. Y / 7.2 kV
Tensión máxima de servicio	13.8 kV

Fig. 24: Características de las redes de distribución

Fuente: tomada de [18]

Potencia (kVA)	P sin carga (W)	P con carga (W)	P total (W)
10	40	150	190
15	60	180	240
25	100	300	400
37.5	113	413	526
50	150	500	650
75	225	750	975

Fig. 25: Pérdidas máximas en los transformadores

Fuente: tomada de [18]

Gráficas de los perfiles de voltaje con el incremento de flujo de PV

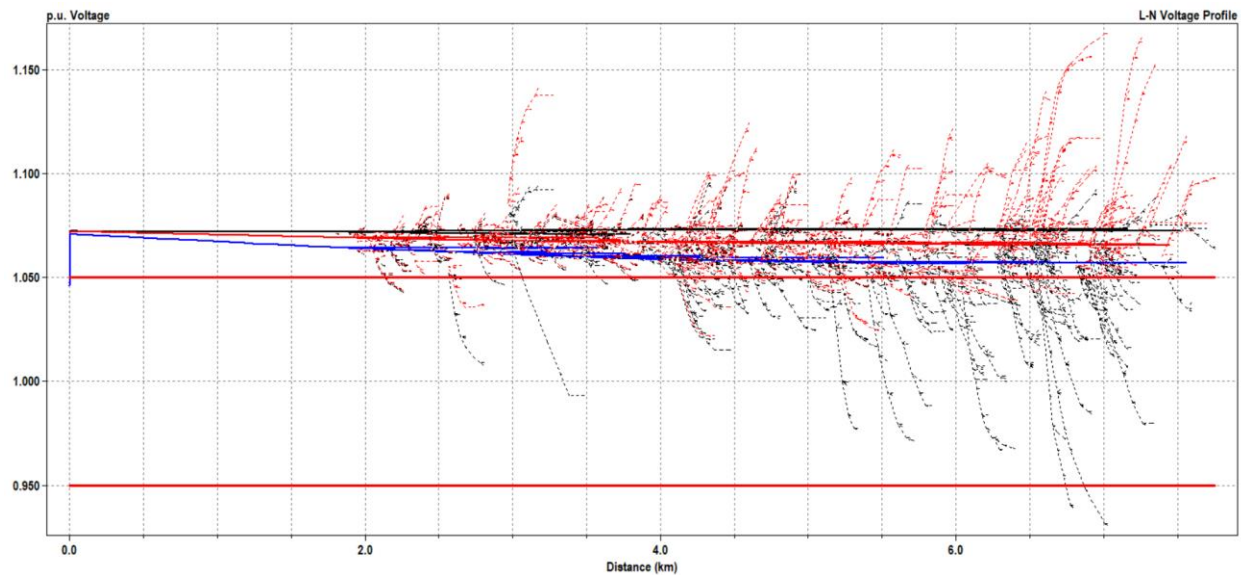


Fig. 26: Grafica de los perfiles de voltaje de NIBA103 con el flujo de PV en un 20% de penetración

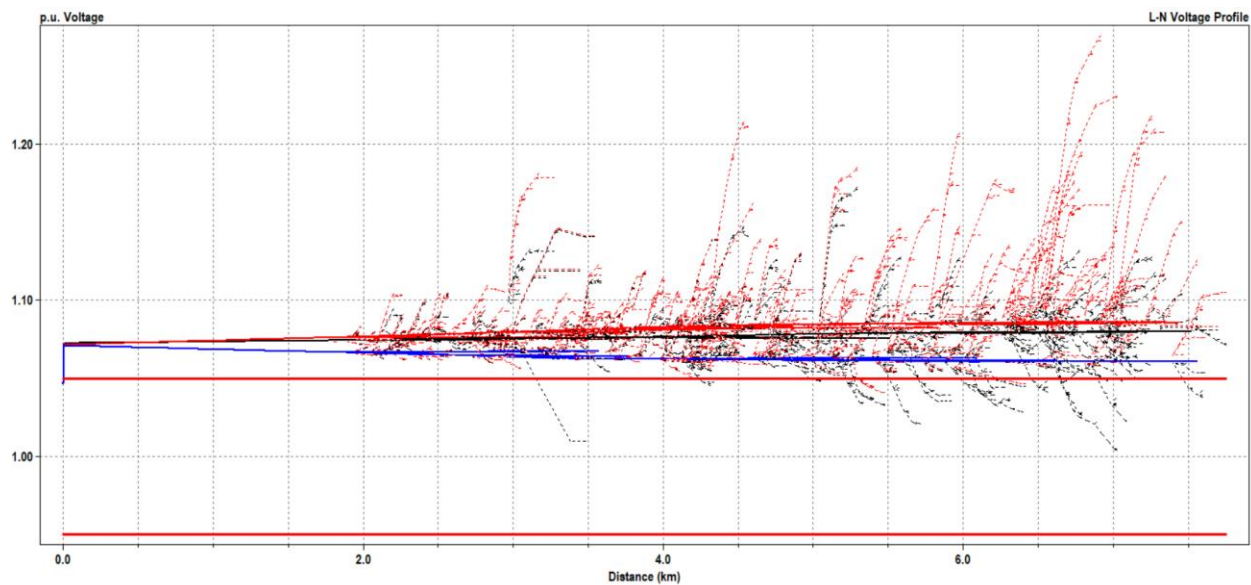


Fig. 27: Grafica de los perfiles de voltaje de NIBA103 con el flujo de PV en un 40% de penetración

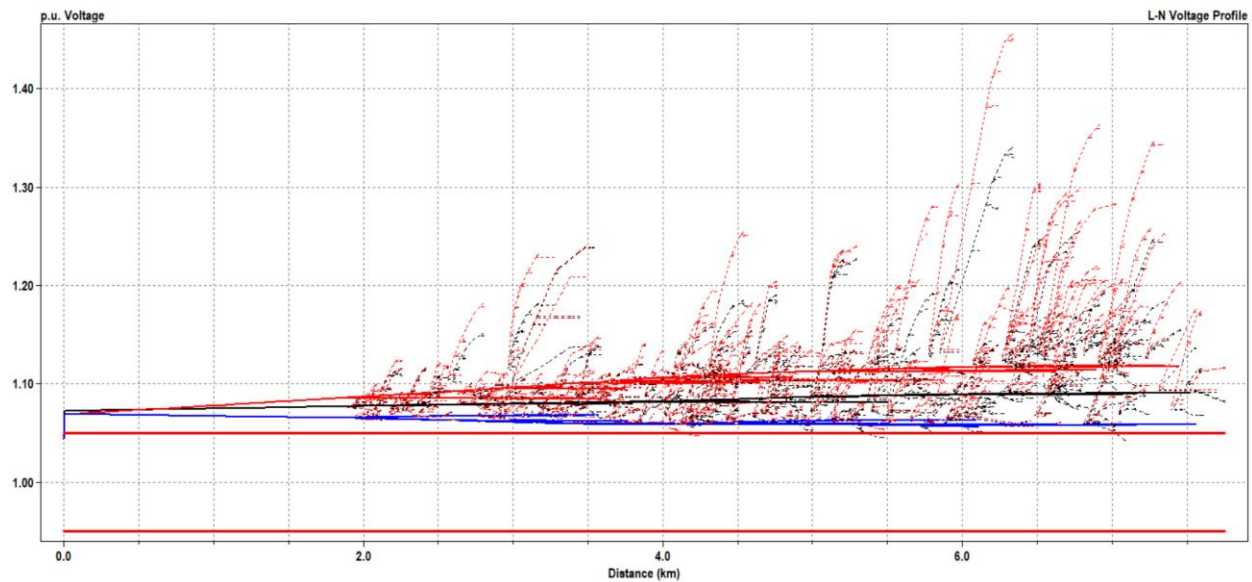


Fig. 28: Grafica de los perfiles de voltaje de NIBA103 con el flujo de PV en un 60% de penetración

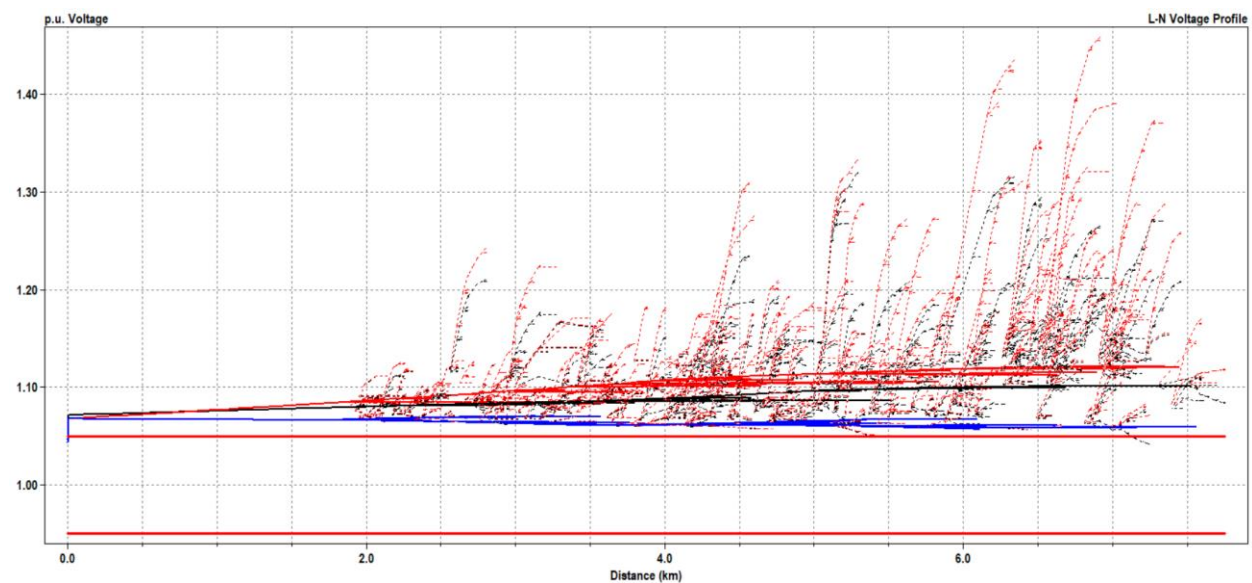


Fig. 29: Grafica de los perfiles de voltaje de NIBA103 con el flujo de PV en un 80% de penetración

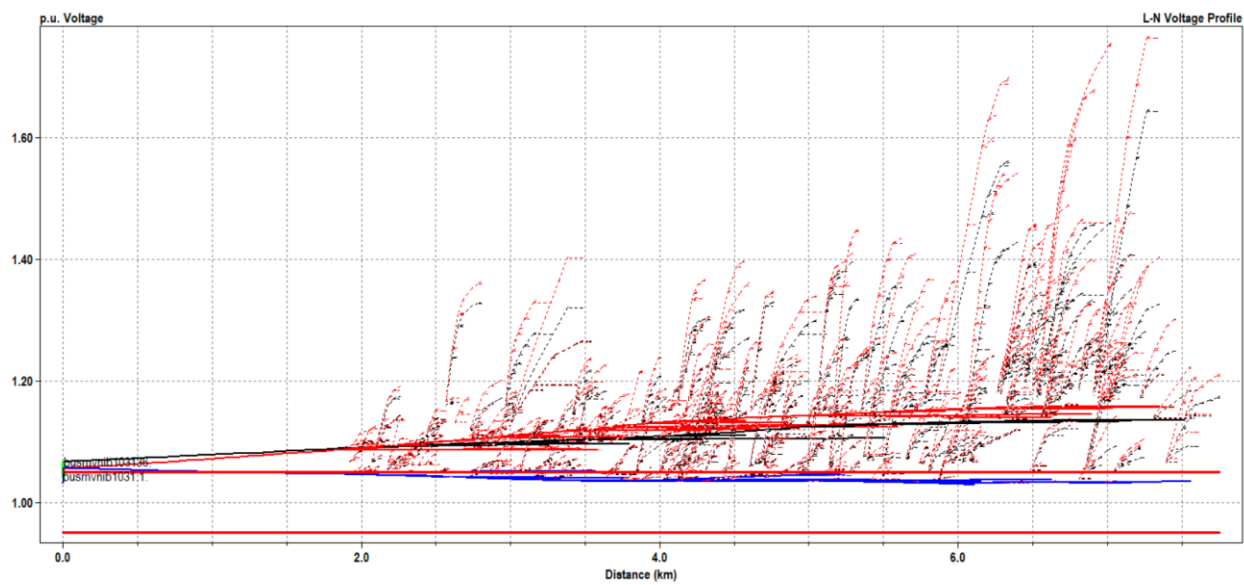


Fig. 30: Grafica de los perfiles de voltaje de NIBA103 con el flujo de PV en un 100% de penetración