



**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**ESTRATEGIA DE GESTIÓN DE RECURSOS ENERGÉTICOS: FLEXIBILIDAD OPERATIVA
EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN.**

INTEGRANTES:

**BRANDON JOSÉ REYES DÍAZ
JOSUÉ DAVID RÍOS CANTILLO**

ASESOR:

ADRIANA ARANGO MANRIQUE

**BARRANQUILLA
NOVIEMBRE DE 2021**

AGRADECIMIENTOS

Gracias a la natura naturans, la substancia que causa y preserva al todo el universo y los modos de esta que nos permiten tener entendimiento y gozar con el placer más grande, este es, el resultado de la contemplación de la verdad y el crecimiento intelectual. Especial agradecimiento a nuestra asesora, Phd Ing. Adriana Arango Manrique, que con su experticia, animosidad y atención a los detalles, nos encaminó en el desarrollo de esta labor. Asimismo, un afectuoso reconocimiento a nuestros seres queridos quiénes sirvieron de soporte emocional y anímico en el desarrollo de este arduo proyecto.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	6
2. OBJETIVOS	7
2.1 Objetivo general	7
2.2 Objetivos específicos	7
3. DELIMITACIÓN	7
3.1 Alcances	7
3.2 Limitaciones	7
3.3 Entregables	8
4. ESTADO DEL ARTE	9
5. INFORMACIÓN DETALLADA	12
5.1 Metodología	12
5.1.1 Marco normativo	13
5.1.2 Análisis de riesgos	13
5.2 Diseño en ingeniería	13
5.2.1 Identificación del problema	14
5.2.2 Alternativas de diseño	14
5.2.3 Evaluación y selección de la alternativa a diseñar	15
5.2.4 Diseñar la alternativa seleccionada	16
6. PRUEBAS, RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	20
6.1 Planeación de la prueba	20
6.1.1 Hipótesis	20
6.1.2 Elaboración del caso	20
6.1.3 Método de validación	21
6.2 Ejecución del plan experimental	21
6.3 Resultados	21
6.3.1 Resultados de sistema base	21
6.3.2 Resultados de sistema escenario de baja demanda	22
6.3.3 Resultados del sistema escenario de alta demanda	24
6.4 Análisis e interpretación de resultados	25
6.4.1 Plan de respuesta y prueba con ajustes	26
6.5 Impactos del proyecto	30
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	30
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32
9. ANEXOS	33

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de flujo para el diseño de la estrategia de flexibilidad operativa por RD en el SDL.	12
Figura 2. Matriz de riesgo resumida del proyecto. Fuente: elaboración propia.	13
Figura 3. Propuestas bases en donde se erigió la estrategia presentada. Dichas propuestas condensan lo presentado, de izquierda a derecha, en [12], [1] y [13]. Fuente: elaboración propia.	14
Figura 4. Diagrama de flujo de la “ESTRATEGIA DE GESTIÓN DE RECURSOS ENERGÉTICOS: FLEXIBILIDAD OPERATIVA EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN”.	19
Figura 5. Sistema IEEE de 13 barras sin modificaciones. Tomado de [8]	21
Figura 6. Valores de potencias activa y reactiva registrados en la subestación alimentadora por hora en el sistema base.	22
Figura 7. Perfil de tensión de las fases en el escenario base.	22
Figura 8. Valores de potencias activa y reactiva registrados en la subestación alimentadora por hora en el escenario de reducción a 85% de la demanda.	23
Figura 9. Perfil de tensión de las fases en el escenario de reducción a 85% de la demanda	23
Figura 10. Valores de potencias activa y reactiva registrados en la subestación alimentadora por hora en el escenario de reducción a 55% de la demanda.	24
Figura 11. Perfil de tensión de las fases en el escenario de reducción a 55% de la demanda.	24
Figura 12. Valores de potencias activa y reactiva registrados en la subestación alimentadora por hora en el escenario de aumento a 110% de la demanda.	25
Figura 13. Perfil de tensión de las fases en el escenario de aumento a 110% de la demanda.	25
Figura 14. Declaración de las regiones a mejorar por medio de los REDs en la curva de potencia del sistema base	26
Figura 15. Comportamiento de la generación solar	27
Figura 16. Comportamiento del almacenamiento.	28
Figura 17. Curva de demanda activa y reactiva del sistema con REDs.	28
Figura 18. Perfiles de tensión del sistema con REDs.	29

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Descripción detallada de las propuestas bases elegidas, siendo soluciones 1, 2 y 3 las que se plasman, respectivamente, en [12], [1] y [13]._____ 14

Tabla 2. Decisión que determinó la elección de la metodología guía para la elaboración de la estrategia del proyecto._____ 16

Tabla 3. Características de la generación solar._____ 26

Tabla 4. Características del almacenamiento. _____ 27

Tabla 5. Comparación de resultados caso base y caso ajustado con REDs._____ 29

1. INTRODUCCIÓN

Con el desarrollo continuo de nuevas tecnologías tanto de generación y consumo implementadas al nivel de distribución, como lo son los Recursos Energéticos Distribuidos (REDs), se evidencia problemas de regulación de voltaje y, en general, de la calidad de la energía por la penetración incremental y desorganizada de estos nuevos recursos energéticos [1]. Por otro lado, hasta donde se tiene conocimiento, no se ha implementado una estrategia práctica y replicable que facilite el estudio de la flexibilidad en la operación del sistema de distribución a partir de los nuevos recursos que interactúan en él. Lo anterior, posiblemente, se debe a la poca información operativa asociada al nivel de distribución, lo cual ocasiona el desaprovechamiento de los recursos existentes y a implementar en el SIN, a su vez, generando impactos operativos. La gestión de estos recursos energéticos debe garantizar un beneficio para la flexibilidad del sistema de distribución (SD), tal y como se da en las redes de transmisión [2]. Dicha escasez informativa puede presentar un problema para el país, ya se espera la integración de 1.650 MW de energía renovable no convencional (FERNC), conectados a lo largo del SEP colombiano para el 2022, la integración de sistemas de almacenamiento con una capacidad de al menos 45 MWh [3] y el cambio tecnológico en términos de medición para facilitar la gestión de demanda [4], siguiendo la ruta trazada por la transición energética [3]. En este orden, este proyecto de ingeniería ha trazado una estrategia que declara un algoritmo lógico para la correcta inserción de los REDs y, a su vez, diseñando esquemas operativos para analizar la flexibilidad operativa en los SDs.

En cuanto al análisis de la flexibilidad en los SDs, se parte del flujo de potencia del sistema resaltando los resultados a la luz de lo enmarcado en las regulaciones nacionales [5], [6] y [7], como la normativa internacional [4], así simulando escenarios críticos contemplados en [1] evidenciando los problemas de flexibilidad, luego, se determinó los esquemas respecto a la gestión de demanda (por medio de RD) que mitigan las violaciones de las variables del sistema. Por último, se consolidó un algoritmo lógico adaptativo para garantizar la seguridad del sistema impactado por medio de la flexibilidad operativa por parte de la RD.

Ahora bien, en cuanto a la organización de este proyecto se encontrará la declaración de los objetivos tanto el general como los específicos, la delimitación de alcances y limitaciones. En esta línea, se hace una revisión de la literatura existente relacionada a la flexibilidad, gestión de demanda, RD, RED, prosumidores y demás conceptos claves; continuando así con la información detallada donde se discute el trasfondo técnico y las especificaciones de la estrategia de flexibilidad operativa en los SDs. Consecuentemente, se adjuntan y analizan los resultados de las pruebas de simulación del SD estudiado (Modelo IEEE 13 nodos) [8]; finalizando con las conclusiones y recomendaciones, referencias bibliográficas empleadas y los anexos asociados a este proyecto. Finalizando, se recalca el logro de establecer una estrategia que permita analizar la flexibilidad operativa de la red con un enfoque del empoderamiento de la demanda para reforzar la seguridad de la misma; por esto se invita al lector a la revisión detallada de la presentación de este proyecto que esperamos sea provechoso y útil para el lector.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Desarrollar una estrategia que permita analizar la flexibilidad de la operación del sistema con recursos energéticos distribuidos.

2.2 Objetivos específicos

OE1. Definir los recursos energéticos del sistema de distribución que participan en flexibilidad operativa.

OE2. Diseñar una estrategia que permita analizar el comportamiento del sistema al incluir las condiciones de flexibilidad en el sistema de distribución.

OE3. Validar la flexibilidad del sistema de distribución con las diferentes condiciones.

3. DELIMITACIÓN

3.1 Alcances

OE1. Definir los recursos energéticos del sistema de distribución que participan en flexibilidad operativa.

- ❖ Se caracterizará un sistema estándar de IEEE con modificaciones.
- ❖ Se considerará generación solar fotovoltaica.
- ❖ La cantidad de generación será un dato de entrada variable.
- ❖ Se incluirá gestión de la demanda.

OE2. Diseñar una estrategia que permita analizar el comportamiento del sistema al incluir las condiciones de flexibilidad en el sistema de distribución.

- ❖ Se analizarán escenarios en alta y baja generación solar.
- ❖ Se garantizará el balance entre demanda y generación para los escenarios de validación.

OE3. Validar la flexibilidad del sistema de distribución con las diferentes condiciones.

- ❖ Se realizará la validación de los recursos que participan en la flexibilidad en un software especializado, considerando escenarios de baja y alta demanda, comparando el sistema antes y después de implementada la estrategia.

3.2 Limitaciones

OE1. Definir los recursos energéticos del sistema de distribución que participan en flexibilidad operativa.

- ❖ Solo se considerará generación solar fotovoltaica como fuente renovable.
- ❖ Los programas de gestión de demanda se aplicarán como máximo al 10% del total de los usuarios que participan en el consumo energético.
- ❖ Se consideran cargas distribuidas que se encuentren con un factor de potencia mayor o igual a 0.9.

OE2. Diseñar una estrategia que permita analizar el comportamiento del sistema al incluir las condiciones de flexibilidad en el sistema de distribución.

- ❖ No busca determinar un límite de generación renovable en un sistema determinado.
- ❖ Lo desarrollado se mantendrá exclusivamente en un entorno simulado.
- ❖ No se consideran eventos transitorios.

OE3. Validar la flexibilidad del sistema de distribución con las diferentes condiciones.

- ❖ No se busca una estrategia que permita conocer los límites de flexibilidad del sistema.
- ❖ Solo se buscará identificar las características que comprometan la flexibilidad de manera directa en los perfiles de tensiones y las curvas de demanda.

3.3 Entregables

Los entregables correspondientes al proyecto son los siguientes:

- ❖ Informe de avance.
- ❖ Anexos del informe final.
- ❖ Informe final.
- ❖ Estrategia.
- ❖ Póster.
- ❖ Presentación pptx del trabajo.
- ❖ Vídeo (Sustentación y Pitch).

4. ESTADO DEL ARTE

En esta sección se realizará el estado del arte con la finalidad de conocer las estrategias para estudiar la flexibilidad de los sistemas de distribución ante la conexión de la generación distribuida (GD) y la integración de la respuesta de la demanda (RD). Inicialmente, se definirá el contexto de la inserción de los recursos energéticos distribuidos; luego, se determinará el número de aportes investigativos, declarando los países líderes y autores destacados en el área de interés, para después realizar una breve presentación de definiciones fundamentales para el correcto entendimiento de este proyecto. Por último, se describirán, resumidamente, estudios y artículos que presentan esquemas y estrategias para el análisis y estudios acerca de la flexibilidad con la GD y la RD aplicadas, y modelos ampliamente difundidos de sistemas de distribución y de redes a pequeña escala.

El continuo desarrollo socioeconómico y tecnológico que tienen los países, en general, trae consigo un claro aumento de la demanda energética, donde Colombia es un claro ejemplo [9], hasta tal punto que el nivel de desarrollo se puede medir con el consumo en kWh per cápita. Es más, el incesante aumento poblacional junto con la rápida automatización de las industrias y los avances en domótica de las instalaciones residenciales aportan grandes exigencias energéticas a la red de cada una de las naciones [1]. Tanto que los mismos usuarios, con incentivos del gobierno para la generación de energías limpias, han incursionado en GD por medio del uso de fuentes de energía renovables no convencionales (FNCR) a pequeña escala [6], en la que se destaca la popular generación por celdas solares fotovoltaica (FV). Es claro que el ingreso poco controlado de recursos energéticos distribuidos (REDs), la carga descoordinada de los sistemas de almacenamiento por baterías (SAEB) y entre otras operaciones por parte de la demanda, ocasiona problemas, tanto en la calidad de la energía como una disminución de la flexibilidad operativa en el sistema eléctrico de potencia (SEP) de baja tensión [1]. De manera lógica se espera un impacto positivo como resultado de la determinación de esquemas y/o estrategias que controlen la flexibilidad operativa del lado de demanda y esfuerzos en conjunto con los operadores de red (ORs) de los sistemas de distribución [1].

En Colombia, pese a la conformación de su matriz energética, donde la energía hidráulica desempeña un rol fundamental (alrededor del 70% de la capacidad instalada, según ACOLGEN), se están realizando esfuerzos notables para realizar una transición energética íntegra [3], con especial enfoque a las FNCR e incentivando la GD y autogeneración (AG), para suplir el déficit energético del país, [3] y [9]. En este orden, el gobierno plantea que para el 2022 se beneficien alrededor de 110.000 familias, es más, otro objetivo que se plantea es la implementación de celdas solares PV en cada institución gubernamental [3]. Asimismo, contando el alto índice de incumplimiento de las metas planteadas por el gobierno y, a su vez, los esfuerzos de las partes involucradas en el sector energético, se espera una inserción significativa de los mismos, como lo son los REDs de tipo generación, por lo que es claro la urgencia y necesidad de plantear protocolos y estrategias relacionadas a la penetración de las REDs y un continuo crecimiento de estas [2]. Consecuentemente, este artículo realiza el diseño de una estrategia para determinar y garantizar la flexibilidad operativa en SD con un nivel de penetración creciente de los REDs.

Resaltando la problemática que conlleva el estudio de la flexibilidad, partiendo desde lo complejo que es su definición en sí, hasta las perspectivas tomadas en la aplicación de los conceptos en los sistemas de distribución. En consecuencia, se han realizado numerosos estudios como respuesta a este concepto. Revisando la literatura asociada a los términos flexibilidad, gestión de demanda y RED se puede observar grandes esfuerzos por parte de ingenieros e investigadores de países como Estados Unidos, India, China, Finlandia y entre

otros. En la base de datos Scopus e IEEE se han encontrado 226 artículos relacionados con el concepto de flexibilidad en sistemas de distribución, de los cuáles la totalidad de estos se han escrito a partir del 2011, declarando así el nivel de insipiencia de dicho campo. Por otro lado, el autor con mayor actividad en estos estudios fue Nguyen, P.H. Con 12 artículos en Scopus, del mismo modo, Pierluigi Mancarella figura con 11 escritos asociados en IEEE.

Es fundamental acotar el concepto de “flexibilidad operativa” que se abordará en este proyecto. A la par, es de gran relevancia destacar que pese a los esfuerzos incipientes en este campo de la ingeniería de redes, hay una considerable cantidad de textos especializados y afines que usan dicho término. Por lo tanto, lo anterior deja en evidencia la complejidad en obtener un consenso en el término eje del proyecto. Como primera base conceptual, en [10] se define la flexibilidad operativa como la capacidad asociada a un sistema de potencia para absorber eventos o perturbaciones con la finalidad de mantener un estado operativo seguro. Esto quiere decir que un sistema se considera flexible en términos operativos cuando su sistema de control garantiza en su continua operación un comportamiento de los parámetros del SEP dentro de los rangos requeridos para considerar que se encuentra en un estado normal.

Por otra parte, en [11] se define la flexibilidad como la capacidad de explotar los recursos disponibles dependiendo del comportamiento y exigencias de la demanda. Se clasifica la flexibilidad en un componente físico y uno estructural, lo cual añade una mayor dificultad para determinar la generalización del término en estudio [12]. Primeramente, la flexibilidad física apunta a la competencia del sistema en respuesta a la demanda y a la generación. En cuanto al aspecto estructural, este consiste en aprovechar la flexibilidad física por medio de instrucciones operativas a través de la adecuación económica del mercado energético. Como se puede observar, existe una relación inherente entre ambas definiciones, por lo que no se pueden extraer una de ellas de manera aislada ya que la flexibilidad física no es suficiente por sí sola y la flexibilidad estructural surge como respuesta de insuficiencia de la primera.

En [12] se sigue el mismo principio que en [11], discrepando en la percepción hacia la funcionalidad de flexibilidad de un SEP, en esta se concibe como un producto, el cual puede ser adquirido y, es fundamental a la hora de la coordinación de los REDs. Este “producto” puede ser agregado por los proveedores y terceros generando un flujo de ingresos en el mercado de distribución. Grosso modo, la flexibilidad en [12] es un producto gestionado en orden de satisfacer adecuada y rápidamente las necesidades del mercado, actuando como soporte para un SDL determinado.

Se puede observar en [1] un análisis de la flexibilidad con relación al grado de inserción de los REDs, haciendo uso de esquemas de flexibilidad del lado de la demanda para cada tipo de RED, para asegurar una integración natural y evitar los problemas que la descoordinación de dichos recursos traen consigo (irregularidades de tensión y en límites térmicos). Los esquemas consisten en un análisis regulatorio de la penetración de los REDs y de la RD, empleando datos de SD reales -por ejemplo, del Reino Unido- y comportamientos fieles de los recursos energéticos; luego, se realizan simulaciones heurísticas de la red usando el método de Monte Carlo, donde se emplea un estudio estocástico de los REDs de tipo consumo, almacenamiento (SAEB) y generación (énfasis en la generación por PV), se evidencian los impactos de la inserción desregularizada de estos recursos (caso base) por medio de la evaluación del SD con cinco criterios, donde se registran los problemas de tensión y el esfuerzo térmico de los transformadores

alimentadores; consecuentemente, se aplican los cinco (5) esquemas de RD, declarando el desempeño de estos con respecto al caso base y entre sí. Por otro lado, un aspecto clave de [1] es la importancia que los autores le atribuyen a la aceptación de los usuarios, aplicando así encuestas a estos preguntado si emplearían alguno de los métodos de RD mencionados. Los resultados del estudio brinda una confiabilidad tanto técnica, como de aceptación pública, para los niveles de penetración desde 10 a 40% de los REDs sin problemas de servicio, es más, presentando beneficios en mitigación de los problemas de tensión y de las violaciones térmicas en los alimentadores.

En [13] se desarrolla una evaluación holística de la inserción de los REDs en la red de distribución de New York, USA, con el principal objetivo de declarar la viabilidad del crecimiento en materia de dichos recursos y brindar rutas operativas para garantizar la correcta implementación de estos. Asimismo, dentro de los objetivos del proyecto “New York Reformando la Visión de la Energía” se encuentra la reducción del 40% en las emisiones de gases de efecto invernadero desde los niveles presentados en los años 90's y generar el 50% de la electricidad a partir de FNCERs. En este orden de ideas, la Electrical Power Research Institute (EPRI) determinó una hoja de ruta basada en la capacidad de alojamiento -determina la cantidad de REDs que pueden ser agregadas sin impactar negativamente - en cada uno de los puntos de conexión del SD de la ciudad; declarando así que: con el fin de aumentar los REDs surge la tendencia de realizar una reducción en la generación distribuida con la finalidad de aumentar la capacidad de conexión. Del mismo modo, en este artículo, se determina una estrategia denominada Soluciones de capacidad de interconexión flexible (SCIF) donde se destaca el manejo innovador de los REDs, y demás elementos del SD involucrados, por medio de la Gestión de Red Activa (GRA).

Por último, en el presente trabajo, específicamente en la sección 5.2, se ahondará en las tres metodologías previamente mencionadas que sirvieron de apoyo para el diseño de la estrategia objetivo, dichas metodologías son aquellas desarrolladas en [1], [12] y [13].

5. INFORMACIÓN DETALLADA

En esta sección se presenta la acotación metodológica, la ruta seguida para el desarrollo de la estrategia objetivo, fundamentos teóricos, definición y comprobación del proyecto de diseño; nominalmente, las partes abordadas son: Metodología y Diseño de ingeniería. En la Metodología se especifica el marco normativo, las restricciones del proyecto y el análisis de riesgos, mientras que en el Diseño de ingeniería se determina la identificación del problema, alternativas de diseño, la evaluación de estas y el diseño de la propuesta seleccionada; así desarrollando la estrategia de flexibilidad operativa para la correcta inserción de los REDs en el SD y la caracterización de la red escogida, IEEE 13 nodos, con sus respectivos escenarios de comprobación donde se evidencian la efectividad de dicha estrategia.

5.1 Metodología

La realización del proyecto propuesto implicó seguir la ruta mostrada en el diagrama de flujo de la Figura 1: se partió con la etapa 0 donde se seleccionó la problemática de la penetración significativa y descontrolada de los REDs, elección de herramientas computacionales y de análisis (Excel, OpenDSS, entre otras) y artículos que sirvieron de guía para la elaboración de la estrategia operativa; luego, en la etapa 1 se procedió con la caracterización del sistema elegido, IEEE 13 nodos, y así en la etapa 2 determinar la estrategia en concreto. Consecuentemente, en la etapa 3 se validó la eficacia de lo concebido en 2 en una ruta de retroalimentación entre estos dos estados del desarrollo del proyecto. Por último, localizados en la etapa 4, se realizó la formalización y materialización de los documentos técnicos y entregables requeridos para la culminación del proyecto de grado presentado.

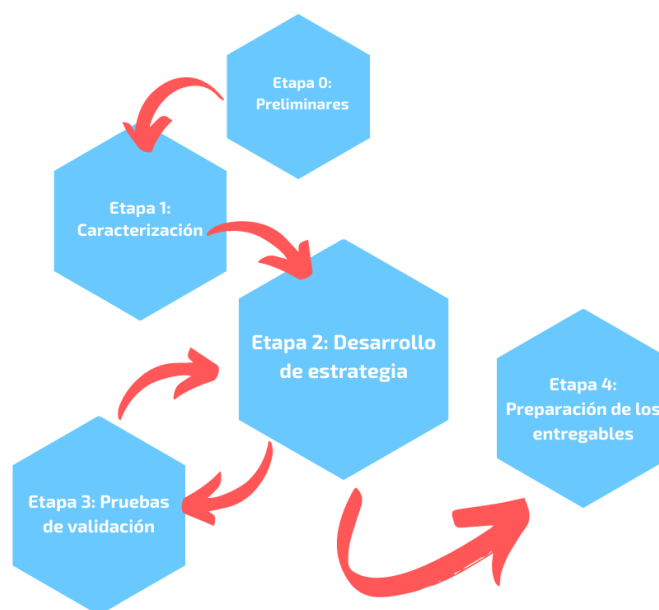


Figura 1. Diagrama de flujo para el diseño de la estrategia de flexibilidad operativa por RD en el SDL. Fuente: elaboración propia.

5.1.1 Marco normativo

Al momento de realizar la estrategia presentada en este documento se tuvo en cuenta las siguientes normativas:

- IEEE 1547: Estándar para la interconexión de recursos distribuidos con sistemas de energía eléctrica.
- CREG 025 de 1995: Determinación de condiciones para la regulación de voltaje para los niveles del SIN.
- CREG 131 del 2020: Condiciones para la implementación de la infraestructura de medición avanzada en el SIN.
- CREG 002 del 2021: Revisión de las reglas de autogeneración a pequeña escala y generación distribuida.

5.1.2 Análisis de riesgos

En este apartado se abordarán los riesgos presentes en el proyecto, los cuales pueden causar tanto un retraso temporal como permanente en el cumplimiento de los objetivos. La importancia de tener en cuenta dichos riesgos es el prepararse por medio de estrategias las cuales mitigan el impacto.

En la Figura 2 se evidencia la matriz de riesgos del proyecto en estudio. Cabe destacar que en el Anexo 1 se presentan en detalle los riesgos que se enfrentaron en el proyecto, además se evaluó su impacto, tanto de forma económica como en tiempo de retraso.

Frecuente	0	1	0	0	0
Probable	2	0	0	0	0
Ocasional	1	3	1	0	0
Posible	0	0	0	0	0
Improbable	0	0	2	0	0
	Insignificante	Menor	Moderado	Mayor	Catastrófico

Figura 2. Matriz de riesgo resumida del proyecto. Fuente: elaboración propia.

5.2 Diseño en ingeniería

El diseño de la estrategia consta de 4 subcategorías secuenciales, las cuales son las siguientes: identificación del problema, alternativas de diseño, evaluación y selección de la alternativa a diseñar, y el diseño de la estrategia particular de este proyecto de ingeniería

5.2.1 Identificación del problema

La entrada descontrolada de los REDs originan problemas serios de calidad de la energía, como lo son la caída y el aumento de voltaje, algunas de las que se pueden nombrar, son las siguientes: la fluctuación de la generación FV y eólica a pequeña escala, descoordinación de carga de elementos de SAEs, REDs de tipo consumo (como lo son los vehículos eléctricos). Otro de los daños posibles es el esfuerzo de los transformadores alimentadores en el SDL [1]. Aterrizando al caso Colombiano, como se especificó en la introducción, hasta donde se tiene conocimiento, no se ha implementado una estrategia práctica que facilite el estudio de la flexibilidad en la operación del sistema de distribución a partir de los nuevos recursos que interactúan en él. Una de las razones de lo anterior, posiblemente, se debe a la poca información operativa asociada al nivel de distribución, lo cual ocasiona el desaprovechamiento de los recursos existentes y a implementar en el SIN, generando así impactos operativos. La gestión de estos recursos energéticos debe garantizar un beneficio para la flexibilidad del SD, tal y como se da en las redes de transmisión [2]; lo anterior anima a la búsqueda de esquemas para garantizar la penetración adecuada de los REDs haciendo uso del análisis de la FLD por medio de la RD.

5.2.2 Alternativas de diseño

Como se dijo anteriormente, en la etapa 2 se desarrolló la determinación de la estrategia objetivo de este proyecto de ingeniería; naturalmente, se inició con la elección de una estrategia existente que sirviera de guía y fundamento. En la Figura 3 se aprecian tres denominaciones de estrategias tentativas, estas representan lo analizado y desarrollado en [12], [1] y [13]. De este modo, en la Tabla 1 se describen detalladamente



Figura 3. Propuestas bases en donde se erigió la estrategia presentada. Dichas propuestas condensan lo presentado, de izquierda a derecha, en [12], [1] y [13]. Fuente: elaboración propia.

Solución 1	Solución 2	Solución 3
Se puede decir que un “aggregator” es un operador del mercado local que supervisa la transacción de flexibilidad de la comunidad energética local. Este enfoque se puede dividir en 2 partes: totalmente despachable e impulsado por el precio.	Aplicación de 5 FLD asegurando la regulación de voltaje SDL con gran penetración de REDs: I. Manejo de carga (MC). II. Manejo de carga inverso (MCI).	Esta alternativa se basa en la capacidad de alojamiento , que es definida como “la cantidad de recursos energéticos distribuidos que se pueden acomodar sin afectar negativamente la calidad o confiabilidad de la energía”.

	III. Crecimiento estratégico de la carga (CEC) IV. Conservación estratégica (CE). V. Carga flexible (CF).	
Beneficios		
1. Utiliza información en tiempo real para ajustarse a la oferta/demanda del mercado. 3. Gestión del OR. 4. Rol activo del prosumidor.	1. Se basa en datos reales. 2. Emplea criterios fuertes de calidad del servicio. 3. Aceptación de los usuarios. 4. Resultados prometedores con mecanismos regulatorios. 5. Caracterización real de los tipos de DERs y análisis de escenarios críticos con alta penetración de DERs.	1. Posibilidad de clasificar áreas dependiendo los RED 2. GRA actúa en eventos locales en su mayoría, gestionados automáticamente. 3. La plataforma de GRA es escalable, lo que implica que se puede adoptar en futuros proyectos.
Desventajas		
1. Alto enfoque en el factor económico. 2. El OR actúa únicamente en casos particulares. 3. No plantean un modelo escalable.	1. Los OR no cumplen ningún rol aparente. 2. Falta declarar las limitaciones lisis tecno-económico de la aplicabilidad de estos.	1. Alta dependencia de los REDs. 2. Necesidad de nuevas herramientas y programas para la planificación avanzada.

Tabla 1. Descripción detallada de las propuestas bases elegidas, siendo soluciones 1, 2 y 3 las que se plasman, respectivamente, en [12], [1] y [13].

5.2.3 Evaluación y selección de la alternativa a diseñar

Ya esbozadas las estrategias bases tentativas para soportar el desarrollo de la propia de este proyecto de ingeniería, se procedió a la evaluación sistémica y analítica de las mismas por medio de 4 criterios claves; dichos criterios se definen como sigue:

1. **Lineamientos operativos:** se requiere que la estrategia suministre resultados para procurar la calidad de la energía y, especialmente, el balance óptimo de la generación y demanda. Se han de enmarcar los rangos de tensión y frecuencia similar a lo estipulado [6], esto es, respectivamente, 0.9 a 1.1 p.u. y entre 59.8 y 60.2 Hz.
2. **Aceptación del usuario:** se ha de empoderar a los usuarios y facilitar la asimilación de las estrategias planteadas; la aceptación del lado de la demanda con DERs ha de ser mayor o igual al 50%.
3. **Escalamiento:** la solución a implementar debe permitir un grado de penetración de los REDs cada vez mayor con resultados favorables de, al menos, 50%.

4. **Practicidad:** la alternativa presentada ha de ser estudiada con base a perfiles de consumo y generación reales, asimismo, analizada por medio de escenarios extremos y críticos en un software especializado.

Dados los criterios, en la Tabla 2, se clasifican las estrategias consideradas, con calificación de uno (1) para aquellas que no cumplieron con las condicionales del criterio en uso; consecuentemente, aquellas soluciones tentativas que no cumplieron recibieron una valoración de cero (0). Como es evidente, la metodología de la solución 1 plasmada en [1] cumplió a cabalidad cada uno de los criterios de evaluación y, por lo tanto, fue escogida como soporte teórico y guía del diseño de la estrategia que se presenta en este documento.

Criterio	Rango óptimo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Peso
Criterio 1	[0.9 a 1.1 p.u.] y [59.8 y 60.2 Hz]	1	1	1	10 %
Criterio 2	>50%	0	1	0	30%
Criterio 3	>50%	0	1	1	30 %
Criterio 4	NA	0	1	0	30%

Tabla 2. Decisión que determinó la elección de la metodología guía para la elaboración de la estrategia del proyecto.

5.2.4 Diseñar la alternativa seleccionada

La estrategia tiene como objetivo identificar cómo la inserción de los REDs de un SD influye en términos de flexibilidad operativa de dicho sistema. Consecuentemente, se comprobó el nivel de efectividad de la estrategia elaborada por medio de un conjunto de escenarios, que brinda un panorama del sistema y sus variantes. Se hizo énfasis, principalmente, en el comportamiento de los perfiles de tensión en los diferentes nodos del sistema en estudio -IEEE 13 Nodos [8]-. Como se declaró en el anterior inciso, 5.2.3, para el diseño de estrategia se consideró las metodologías descritas en [1], [12] y [13] como apoyo teórico, con especial enfoque a la primera de ellas; a la par, de las distintas normativas, tanto nacionales como internacionales, mencionadas: [4], [5], [6] y [7]. La siguiente secuencia de pasos es la recomendada para llevar a cabo la correcta inserción de los REDs en un SD determinado:

1. Caracterización del sistema: para iniciar los esfuerzos del análisis de la flexibilidad es necesario, en primera instancia, obtener los datos de los elementos existentes y aquellos próximos a intervenir en el sistema como es contemplado en [4] y [6]; es menester un análisis de los componentes del sistema supeditado en identificar y caracterizar los recursos distribuidos, de los que podemos destacar los siguientes elementos:

- Dispositivos de generación FV: los aspectos claves, como se denotan en [9], son la potencia nominal [7], las curvas de generación, ubicación estratégica y el tipo de demanda inicial a suplir, es decir si es industrial o residencial.
- SAEBs: básicamente, se deben identificar la capacidad de almacenamiento, ciclos de carga y descargas, la potencia pico a suministrar y si el almacenamiento se encuentra compuesto por bancos de baterías de ciclo profundo o si estos son sensibles a verse sometidos a cambios de demanda repentinos.
- Equipos para la regulación de tensión: se ha de definir si el sistema cuenta con reguladores específicos los cuales se encarguen de mantener los perfiles de tensión dentro de los límites que establece [5].
- Elementos de compensación de reactivos: se deben registrar los equipos como lo son: SVC, STATCOM, SVC, entre otros; destacando principalmente su capacidad de operación, potencia nominal y conexión con el sistema principal.

Adicionalmente, se debe hacer un análisis de la topología de la red en estudio, lo cual requiere conocer la naturaleza de la demanda que debe satisfacer, es decir, si se trata de una carga balanceada o no. La importancia de hacer este procedimiento de reconocimiento radica en que se pueden identificar herramientas o características que pueden utilizarse en aras de aportar positivamente a la flexibilidad operativa.

2. Análisis de los perfiles de tensiones en el sistema: esta etapa se enfocará directamente en identificar los nodos críticos del sistema, es decir, los cuales se encuentren en cercanías de cruzar los límites establecidos por la normativa [5]. Para ello, se establece inicialmente un análisis con el comportamiento regular de la demanda, estos datos pueden extraerse del mismo sistema en campo, siempre y cuando el SD cuente con el debido equipo de monitoreo, supervisión e instrumentación que sugiere [4] y [6] así avanzando en la modernización de la red de distribución. De no contar con la capacidad de observación del SD, se debe modelar el sistema apoyándose en registros históricos de la demanda y las

características de los elementos próximos a ingresar, simulando de este modo los escenarios contingentes [13].

3. Comportamiento de la demanda en el sistema: determinar el comportamiento de la demanda es primordial a lo largo del período de análisis determinado. Para este aspecto, considera que un periodo de análisis es equivalente a un día. Cabe destacar que en este aspecto se requiere el uso de base de datos con sus registros más recientes. En el caso de contar con poca información se debe realizar un estudio adicional para determinar un estimado del comportamiento a lo largo de un periodo. Es importante considerar por lo menos 3 escenarios, tomando como base una curva de demanda que se encuentre establecida como la más típica del sistema, es decir, la que muestre el comportamiento más cercano a la mayoría de los días del año.

- Caso de poca demanda: Se deben considerar escenarios con valores de demanda por debajo del 90% del valor establecido como base.
- Escenario típico: Comprende valores desde el 90% de la demanda base hasta el 110%.
- Escenarios de alta demanda: Comprenden valores por encima del 110% de la demanda base.

Lo primordial de este análisis radica en 2 puntos. Primeramente se busca identificar la sensibilidad del sistema al someterlo a cambios de demanda. Lo anterior se realiza con la finalidad de determinar los nodos críticos del sistema, los cuales se identificarán con pendientes pronunciadas en las variables estudiadas.

4. Clasificación de resultados: En esta sección se deben recopilar los resultados de las diversas muestras tomadas en campo o en el software de simulación seleccionado, con la finalidad de identificar la flexibilidad del sistema. Se sugiere el uso de elementos gráficos para facilitar el estudio del conjunto de datos. Es opcional por parte del equipo de analistas si se clasificaron en términos de perfiles de tensión, curvas de demanda o se abordará una sección para cada aspecto.

5. Plan de respuesta y prueba con ajustes: este paso consiste en analizar los resultados anteriormente clasificados, declarando las debilidades y falencias del sistema, luego, a partir de los REDs a disposición y por medio de las soluciones de RD se incrementa la flexibilidad operativa del sistema en estudio. Lo anterior implica que dichas soluciones deben tener como prioridad inicial la participación activa de los usuarios como se plantea en [1] y, a su

vez, con la constante vigilancia de los ORs como se especifica en [4] y [12]. Luego, se procede con la puesta a prueba de las soluciones propuestas, determinando de este modo la efectividad de los esquemas empleados para mitigar los problemas de red; el análisis de éxito de la metodología implementada ha de tener como premisas fundamentales tanto el cumplimiento de seguridad del sistema (5.a), como que las variables pertinentes estén dentro de los rangos de la normativa establecida (5.b) [5].

- Sugerecias de alternativas para mitigar problemas en la red:

La estrategia desarrollada en [1] presenta 5 esquemas de FLD esto es, por medio de la gestión demanda y, a su vez, cuenta con una gran aceptación por parte de los usuarios. Los esquemas de RD que mitigan los problemas presentes en el SD se presentan a continuación:

I. Manejo de carga (MC o, en sus siglas en inglés, LS), redistribuyendo la demanda total y manteniendo la energía total por periodo de tiempo.

II. Manejo de carga inverso (MCI o, en sus siglas en inglés, RLS), redistribuyendo la oferta total y manteniendo la energía total por periodo de tiempo.

III. Crecimiento estratégico de la carga (CEC o, en sus siglas en inglés,SLG), aumentando la demanda total y, por tanto, la energía total.

IV. Conservación estratégica (CE, o, en sus siglas en inglés,SC), disminuyendo la demanda total y, por tanto, la energía total.

V. Carga flexible (CF o, en sus siglas en inglés, FL), que modifica la demanda en función de cada caso.

6. Monitoreo continuo para fortalecer la interoperabilidad:

Como es natural, luego de aplicar lo exigido en los incisos anteriores, se ha de aprobar la inserción de los REDs declarados. En este orden, los ORs y los usuarios, pese al análisis realizado, han de continuar con el respectivo monitoreo y supervisión de las variables de tensión y frecuencia en los puntos de interés, asegurando así la calidad de la energía del servicio [4] y [5].

Como cierre: se plasma en la Figura 4 el diagrama de flujo de decisiones de la estrategia planteada en este documento.

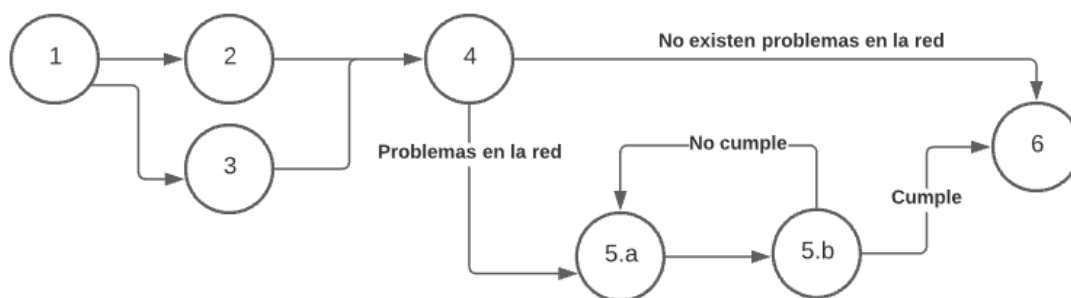


Figura 4. Diagrama de flujo de la “ESTRATEGIA DE GESTIÓN DE RECURSOS ENERGÉTICOS: FLEXIBILIDAD OPERATIVA EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN”.

6. PRUEBAS, RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este apartado se desglosan y analizan los resultados obtenidos a través de las pruebas de penetración de los REDs sometidas al sistema IEEE 13 Nodos por medio del software OpenDSS; dichos resultados podrán ser vistos por medio de figuras y tablas respectivas. Procedimentalmente, se abordaron las siguientes subsecciones: planeación de la prueba, ejecución del plan experimental, resultados y análisis e interpretación.

6.1 Planeación de la prueba

Se han determinado los escenarios contingentes respecto a la demanda y los REDs tipo generación, como lo son los FV y SAEB, en el sistema de estudio IEEE 13 Nodos, descrito en [8], por medio de simulaciones en el software OpenDSS. Asimismo, se presentan las hipótesis nula y alternativa, la elaboración del caso y el método de validación empleado.

6.1.1 Hipótesis

Como se especificó en la introducción, el crecimiento y la rápida inserción de los REDs a las redes de distribución causó que los ORs y entes involucrados cuestionaran los impactos operativos que pueda causar en términos de seguridad y calidad del servicio [1]. A partir de la afirmación mencionada, se obtiene la hipótesis nula y afirmativa, que se describen a continuación:

-Hipótesis nula (H_0): la estrategia planteada que inserta los REDs impactan negativamente la flexibilidad operativa del sistema de distribución.

-Hipótesis alternativa (H_1): la estrategia planteada que inserta los REDs impactan positivamente la flexibilidad operativa del sistema de distribución.

6.1.2 Elaboración del caso

Con la estrategia planteada en la fase de diseño, se procederá en realizar la primera parte, la cual consiste en la caracterización del sistema. Para ello detallarán de los elementos del sistema base que se utilizará para para realizar la validación. Empezando, por los elementos como las líneas, transformadores, cargas, elementos de compensación y regulación que componen el sistema para finalizar con los recursos distribuidos que se pueden utilizar. Dicha información se puede encontrar en el Anexo 2.

Para el análisis se ha seleccionado el sistema IEEE de 13 nodos que se muestra en la Figura 5. A pesar de ser un sistema con un poco número de nodos, estos están configurados de tal forma que facilitan el análisis de un sistema de distribución y cuenta con los elementos claves que requiere el análisis de flexibilidad operativa.

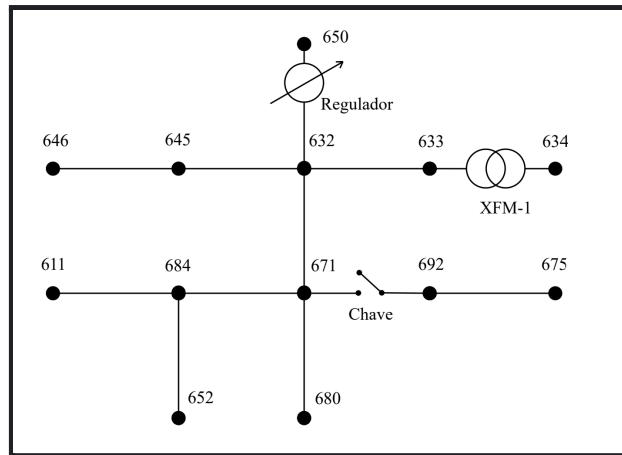


Figura 5: Sistema IEEE de 13 barras sin modificaciones. Tomado de [8]

6.1.3 Método de validación

Se recolectó información del sistema de prueba sin REDs al someterlo a diferentes escenarios de demanda, para identificar los puntos a mejorar. Luego, se planteó un plan de respuesta con el uso de los REDs de tipo generación, para finalmente realizar pruebas de la efectividad del ajuste en la red y comparar los dos escenarios.

6.2 Ejecución del plan experimental

6.3 Resultados

En esta sección se ilustran los resultados obtenidos con el sistema base, sometidos a escenarios tanto de baja como alta demanda. Luego, se clasifican los resultados para plantear una propuestas con énfasis en los REDs, con lo que se busca aportar en el beneficio de la flexibilidad operativa. Finalmente, se hicieron pruebas que validaron el funcionamiento de la estrategia evidenciando las diferencias fundamentales entre el sistema base y el ajustado con REDs.

6.3.1 Resultados de sistema base

En esta sección se muestran los resultados del sistema base, es decir, sin la inclusión de REDs. Se evidencia, por las Figuras 6 y 7, que el sistema en su estado original cumple las regulaciones de tensión de -0.9 a 1.1 p.u.-

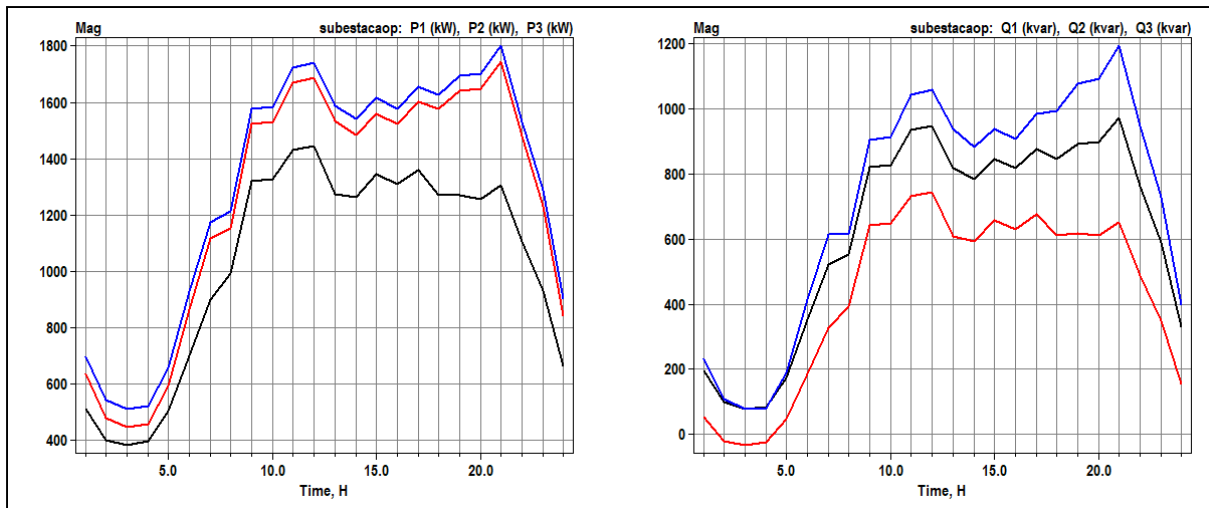


Figura 6. Valores de potencias activa y reactiva registrados en la subestación alimentadora por hora en el sistema base.

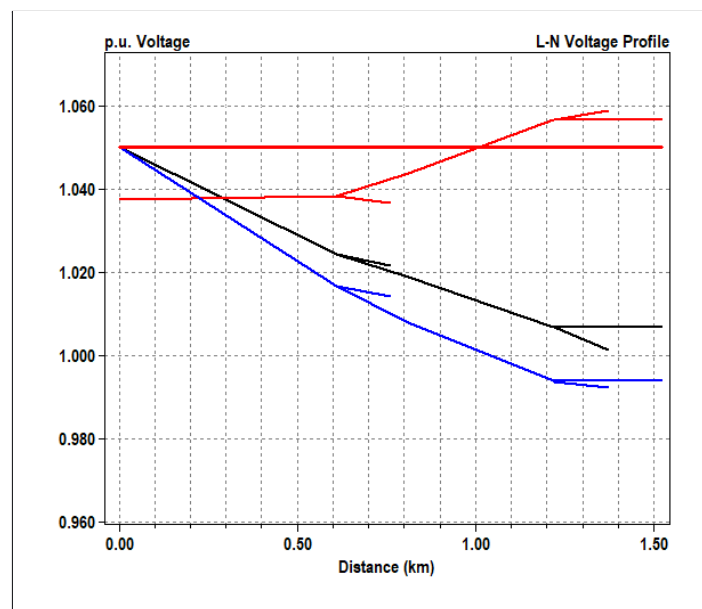


Figura 7. Perfil de tensión de las fases en el escenario base.

6.3.2 Resultados de sistema escenario de baja demanda

En este inciso se presenta parcialmente los resultados del escenario de disminución de carga de 15%, estos son carga al 85% y 55%, Figuras 8, 9, 10 y 11, -para encontrar el escenario de 70% remitirse al Anexo 3-, donde se evidencia que no hay ningún tipo de violación con respecto a los límites de regulación de voltaje.

-Reducción de la carga a 85%:

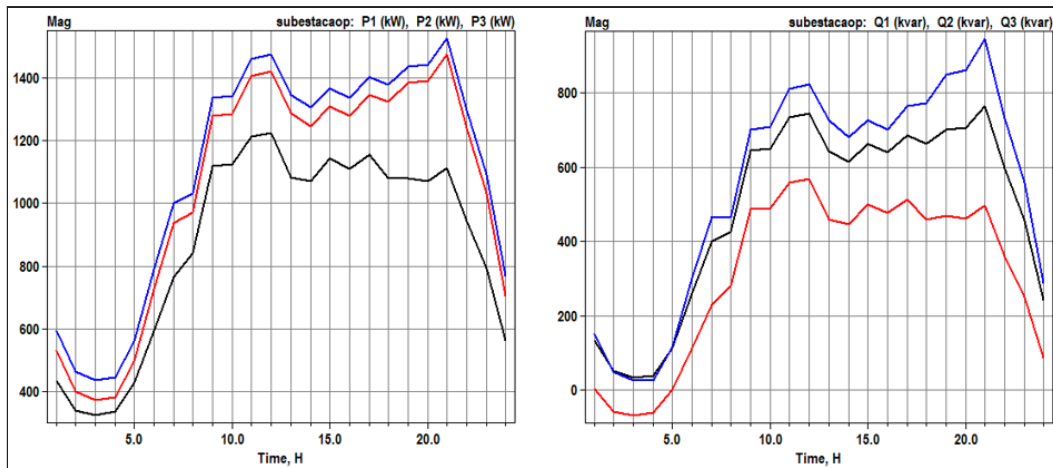


Figura 8. Valores de potencias activa y reactiva registrados en la subestación alimentadora por hora en el escenario de reducción a 85% de la demanda.

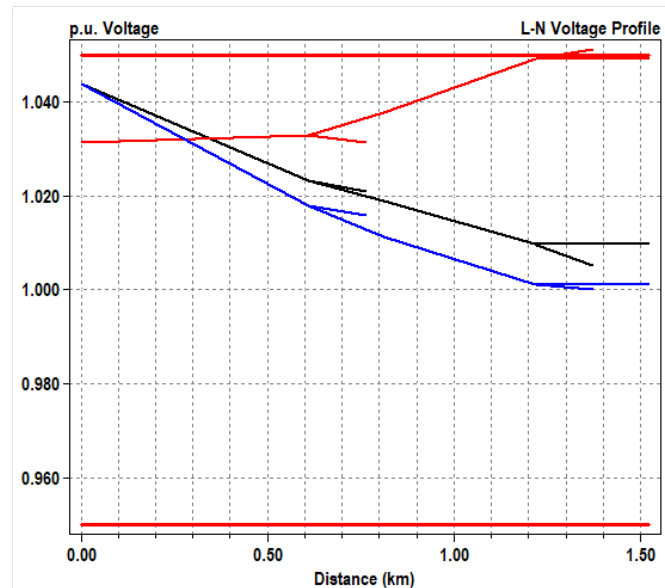


Figura 9. Perfil de tensión de las fases en el escenario de reducción a 85% de la demanda.

-Reducción de la carga a 55%:

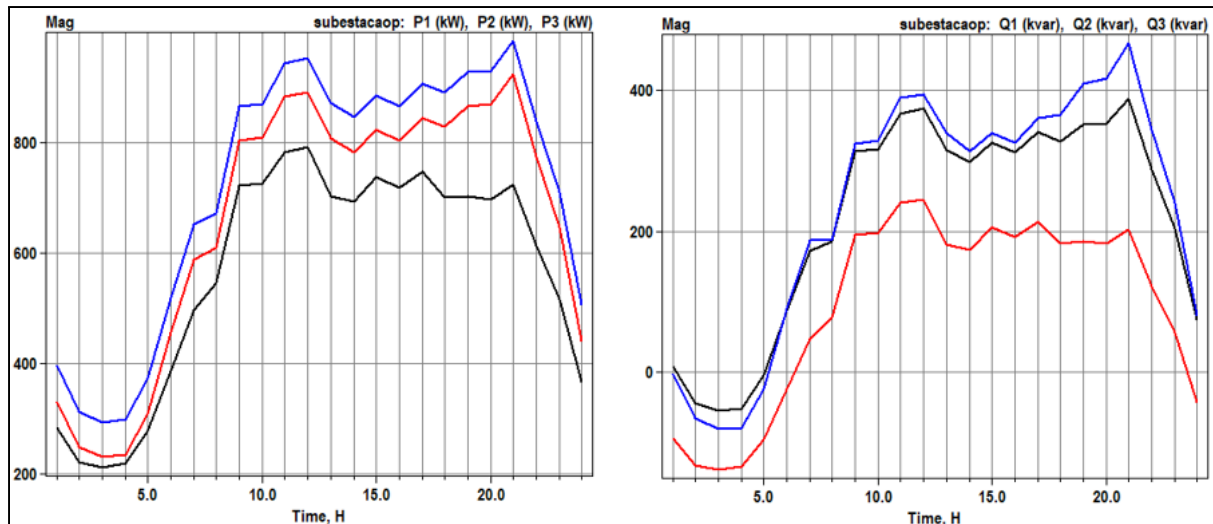


Figura 10. Valores de potencias activa y reactiva registrados en la subestación alimentadora por hora en el escenario de reducción a 55% de la demanda.

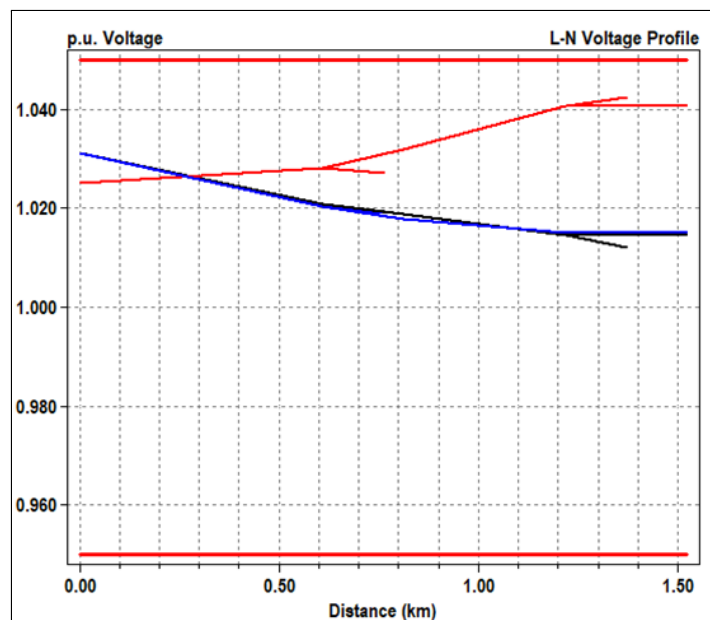


Figura 11. Perfil de tensión de las fases en el escenario de reducción a 55% de la demanda.

6.3.3 Resultados del sistema escenario de alta demanda

Las figuras 12 a 13 muestran los valores de potencia y tensión respectivamente en el escenario de aumento de demanda al 110% de su valor típico.

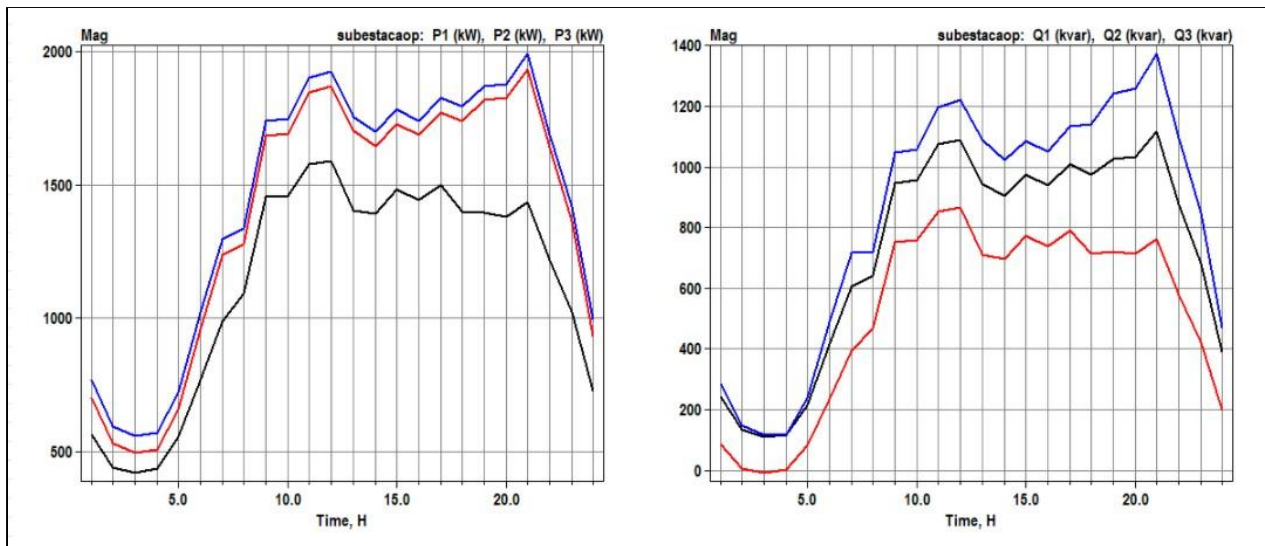


Figura 12. Valores de potencias activa y reactiva registrados en la subestación alimentadora por hora en el escenario de aumento a 110% de la demanda.

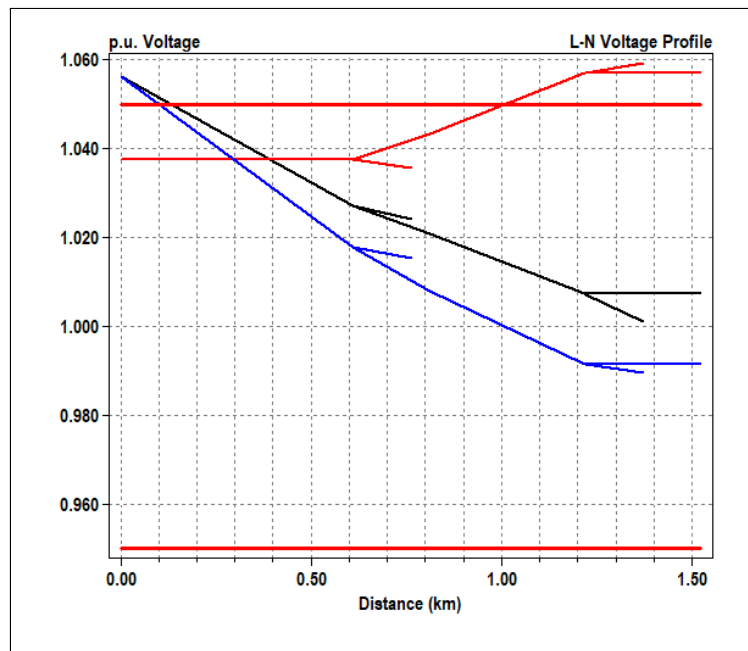


Figura 13. Perfil de tensión de las fases en el escenario de aumento a 110% de la demanda.

En el Anexo 3 se presentaron incrementos del 150%, 250%, 350% y 450% pero se presentaron problemas en los perfiles de tensión a partir de una carga de 250%, escenario que es atípico, pero puede ser posible si el sistema como tal no se moderniza o no se tiene en cuenta el aumento paulatino de la demanda.

6.4 Análisis e interpretación de resultados

Luego de realizar las anteriores pruebas se tienen las siguientes observaciones:

- El sistema en términos de perfiles de tensiones se comporta de manera adecuada para los escenarios de alta y baja demanda, es decir, se encuentran entre 1.1 y 0.9 p.u como lo establece la CREG. Lo anterior implica que con los recursos básicos con los que cuenta este, puede mantener tensiones adecuadas, pero no está exento a altas variaciones y cambios en la carga, por lo que se tiene un techo de demanda bien definido.
- La curva de demanda base del sistema, es decir, la que se presenta de forma más típica a lo largo del funcionamiento de éste presenta pendientes y valores máximos y mínimos, como se observa en la Figura 14 que pueden ser ajustados con el uso de REDs. En la siguiente sección se plantea una estrategia para mejorar este aspecto en el sistema.

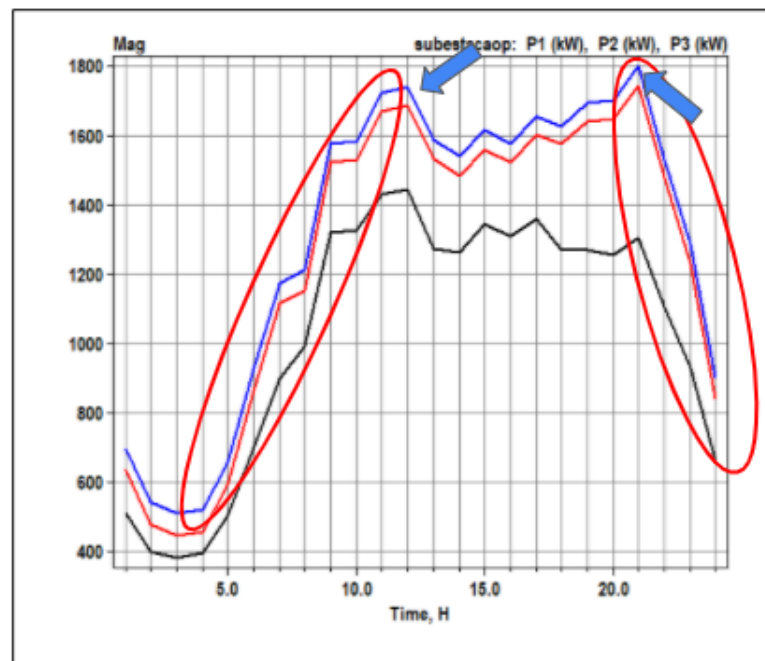
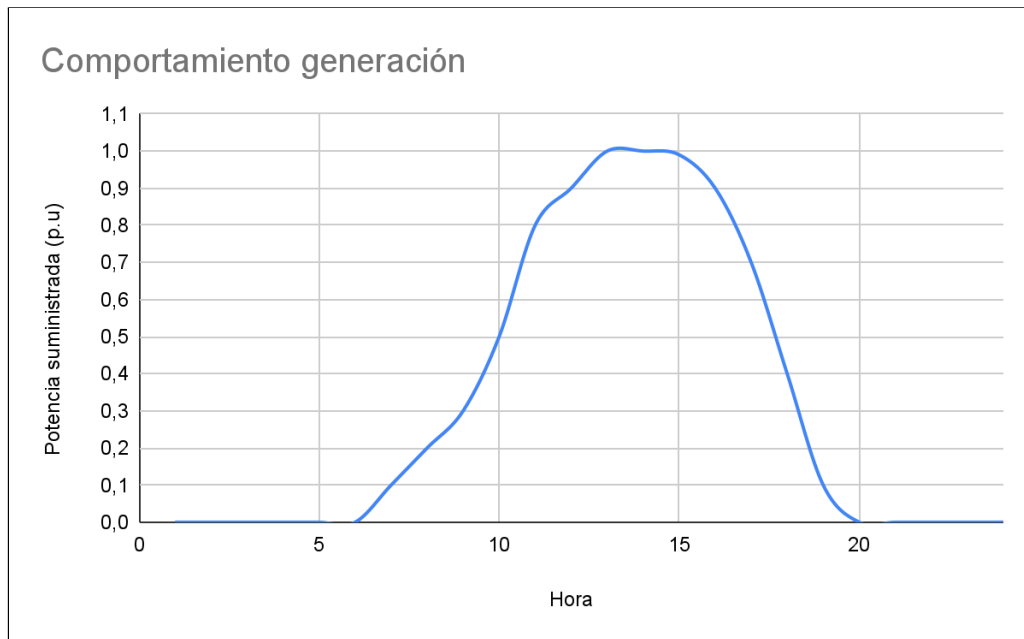


Figura 14. Declaración de las regiones a mejorar por medio de los REDs en la curva de potencia del sistema base.

6.4.1 Plan de respuesta y prueba con ajustes

Para la solución implementada se considera la incursión de REDs como lo son la GD por FVs y el uso activo de SAEBs, con la finalidad de reducir las pendientes en la curva de demanda y los valores picos. En el Anexo 3, se muestran los resultados con más detalle, los cuales evidencian que estos REDs mejoran la flexibilidad operativa del sistema. A continuación, en la tabla 3 se muestran las características de la generación solar fotovoltaica instalada y en la figura 15 se ilustra su comportamiento a lo largo del día.

Implementación Generación solar	
Potencia pico [kW]	1000
Potencia nominal transformador [kVA]	750

Tabla 3. Características de la generación solar.**Figura 15.** Comportamiento de la generación solar.

Por otro lado, en la tabla 4 se muestran las características del sistema de almacenamiento instalado; mientras que en la figura 16 se ilustra su comportamiento a lo largo del día, donde aclara que la curva de generación se apoya en un período de irradiación solar característica de las zonas aledañas de Washington D.C., USA.

Implementación en almacenamiento	
Potencia pico kW	450
Capacidad kWh	2250

Tabla 4. Características del almacenamiento.

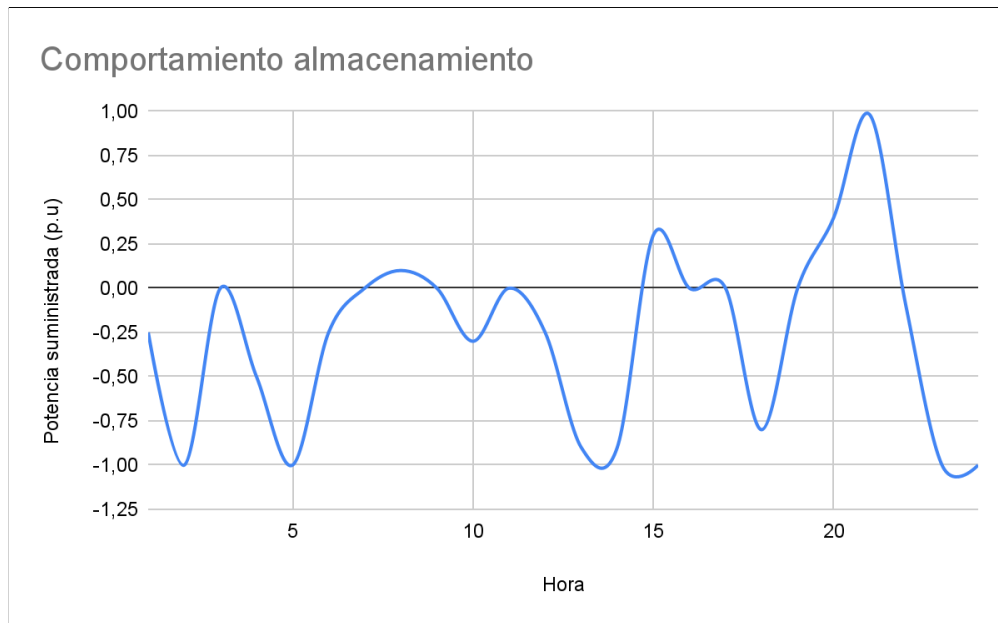


Figura 16. Comportamiento del almacenamiento.

Luego de planteada las características de los REDs se procedió a simular en un escenario de demanda típica obteniendo los siguientes resultados que se muestran en las figuras 17 y 18 y en la tabla 5 se evidencia una comparación del sistema antes y después de incluir los REDs.

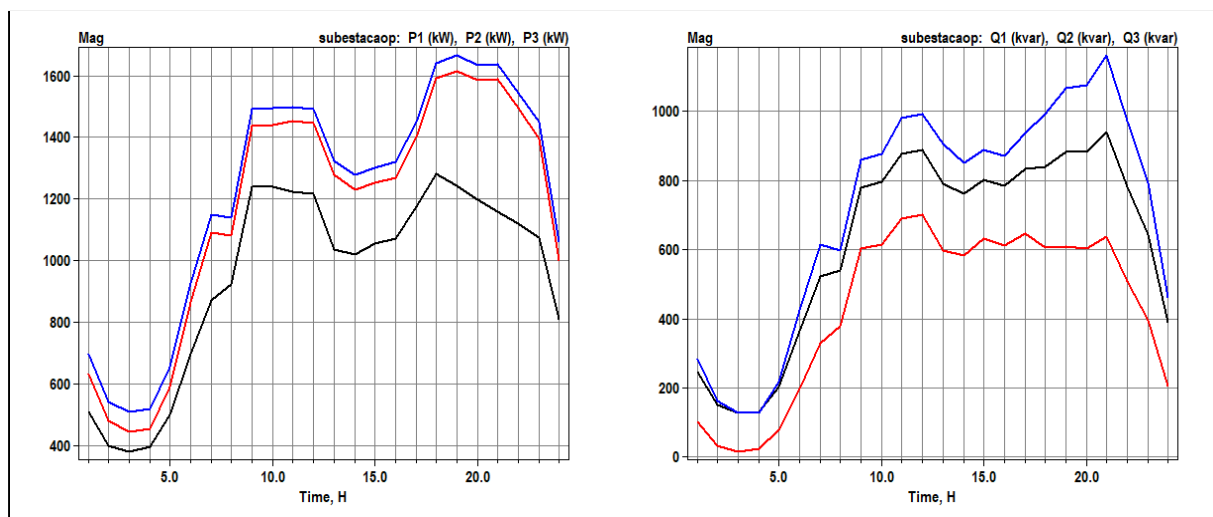


Figura 17. Curva de demanda activa y reactiva del sistema con REDs.

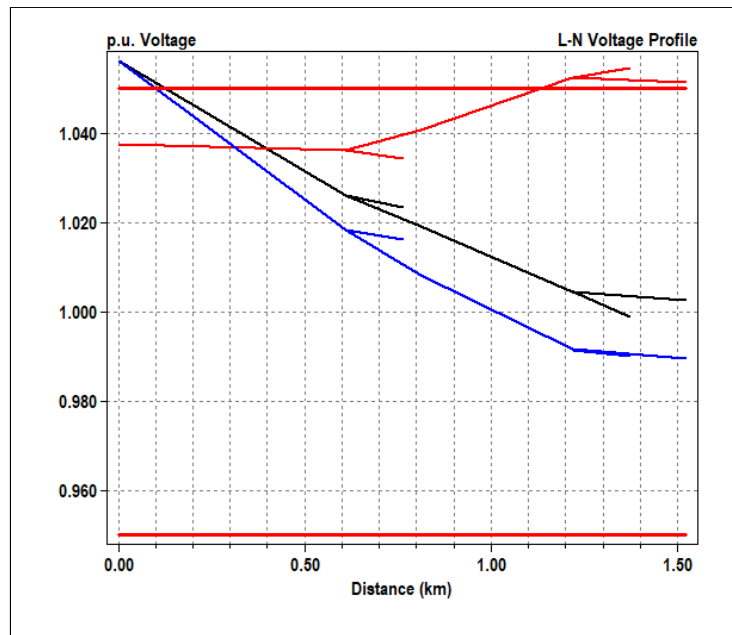


Figura 18. Perfiles de tensión del sistema con REDs.

Parámetro de análisis	Caso base	Caso ajustado con REDs	Diferencia (%)
Valor máximo de demanda [kW]	1800	1650	8,33
Segundo valor máximo de demanda [kW]	1750	1500	14,29
Valor mínimo de demanda [kW]	390	395	1,28
Pendiente diurna [kW/h]	150	118,75	20,83
Pendiente nocturna [kW/h]	225	173,33	22,96

Tabla 5. Comparación de resultados caso base y caso ajustado con REDs.

Se observa en la tabla 5 resultados favorables respecto al caso base. Primeramente, se presentó una reducción del 8,33% en el valor máximo de demanda, lo cual está asociado principalmente a uso del almacenamiento de energía en las hora donde se presentaba este valor pico en específico. Por otro lado, el segundo valor de demanda más alto se vio reducido en un 14,29 %, este porcentaje es algo mayor al primer caso debido a que en este caso se presentan aportes con el uso del almacenamiento y la generación solar, con un aporte mayoritario de este último, ya que este segundo pico se presenta en el periodo número 13 del día, donde el aporte energético de los paneles solares esta en sus valores máximos. Adicionalmente, tenemos que el cambio menos significativo se encuentra en los valores mínimo de demanda, ya que este varió aproximadamente un 1,28% en los 2 escenarios. Lo anterior está relacionado con el hecho de que al presentarse en horas de la madrugada la demanda de la red se encuentra reducida considerablemente por el comportamiento del usuario. Finalmente, los cambios más significativos los encontramos en la variación diurna y nocturna en la demanda con una mejora del 20,83% y el 22,96% respectivamente. Esto se encuentra asociado al uso principal del recurso solar en la primera pendiente y el almacenamiento en la segunda pendiente, complementando adecuadamente el comportamiento de la demanda. Esto confirma la hipótesis afirmativa, la cual plantea que

la estrategia planteada que inserta los REDs impactan positivamente la flexibilidad operativa del sistema de distribución.

6.5 Impactos del proyecto

Determinar una estrategia clara y lógica para analizar la flexibilidad en los sistemas de distribución permitiría que los operadores de red y los usuarios realicen una gestión eficiente de los recursos. Lo propuesto posibilitará contar con consignas operativas que faciliten la toma de decisiones de acuerdo con el comportamiento de un SEP puesto a prueba en escenarios críticos y exigentes en términos de flexibilidad operativa. Consecuentemente, al proponer esta estrategia proporciona una reducción de tiempos en la respuesta, puesto que se tendría un punto de partida mediante un algoritmo lógico que proporciona el cumplimiento de los objetivos planteados.

Es claro que una estrategia de esta índole, como se mencionó en la justificación, acarrea impactos asociados a la inserción económica de los usuarios, ligado a un desarrollo de las condiciones materiales y un mejoramiento de la calidad de vida de estos. Por otro lado, se pretende mejorar la eficiencia de los procesos asociados a la generación distribuida por medio de las FERNC, el respaldo de las baterías y la gestión de demanda, aminorando la dependencia de la generación por combustibles fósiles, especialmente en la región del caribe colombiano, afianzando la transición energética y disminuyendo las emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, no hay que desprestigiar el impacto negativo que tiene la producción de los elementos como lo son: celdas solares fotovoltaicas, baterías de litio, etc. Por lo que es menester el sopesamiento del beneficio socioeconómico y tecnológico de la región con respecto a los efectos nocivos medioambientales que causa la producción de los artefactos empleados en las FERNC.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Finalmente, luego de realizar el proceso de investigación detallada sobre el estudio de la flexibilidad operativa en el sistema de distribución y el impacto que tienen los REDs en él, se llevó a cabo el planteamiento de una estrategia que identifica como la inserción de recursos distribuidos puede impactar positivamente en un SD.

El concepto de flexibilidad ha adquirido bastante relevancia en los últimos años, ya que actualmente vivimos en una sociedad que se encuentra sometida a cambios constantes, lo cual en términos energéticos exige un sistema que sea capaz de responder adecuadamente a dichas variaciones. Lo anterior se ve ejemplificado con la inserción de recursos energéticos renovables, ya que esto está relacionado con un aspecto clave como lo es el comportamiento de la demanda en la red de un SD. Por esa razón, se planteó la estrategia de este proyecto, ya que la tendencia tecnológica y ambiental indica que la sociedad migrará dentro de los próximos años a fuentes energéticas renovables, lo que incluye el aspecto de generación distribuida.

La culminación de dicha estrategia implicó inicialmente el definir los recursos energéticos que participan en la flexibilidad operativa. Lo anterior, se logró definiendo un esquema de registro completo, clasificando los recursos disponibles actualmente y a futuro, según su funcionamiento. Lo anterior, permite un pleno conocimiento de cómo está compuesto el SD, lo que facilita el plantear un esquema de respuesta ante escenarios que comprometan la flexibilidad del sistema.

Otro aspecto importante fue el diseño de la estrategia para analizar el comportamiento del sistema en términos de flexibilidad. En este aspecto se consideró un conjunto de pasos bien definidos que permitieron el análisis del sistema en términos de los perfiles de tensiones y el comportamiento de la demanda durante el transcurso del día. Como se observó con el sistema de prueba la estrategia permitió detectar los escenarios que comprometen la flexibilidad operativa, lo cual llevó a plantear un plan de respuesta con REDs que como lo evidenció la tabla 5 presentó resultados positivos.

Con base a lo validado en la sección anterior se tienen las siguientes observaciones y recomendaciones para la aplicación de la estrategia:

- Primeramente, se propone realizar un estudio previo del sistema a analizar lo más detallado posible, ya que esto permite tener un conocimiento de qué recursos se pueden utilizar y las limitaciones.
- Por otro lado, se sugiere considerar escenarios extremos, pero realistas, dentro de los cuales se identifiquen las áreas con problemas en la flexibilidad operativa y priorizarlos en el plan de respuesta.
- Se deben contemplar los avances tecnológicos en los REDs y aspectos económicos en la adquisición de estos, los cuales no fueron considerados en este proyecto.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] I. Avramidis, V. Evangelopoulos, P. Georgilakis y N. Hatziaargyriou, *Demand side flexibility schemes for facilitating the high penetration of residential distributed energy resources*, IET Journals, 2018.
- [2] XM S.A E.S.P., *Análisis de flexibilidad del SIN: Escenarios de operación 2021-2022 y 2024-2025*, 2021.
- [3] Ministerio de Minas y Energía de Colombia, *Transición energética: un legado para el presente y el futuro de Colombia*, 2021.
- [4] T. Basso, S. Chakraborty, A. Hoke y M. Coddington, *IEEE 1547 Standards advancing grid modernization*, 2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), 2015.
- [5] Comisión de Regulación de Energía y Gas, *CREG 025 de 1995*, Ministerio de Minas y Energías de Colombia.
- [6] Comisión de Regulación de Energía y Gas, *CREG 131 de 2020*, Ministerio de Minas y Energías de Colombia.
- [7] Comisión de Regulación de Energía y Gas, *CREG 021 de 2021*, Ministerio de Minas y Energías de Colombia.
- [8] P. Radatz, *Modelos avanzados de análisis de redes eléctricas inteligentes utilizando o software OpenDSS*, Universidade de São Paulo–USP, 2015.
- [9] J. Gómez, J. Murcia y I. Cabeza, *LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA EN COLOMBIA: POTENCIALES, ANTECEDENTES Y PERSPECTIVAS*, Universidad Santo Tomás, 2017.
- [10] N. Voropai y C. Rehtanz, *Flexibility and Resiliency of Electric Power Systems: Analysis of Definitions and Content*, EPJ Web of Conferences, 2019.
- [11] A. Akrami, M. Doostizadeh y F. Aminifar, *Power system flexibility: an overview of emergence to evolution*, J. Mod. Power Syst. Clean Energy, 2019.
- [12] C. Edmunds *et al*, *Congestion management with aggregated delivery of flexibility using distributed energy resources*.
- [13] B. Currie *et al.*, *Flexibility Is Key in New York: New Tools and Operational Solutions for Managing Distributed Energy Resources*, IEEE Power and Energy Magazine, vol. 15, no. 3, pp. 20-29, May-June 2017.

9. ANEXOS

Anexo 1 - Análisis de riesgos.

Anexo 2 - Características del sistema de prueba.

Anexo 3 - Configuración y resultados.

Anexo 4 - Estrategia de gestión de recursos energéticos distribuidos.

Anexo 5 - Bibliografía utilizada.