



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

CARRERA DE ELECTRICIDAD

**“DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD MÁXIMA DE
OPERACIÓN DE UN ALIMENTADOR PRIMARIO DE
UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN MEDIANTE
SIMULACIONES EN OPENDSS BAJO DISTINTOS
ESCENARIOS DE CARGA”**

Trabajo de titulación previo a la obtención del

título de Ingeniero Eléctrico

**AUTORES: LUIS GABRIEL CORONEL CARCHI
DANNY SEBASTIAN NARANJO NARANJO**

TUTOR: ING. FLAVIO ALFREDO QUIZHPI PALOMEQUE.

Cuenca - Ecuador

2026

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Luis Gabriel Coronel Carchi con documento de identificación N° 0107551400 y Danny Sebastián Naranjo Naranjo con documento de identificación N° 0106604945 manifestamos que:


Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 04 de febrero del 2026

Atentamente,



Luis Gabriel Coronel Carchi
0107551400



Danny Sebastián Naranjo Naranjo
0106604945

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL
TRABAJO DE TITULACIÓN A
LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Luis Gabriel Coronel Carchi con documento de identificación 0107551400 y Danny Sebastián Naranjo Naranjo con documento de identificación N° 0106604945, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto técnico: “Determinación de la capacidad máxima de operación de un alimentador primario de un sistema de distribución mediante simulaciones en OpenDss bajo distintos escenarios de carga”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 04 de febrero del 2026

Atentamente,



Luis Gabriel Coronel Carchi
0107551400



Danny Sebastián Naranjo Naranjo
0106604945

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Flavio Alfredo Quizhpi Palomeque N° 0102257485, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD MÁXIMA DE OPERACIÓN DE UN ALIMENTADOR PRIMARIO DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN MEDIANTE SIMULACIONES EN OPENDSS BAJO DISTINTOS ESCENARIOS DE CARGA, realizado por Luis Gabriel Coronel Carchi con documento de identificación N° 0107551400 y por Danny Sebastián Naranjo Naranjo con documento de identificación N° 0106604945, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 04 de febrero del 2026

Atentamente,

Ing. Flavio Alfredo Quizhpi Palomque
0102257485

AGRADECIMIENTOS

Agradezco de manera especial primeramente a Dios por permitirme alcanzar este logro tan importante en mi vida profesional. Quiero agradecer a mis padres por su apoyo incondicional, su confianza depositada en todo momento sobre mi, durante este camino universitario, siendo ellos mi motor principal que me impulso a seguir este sueño y a alcanzar este objetivo y cumplir este logro académico. También quiero agradecer a la Universidad Politécnica Salesiana y a la Carrera de Electricidad por la formación académica brindada, lo cual ha sido muy importante para el desarrollo de los conocimientos técnicos y profesionales en el presente trabajo de titulación. Mi más sincero agradecimiento a los docentes de la carrera, quienes a lo largo de este camino profesional han compartido sus conocimientos y experiencias aportando así de manera significativa a mi desarrollo académico y personal. De manera particular, quiero expresar mi gratitud al Ing. Flavio Quizhpi y al Ing. Marco Toledo tutores y guías en este trabajo de titulación, siendo de gran aporte con sus consejos, aportes y observaciones oportunas, las cuales han sido claves para orientar correctamente la culminación de este proyecto.

Danny Sebastian Naranjo Naranjo

Agradezco a Dios por proporcionarme la fortaleza, la salud y la constancia requeridas para completar esta etapa significativa de mi formación profesional. A mis padres, por su apoyo incondicional y, en particular, por el esfuerzo económico que han realizado a lo largo de mi carrera universitaria, el cual ha sido esencial para alcanzar este logro académico. Al Ing. Flavio Quizhpi y Al Ing. Marco Toledo, tutores de este trabajo de titulación, se les agradece por su orientación, acompañamiento y observaciones pertinentes, las cuales facilitaron el adecuado desarrollo y finalización del presente proyecto. Agradezco al Ing. Pablo Méndez, Ing Pablo Róbles y al Ing, Marco Carpio por su dedicación a la enseñanza y por evidenciar que el proceso de aprendizaje puede ser gratificante en el entorno académico, lo cual ha dejado una huella significativa en mi formación. Agradezco a mis compañeros y amigos de la universidad por el apoyo brindado, las experiencias compartidas y los momentos vividos durante esta etapa, los cuales contribuyeron a que el trayecto universitario fuese una experiencia enriquecedora tanto en el ámbito profesional como en el personal.

Luis Gabriel Coronel Carchi

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo de titulación con todo el amor y cariño a mis padres Luisa y Marco, nada de lo que soy y lo que eh logrado habría sido posible sin su apoyo incondicional, gracias por enseñarme con hechos el verdadero significado de no rendirse y seguir adelante a pesar de las circunstancias. Gracias por cada sacrificio silencioso, por cada preocupación guardada en lo mas profundo del pecho cuando las cosas no iban bien, gracias porque si hoy alcanzo este objetivo profesionalmente es simplemente porque ustedes nunca dejaron de creer en mí, incluso cuando yo mismo dude. A mis hermanos Byron y Valentina mis compañeros de vida, gracias por ser parte porque gracias a ustedes trato cada día de superarme para ser un ejemplo para ustedes. A mis abuelitos Carlos y Elena gracias por su amor y cariño incondicional, gracias por sus consejos ya que de ustedes aprendí lo que significa la humildad, el esfuerzo y la perseverancia. Y al amor de mi vida Samantha León gracias por estar conmigo en este camino lleno de dificultades, gracias por escucharme y darme fuerzas cuando quería darme por vencido, gracias por cada palabra de ánimo y por estar a mi lado cuando el estrés y el cansancio eran mas grandes.

Gracias a todas y cada una de las personas que de una u otra forma pusieron un granito de arena para hoy lograr este objetivo.

Danny Sebastian Naranjo Naranjo

A mi madre por haberme inculcado valores, responsabilidad y constancia, así como por enseñarme la importancia de esforzarme siempre para alcanzar mis objetivos. A mi padre, por ser el pilar fundamental en este trayecto, por su apoyo constante y por el ejemplo de dedicación y perseverancia que ha orientado mi desarrollo. Agradezco a mi hermano por su compañía y los momentos compartidos, los cuales han constituido un apoyo significativo durante esta etapa. Finalmente, dedico este logro a mi familia, como un símbolo de compromiso y de la proceso en la construcción de un futuro fundamentado en el esfuerzo, la constancia y la superación personal.

Luis Gabriel Coronel Carchi

RESUMEN

El propósito de este proyecto de titulación es examinar el funcionamiento operativo de un alimentador primario de media tensión a través de la simulación de diferentes situaciones operativas, con el objetivo de valorar su reacción ante cambios en la demanda, la presencia de grandes consumidores, la incorporación y desconexión de generación distribuida, y la implementación de tácticas para gestionar la demanda y las cargas interrumpibles. El estudio se fundamenta en la creación de un modelo detallado del sistema eléctrico de distribución, que se ha implementado con el software OpenDSS, que posibilita simulaciones cuasi-dinámicas con una resolución temporal de 15 minutos. Se establecieron siete escenarios representativos desde un escenario base en condiciones normales de funcionamiento. Estos escenarios facilitaron el análisis del desarrollo de variables eléctricas esenciales como los perfiles de tensión en valores por unidad, los flujos de potencia activa y reactiva, las corrientes en líneas y transformadores, la capacidad de carga de los componentes del sistema, las pérdidas técnicas y el factor de potencia. Los resultados obtenidos fueron comparados con los límites establecidos por la técnica normativa vigente, con el fin de confirmar que se cumplen las pautas de operación segura y confiable del alimentador. Los hallazgos del análisis demuestran que el perfil de tensión mejora, las pérdidas técnicas disminuyen y la carga en los componentes más requeridos del sistema se alivia cuando se implementan estrategias de gestión de la demanda y se incorpora generación distribuida. Además, se evidencia que el alimentador es capaz de sostener condiciones operativas adecuadas cuando se desconectan ciertas fuentes de generación, siempre y cuando haya un margen operativo apropiado y una planificación adecuada de la demanda.

ABSTRACT

This thesis aims to evaluate the operational performance of a medium-voltage primary distribution feeder through the analysis of different operating scenarios, considering demand variations, the presence of large consumers, the integration and disconnection of distributed generation, as well as the implementation of demand management strategies and interruptible loads. The study is based on a detailed electrical distribution system model developed and implemented in OpenDSS, which enables quasi-dynamic simulations with a 15-minute time resolution over a typical operating day. Starting from a base case under normal operating conditions, seven representative scenarios were defined to analyze the behavior of key electrical variables such as per-unit voltage profiles, active and reactive power flows, line and transformer currents, element loading levels, technical losses, and power factor. The obtained results were evaluated against the limits established by current technical standards in order to determine the maximum safe operating capacity of the feeder and to identify critical nodes and system components. The results show that the integration of distributed generation and the application of demand management strategies significantly improve voltage profiles, reduce technical losses, and mitigate the loading of the most stressed elements of the system. Additionally, the study demonstrates that the feeder can maintain acceptable operating conditions following the disconnection of certain generation sources, provided that sufficient operational margins and proper demand planning are ensured.

PALABRAS CLAVES TEMÁTICAS

Alimentador primario de distribución.

Simulación de sistemas eléctricos.

OpenDSS.

Perfiles de carga y generación.

Generación distribuida.

Grandes consumidores.

Gestión de la demanda.

Cargas interrumpibles.

Capacidad máxima de operación.

Cargabilidad de líneas y transformadores.

Flujos de potencia.

Perfil de voltaje.

Pérdidas técnicas.

Factor de potencia.

Escenarios operativos.

Límites operativos del sistema.

Calidad del servicio eléctrico.

Planificación de redes de distribución.

Regulación y normativas eléctricas.

ÍNDICE

1	Fundamentos Metodológicos: Objetivos, Alcance y Metodología de Investigación	1
1.1	Objetivo General	1
1.2	Objetivos Específicos	1
1.3	Alcance	1
1.4	Metodología	2
2	Marco Teórico	3
2.1	Descripción general del alimentador	3
2.1.1	Características eléctricas principales	4
2.1.2	Tipología de cargas conectadas	4
2.2	Características del sistema	5
2.2.1	Estructura del modelo en formato de datos	5
2.3	Parámetros de simulación en OpenDSS	6
2.4	Definición de los parámetros operativos del estudio	6
2.5	Criterios para la construcción de escenarios y presentación	8
2.5.1	Escenario 1: Condiciones normales del sistema	9
2.5.2	Escenario 2: Inclusión de grandes consumidores	9
2.5.3	Escenario 3: Operación sin generación hidroeléctrica	9
2.5.4	Escenario 4: Operación sin generación térmica	10
2.5.5	Escenario 5: Operación solo con generación solar fotovoltaica	10
2.5.6	Escenario 6: Gestión de demanda aplicada al alimentador	10
2.5.7	Escenario 7: Operación con cargas interrumpibles	11
3	Resultados	12
3.1	Escenario 1 [Condiciones normales de operación del sistema]	12
3.1.1	Resultados del escenario	12
3.2	Escenario 2 [Sistema en condiciones normales, incluido generación y grandes consumidores]	15
3.2.1	Configuración del modelo en OpenDSS	15
3.2.2	Resultados del escenario	17
3.3	Escenario 3 [Operación sin generación hidroeléctrica]	20
3.3.1	Configuración del modelo en OpenDSS	20
3.3.2	Resultados del escenario 3	22
3.4	Escenario 4 [Operación sin generación térmica]	25
3.4.1	Resultados del escenario	25
3.5	Escenario 5 [Operación con generación solar fotovoltaica]	29
3.5.1	Configuración del modelo en OpenDSS	29
3.5.2	Resultados del escenario	30
3.6	Escenario 6 [Gestión de demanda aplicada al alimentador]	33

3.6.1	Resultados del escenario	34
3.7	Escenario 7 [Operación con cargas interrumpi- bles]	37
3.7.1	Configuración del modelo en OpenDSS	37
3.7.2	Resultados del escenario	38
3.8	Resumen comparativo de resultados	40
4	Análisis de resultados	42
4.1	Análisis e interpretación de los resultados del escenario 1 . . .	42
4.1.1	Resumen cuantitativo	42
4.1.2	Cumplimiento de límites operativos	42
4.1.3	Interpretación técnica de resultados	42
4.1.4	Implicación para la capacidad máxima de operación	43
4.2	Análisis e interpretación de los resultados del escenario 2 . . .	43
4.2.1	Resumen cuantitativo	43
4.2.2	Cumplimiento de límites operativos	43
4.2.3	Interpretación técnica de resultados	44
4.2.4	Implicación para la capacidad máxima de operación	44
4.3	Análisis e interpretación de los resultados del escenario 3 . . .	45
4.3.1	Resumen cuantitativo	45
4.3.2	Cumplimiento de límites operativos	45
4.3.3	Interpretación técnica de resultados	45
4.3.4	Implicación para la capacidad máxima de operación	46
4.4	Análisis e interpretación de los resultados del escenario 4 . . .	46
4.4.1	Resumen cuantitativo	46
4.4.2	Cumplimiento de límites operativos	46
4.4.3	Interpretación técnica de resultados	46
4.4.4	Implicación para la capacidad máxima de operación	47
4.5	Análisis e interpretación de los resultados del escenario 5 . . .	47
4.5.1	Resumen cuantitativo	47
4.5.2	Cumplimiento de límites operativos	48
4.5.3	Interpretación técnica de resultados	48
4.5.4	Implicación para la capacidad máxima de operación	48
4.6	Análisis e interpretación de los resultados del escenario 6 . . .	49
4.6.1	Resumen cuantitativo	49
4.6.2	Cumplimiento de límites operativos	49
4.6.3	Interpretación técnica de resultados	49
4.6.4	Implicación para la capacidad máxima de operación	50
4.7	Análisis e interpretación de los resultados del escenario 7 . . .	50
4.7.1	Resumen cuantitativo	50
4.7.2	Cumplimiento de límites operativos	50
4.7.3	Interpretación técnica de resultados	51
4.7.4	Implicación para la capacidad máxima de operación	51
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	52
5.1	Conclusiones	52
5.2	Recomendaciones	53

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1	Esquema de la Red a Simular	3
3.1	Potencia del sistema	13
3.2	Perfil de voltaje	14
3.3	Perfil de carga de un gran consumidor	15
3.4	Perfil SFV	16
3.5	Potencia del sistema	17
3.6	Perfil de voltaje	18
3.7	Perfiles de carga de un gran consumidor	20
3.8	Perfil de carga de baterías	21
3.9	Potencia del sistema	22
3.10	Perfil de voltaje	23
3.11	Perfil de carga de un gran consumidor	25
3.12	Potencia del sistema	26
3.13	Perfil de voltaje	27
3.14	Perfil de carga SFV	29
3.15	Potencia del sistema	30
3.16	Perfil de voltaje	31
3.17	Perfil de carga de un gran consumidor	33
3.18	Perfil de carga de la hidroeléctrica	34
3.19	Potencia del sistema	34
3.20	Perfil de voltaje	35
3.21	Perfil de carga de un gran consumidor	37
3.22	Potencia del sistema	38
3.23	Perfil de voltaje	39

Índice de tablas

2.1	Características eléctricas principales del alimentador analizado.	4
2.2	Clasificación general de cargas conectadas al alimentador.	4
2.3	Estructura típica de un modelo de alimentador en OpenDSS.	5
2.4	Límites operativos de voltaje en p.u.	7
2.5	Límites operativos de corriente en p.u.	7
2.6	Límites operativos de frecuencia en p.u.	7
2.7	Límites operativos del factor de potencia en p.u.	7
2.8	Criterios técnicos y variables empleadas para la evaluación de la capacidad máxima de operación del alimentador.	8
3.1	Pérdidas	14
3.2	Valores numéricos de ejemplo correspondientes a la secuencia del archivo .csv	16
3.3	Generator Energy Meter Values	19
3.4	Pérdidas	19
3.5	Generator Energy Meter Values	24
3.6	Pérdidas	24
3.7	Generator Energy Meter Values	28
3.8	Pérdidas	28
3.9	Generator Energy Meter Values	32
3.10	Pérdidas	32
3.11	Generator Energy Meter Values	36
3.12	Pérdidas	36
3.13	Generator Energy Meter Values	40
3.14	Pérdidas	40
3.15	Resumen comparativo de resultados operativos del alimentador bajo los escenarios analizados	41
4.1	Escenario 1 – Condiciones normales de operación	42
4.2	Evaluación de variables operativas del sistema bajo condiciones de análisis	43
4.3	Escenario 3 – Condiciones normales con grandes consumidores y generación distribuida (sin hidroeléctrica)	45
4.4	Escenario 4 – Condiciones normales con grandes consumidores y generación distribuida (sin térmica)	46
4.5	Escenario 5 – Condiciones normales con grandes consumidores y solo generación SFV	47
4.6	Resumen de resultados del Escenario 6 – Condiciones normales con gestión de la demanda	49

4.7	Resumen de resultados del Escenario 7 – Condiciones normales con potencias interrumpibles	50
1	Áreas del Trabajo de Grado	59

CAPÍTULO 1

Fundamentos Metodológicos: Objetivos, Alcance y Metodología de Investigación

1.1. Objetivo General

Analizar la capacidad máxima de operación de un alimentador, mediante simulaciones en OpenDSS bajo distintos escenarios de carga y generación, con el fin de establecer sus límites técnicos de funcionamiento seguro.

1.2. Objetivos Específicos

- Representar y parametrizar el modelo eléctrico del alimentado en la herramienta de simulación OpenDSS, incorporando sus características reales de operación.
- Simular diferentes escenarios de operación considerando variaciones de demanda, desconexión de fuentes de generación y aplicación de estrategias de gestión de demanda.
- Evaluar los límites de operación del alimentador en términos de tensión, corriente y pérdidas técnicas para determinar su capacidad máxima admisible y proponer mejoras orientadas a la estabilidad del sistema.

1.3. Alcance

Este trabajo examina la máxima capacidad operativa de un alimentador primario en un sistema de distribución eléctrica, a través de la simulación y modelado en OpenDSS, tomando en cuenta diferentes situaciones de generación y carga. La representación eléctrica del alimentador se basa en datos técnicos reales, como líneas, transformadores, cargas y componentes de control. Estos fueron determinados utilizando criterios operativos comunes a los sistemas de distribución. Se llevan a cabo simulaciones para analizar situaciones que contemplan fluctuaciones de la demanda, la desconexión de fuentes generadoras y el uso de tácticas para gestionar la demanda,

con el objetivo de examinar cómo reacciona el sistema frente a diferentes condiciones operativas. Se revisan los límites operativos establecidos al evaluar variables eléctricas como las corrientes, las pérdidas técnicas, los perfiles de tensión y los flujos de potencia en cada escenario. La investigación se limita a la evaluación técnica a través de simulaciones computacionales, sin considerar estudios económicos, financieros ni la implementación física de las soluciones propuestas. Los resultados alcanzados posibilitan el reconocimiento de la máxima capacidad permitida del alimentador y son una base técnica para valorar y optimizar el funcionamiento de sistemas de distribución eléctrica.

1.4. Metodología

La metodología utilizada en este trabajo está dividida en tres fases. La primera implica la recolección, organización y modelado del alimentador de la red de distribución eléctrica. Esto incluye sus parámetros técnicos y rasgos operativos en el software de simulación OpenDSS, con el objetivo de representar apropiadamente su funcionamiento bajo condiciones normales. La segunda fase consiste en establecer y simular diferentes escenarios de operación, teniendo en cuenta la variación de la demanda, la existencia o no de generación y la implementación de estrategias para gestionar cargas interrumpibles y la demanda. Esto posibilita evaluar el funcionamiento del alimentador en condiciones operativas variadas. La tercera fase incluye el análisis e interpretación de los resultados logrados a través de simulaciones, analizando las limitaciones técnicas del alimentador en cuanto a corriente, tensión y pérdidas técnicas. El objetivo es calcular su límite máximo admisible y su aplicabilidad para futuras investigaciones sobre la planificación y operación del sistema de distribución.

CAPÍTULO 2

Marco Teórico

2.1. Descripción general del alimentador

El alimentador analizado 2.1 es parte de un sistema urbano de distribución en media tensión. Su traza cruza zonas de viviendas, comercio e industria, creando una estructura de redes urbanas de 13.8 kV comunes en la distribución latinoamericana [1, 2].

La barra de 13.8 kV de la subestación primaria proporciona energía a este alimentador. Desde ahí, se extienden ramales primarios y secundarios que forman su topología radial. El modelo del alimentador, obtenido de la información del operador de red, permite determinar datos importantes y significativos para el modelado en OpenDSS.

Este alimentador en el sistema de distribución es de gran importancia por su alta densidad de carga, consumidores industriales y la posibilidad de integrar generación distribuida en el futuro. Estos aspectos fundamentan la necesidad de establecer su capacidad operativa máxima en diversas situaciones de carga mediante simulaciones.

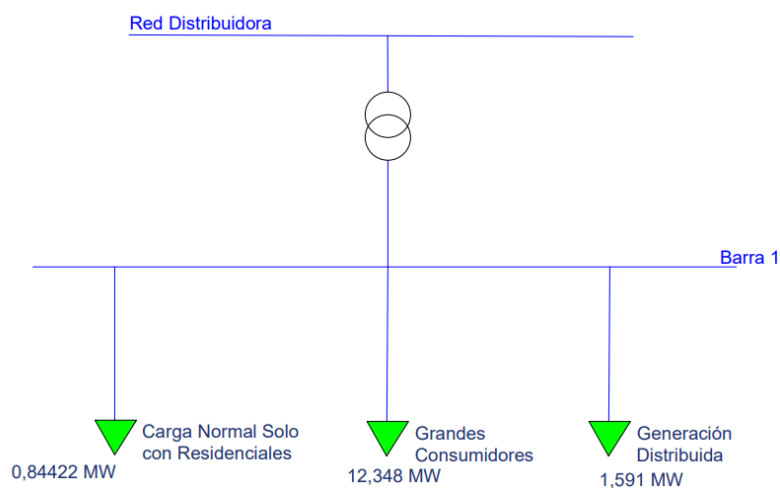


Figura 2.1: Esquema de la Red a Simular

2.1.1. Características eléctricas principales

El alimentador analizado es un circuito urbano de media tensión que opera a 13.8 kV, con una configuración radial común en los sistemas de distribución primarios en ciudades latinoamericanas [1, 3]. La red conformada se deriva en ramales secundarios que sirven a áreas residenciales, comerciales e industriales de mediana y alta densidad, los parámetros del alimentador se observan en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Características eléctricas principales del alimentador analizado.

Parámetro	Valor típico	Observación
Nivel de voltaje primario	13.8 kV	Sistema MT urbano
Nivel de voltaje secundario	0.22–0.38 kV	Transformadores BT
Longitud total estimada	20–25 km	Incluye ramales
Número de nodos	90–110	Modelo
Calibre de conductores	ACSR 1/0–2/0	Tramos principales
Bancos de capacitores	100–300 kVAr	Soporte de tensión
Transformadores	25–500 kVA	Carga mixta

2.1.2. Tipología de cargas conectadas

El alimentador estudiado sirve una mezcla típica de cargas residenciales, comerciales e industriales que se encuentran en áreas urbanas en crecimiento. Esta diversidad de la demanda impacta en el tipo de perfil de carga, en su variabilidad horaria y en el desempeño eléctrico del sistema en condiciones de máxima demanda [4, 3].

En la Tabla 2.2 se muestra una tipología general de las cargas que atiende el alimentador y su porcentaje de aporte estimado, el cual será la base para la simulación de escenarios de carga en OpenDSS en capítulos posteriores.

Tabla 2.2: Clasificación general de cargas conectadas al alimentador.

Tipo de carga	Participación estimada	Características principales
Residencial	50–60 %	Alta variabilidad; picos nocturnos
Comercial	20–25 %	Actividad diurna; cargas medianas
Industrial	20–25 %	Potencias elevadas; consumo estable

2.2. Características del sistema

2.2.1. Estructura del modelo en formato de datos

Para modelar el alimentador en OpenDSS se necesita estructurar la información técnica en formatos compatibles que definan la topología del sistema, las características eléctricas de los elementos y los perfiles de carga. Para ello se utilizan principalmente archivos `.dss` y `.csv`. Cada uno de estos formatos tiene una finalidad específica en la elaboración del modelo [5, 6], en la Tabla 2.3 se indica la estructura típica del alimentador en el simulador.

Tabla 2.3: Estructura típica de un modelo de alimentador en OpenDSS.

Archivo	Contenido principal
<code>Master.dss</code>	Archivo principal que incluye el resto del modelo, define configuraciones generales y comandos de ejecución.
<code>Circuits.dss</code>	Definición del alimentador, tensiones base, fases y parámetros globales.
<code>Lines.dss</code>	Declaración de las líneas, nodos asociados, longitudes y <i>linecodes</i> .
<code>Linecodes.dss</code>	Parámetros eléctricos por tipo de conductor (R, X, C, corriente térmica).
<code>Transformers.dss</code>	Parámetros eléctricos y configuraciones de conexión de todos los transformadores del alimentador.
<code>Loads.dss</code>	Definición de cargas, modelos ZIP, valores de potencia activa y reactiva, y ubicación nodal.
<code>Capacitors.dss</code>	Bancos de compensación reactiva y modos de control.
<code>Regulators.dss</code>	Controladores de voltaje y configuraciones de <i>tap</i> .
<code>Profiles.dss</code>	Perfiles horarios o subhorarios de demanda.
<code>Scripts/</code>	Scripts adicionales para automatización del análisis (iteraciones, exportaciones, generación de gráficos).

2.3. Parámetros de simulación en OpenDSS

OpenDSS es un software de código abierto para análisis eléctricos, como calidad de energía, impacto de generación distribuida, respuesta a la demanda, pérdidas técnicas y flujos de potencia desbalanceados [7].

■ Parámetros que puede manejar OpenDSS:

- Voltajes, corrientes, potencias activa/reactiva.
- Perfiles de carga y generación (entrada de series temporales).
- Pérdidas totales del sistema.

■ Características que se pueden ingresar en OpenDSS:

- Propiedades de líneas (Linecode, Length, Units).
- Equipos (Transformer, Reactor, Capacitor).
- Cargas y generadores (Loadshape, Generator, Storage).

2.4. Definición de los parámetros operativos del estudio

Para establecer la capacidad máxima de operación de un alimentador primario en un sistema de distribución, se deben definir ciertos parámetros operativos que definan su comportamiento eléctrico ante diversas condiciones de carga y generación. Estos parámetros hacen que las simulaciones en OpenDSS reflejen fielmente la realidad y que los resultados sean técnicamente válidos y acordes a los criterios de operación reales en redes de distribución.

En este estudio, la evaluación de la capacidad del alimentador se realiza analizando en forma combinada los diferentes límites de operación que garantizan una operación segura, confiable y eficiente del sistema. Entre los criterios más importantes se incluyen los límites de voltaje los mismos que en base a la normativa [8] se muestran en la Tabla 2.4, los límites de corrientes se muestran en la Tabla 2.5, márgenes permisibles de frecuencia en la Tabla 2.6 y factor de potencia global en la Tabla 2.7. Estos criterios son utilizados en estudios de sistemas eléctricos de potencia y están respaldados por normativas y guías técnicas actuales.[9].

Tabla 2.4: Límites operativos de voltaje en p.u.

Condición	Mínimo (p.u.)	Máximo (p.u.)
Operación normal	0.95	1.05
Rango extendido (advertencia)	0.90	1.10
Valor nominal	1.00	1.00

Tabla 2.5: Límites operativos de corriente en p.u.

Condición	Mínimo (p.u.)	Máximo (p.u.)
Operación normal (ampacidad)	0.00	1.00
Sobrecarga temporal (referencia)	1.00	1.20
Valor nominal	1.00	1.00

Tabla 2.6: Límites operativos de frecuencia en p.u.

Condición	Mínimo (p.u.)	Máximo (p.u.)
Operación normal (59.5–60.5 Hz)	0.992	1.008
Rango de contingencia (59–61 Hz)	0.983	1.017
Valor nominal	1.000	1.000

Tabla 2.7: Límites operativos del factor de potencia en p.u.

Condición	Mínimo (p.u.)	Máximo (p.u.)
FP mínimo recomendado	0.94	1.00
FP para cargas grandes	0.94	1.00
Umbral crítico (acciones correctivas)	0.00	0.60

2.5. Criterios para la construcción de escenarios y presentación

En la Tabla 2.8 se resumen los principales criterios técnicos y variables utilizadas para estimar la capacidad máxima de operación del alimentador en distintas condiciones de carga y generación.

Tabla 2.8: Criterios técnicos y variables empleadas para la evaluación de la capacidad máxima de operación del alimentador.

Criterio técnico	Variables de evaluación y propósito
Variación del nivel de demanda	Voltaje mínimo y máximo (V_{min} , V_{max} en p.u.), corrientes máximas en líneas y transformadores, pérdidas activas totales (%). Posibilita reconocer cómo cambian los límites de operación del sistema ante un aumento o disminución de carga [5, 1].
Integración de generación distribuida	Voltajes extremos, flujos de potencia bidireccionales, potencia activa neta importada o inyectada, pérdidas técnicas. Mide el impacto de la generación distribuida en la estabilidad operativa del alimentador. [3].
Presencia de grandes consumidores	Caídas de voltaje locales, incremento de corrientes en tramos críticos, cargabilidad de transformadores y líneas. Permite el estudio de la incidencia de cargas puntuales en nodos críticos del sistema. [4].
Gestión de la demanda	Reducción de picos de potencia (kW), mejora en perfiles de voltaje, disminución de sobrecargas y pérdidas técnicas. Mide la efectividad de estrategias operativas para ampliar el margen de operación del alimentador. [1].
Condiciones operativas críticas o especiales	Violaciones de voltaje y cargabilidad térmica, comportamiento del sistema en momentos límite. Identifica restricciones técnicas que limitan la capacidad máxima de operación. [10].

2.5.1. Escenario 1: Condiciones normales del sistema

El Escenario 1 es el caso base del alimentador y se compara con los siguientes. En este caso se replica exactamente el sistema de distribución sin cambios en la topología ni generación distribuida o gestión de la demanda; la red permanece en su forma radial original con los parámetros eléctricos, longitudes de línea, capacidades de transformación y configuración de nodos descritos anteriormente. Solo se consideran las cargas conectadas en condiciones reales del sistema, tal como se especifica en el anteproyecto [11]. Los perfiles de demanda son datos medidos cada 15 minutos. Se eligen tres estados del alimentador: mínima (3.2 MW), media (3.8 MW) y máxima (10 MW) demanda, para analizar el comportamiento del sistema en diferentes condiciones de operación. El propósito es definir un punto de referencia para evaluar perfiles de tensión, flujos de potencia, corrientes y pérdidas técnicas, e identificar nodos y tramos que restringen la capacidad del alimentador en condiciones normales.

2.5.2. Escenario 2: Inclusión de grandes consumidores

El Escenario 2 analiza el alimentador ante grandes consumidores, conservando las condiciones del escenario base. Esta condición emula cargas puntuales en el comportamiento eléctrico del sistema sin modificar la estructura del alimentador. Son modelados como grandes consumidores en nudos del alimentador, que representan cargas concentradas con perfiles de demanda fijos y consistentes con los niveles de operación del capítulo anterior. Estas cargas se incorporan conservando la estructura radial original. El objetivo de este caso es estudiar cómo la demanda concentrada influye en los perfiles de tensión, flujos de potencia, corrientes, pérdidas técnicas y cagabilidad de los elementos del sistema con respecto al Escenario 1.

2.5.3. Escenario 3: Operación sin generación hidroeléctrica

Esta situación se presenta en condiciones de estiaje o racionamiento en la oferta hidroeléctrica y no implica modificaciones en la topología ni en los parámetros eléctricos del alimentador [11]. En OpenDSS, el alimentador se representa como un sistema consumidor, alimentado por una fuente equivalente en la barra principal, sin generación hidroeléctrica. Toda la carga se debe abastecer importando energía en el punto de conexión en condiciones base de operación [2, 12]. El objetivo de este escenario es determinar el efecto de la reducción de la hidroeléctrica sobre las variables operativas del alimentador (tensión, flujos de potencia, corrientes y pérdidas técnicas) y la resiliencia del sistema ante cambios en la matriz de generación [13].

2.5.4. Escenario 4: Operación sin generación térmica

EL escenario 4: Mide el comportamiento del alimentador sin generación térmica en el sistema eléctrico. No se modifican ni la topología ni los parámetros eléctricos del alimentador ya diseñado [11]. El alimentador se modela conectado en la barra principal a una fuente equivalente sin considerar el apoyo de generación térmica en horas pico. Esta habilidad prueba la reacción del sistema ante una pérdida de capacidad de soporte del sistema de generación aguas arriba en condiciones normales de operación [2, 12]. El objetivo de este caso es establecer un contexto para estudiar la respuesta del alimentador ante situaciones exigentes en términos de tensión, flujos de potencia, corrientes y pérdidas técnicas, y para definir la reducción de los márgenes de seguridad operativa del sistema [13].

2.5.5. Escenario 5: Operación solo con generación solar fotovoltaica

En el Escenario 5 se analiza el alimentador fotovoltaico. Esta es una situación hipotética, ya que el sistema base no cuenta con esta generación y se modeliza una previsión del comportamiento del alimentador ante un suministro 100En OpenDSS, el alimentador se modela sin generación tradicional, solamente con sistemas de generación solar fotovoltaica modelados con el elemento `PVSystem`. A cada sistema se le asignan perfiles de generación horarios con resolución de 15 minutos que representan la variación diurna de la irradiancia solar (cero por la noche y máxima al mediodía) [12]. Los sistemas fotovoltaicos se colocan en puntos del alimentador para estudiar el comportamiento del sistema con alta penetración solar. Esta capacidad permite analizar el impacto de la operación fotovoltaica en los perfiles de tensión, flujos de potencia activa y reactiva, corrientes en conductores y pérdidas técnicas del sistema. El objetivo de este caso es evaluar la viabilidad técnica del alimentador en un esquema de red neta con generación solar fotovoltaica y determinar restricciones operativas asociadas a la variabilidad de la fuente, regulación de tensión y capacidad de carga de los equipos [2, 13].

2.5.6. Escenario 6: Gestión de demanda aplicada al alimentador

El Escenario 6 estudia el impacto de estrategias de gestión de la demanda en el alimentador. Este es un caso simulado para analizar cómo la manipulación de los perfiles de consumo puede mejorar el comportamiento del sistema de distribución sin realizar cambios físicos en la red [11]. La gestión de la demanda modifica los perfiles horarios de carga, reduciendo o desplazando el consumo en las horas pico. En el modelado de OpenDSS, estas estrategias se representan con perfiles temporales escalados utilizando `LoadShape`, manteniendo la energía total y cambiando su patrón de consumo diario cada 15 minutos [12]. En este ambiente se puede estudiar

cómo influye la gestión de la demanda sobre variables operativas del alimentador, tales como voltaje, corrientes, pérdidas técnicas y potencia importada en el punto de suministro. Posibilita la evaluación de la mejora de los márgenes operativos, especialmente en horas pico [2].

2.5.7. Escenario 7: Operación con cargas interrumpibles

El Escenario 7 analiza el alimentador con cargas interrumpibles (consumos que pueden ser reducidos o desconectados en horas pico). Este caso se aborda de manera analítica y asume que se pueden aplicar esquemas de flexibilidad de carga para mejorar el desempeño del alimentador sin modificar su infraestructura [11]. En OpenDSS, las cargas interrumpibles se modelan modificando los perfiles de demanda de nodos del alimentador, mediante objetos `Load` y `LoadShape`. Estas simulaciones representan cortes parciales o desconexiones programadas, siempre con la misma resolución temporal de 15 minutos que todas las simulaciones [12]. Este caso ilustra cómo la interrupción programada de carga influye en variables operativas clave, tales como tensión, corrientes en conductores, pérdidas técnicas y potencia importada desde la subestación principal. Mide la capacidad de esta estrategia para atenuar sobrecargas y restricciones operativas en condiciones de alta demanda [2, 13].

CAPÍTULO 3

Resultados

3.1. Escenario 1 [Condiciones normales de operación del sistema]

- Parámetros ajustados. El Escenario 1 corresponde a la condición base de operación del sistema de distribución, en la cual se consideran todos los elementos operando bajo parámetros nominales. Los niveles de tensión, límites térmicos de conductores y transformadores, así como los criterios de cargabilidad, se mantienen dentro de los rangos operativos establecidos, sin aplicar modificaciones adicionales al modelo.

3.1.1. Resultados del escenario

- **Potencia del sistema:**

La gráfica ilustra cómo la potencia aparente del sistema ha cambiado a lo largo de un día normal de operación. Se puede notar una disminución en la demanda durante las horas menos activas y un aumento gradual durante los periodos de mayor consumo. La conducta es coherente con los perfiles de carga establecidos para el escenario base y no muestra picos repentinos ni situaciones anómalas de funcionamiento [3.1](#).

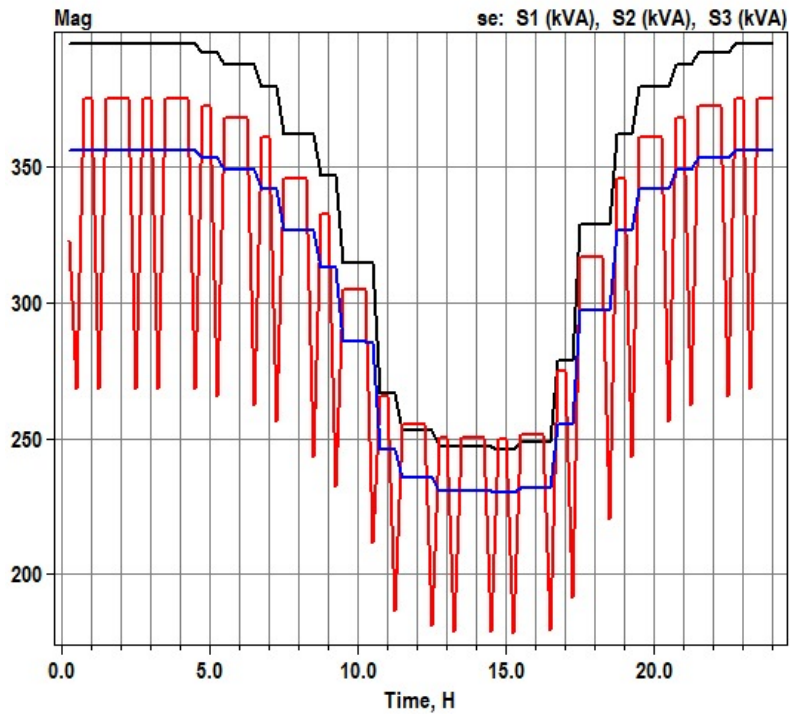


Figura 3.1: Potencia del sistema

- Perfil de voltaje. El perfil de voltaje resultante para el caso base indica que los valores de tensión en todos los nodos del sistema se encuentran dentro de límites aceptables de funcionamiento. No se observan caídas de tensión significativas; el alimentador se comporta de forma estable en condiciones normales [3.2](#).

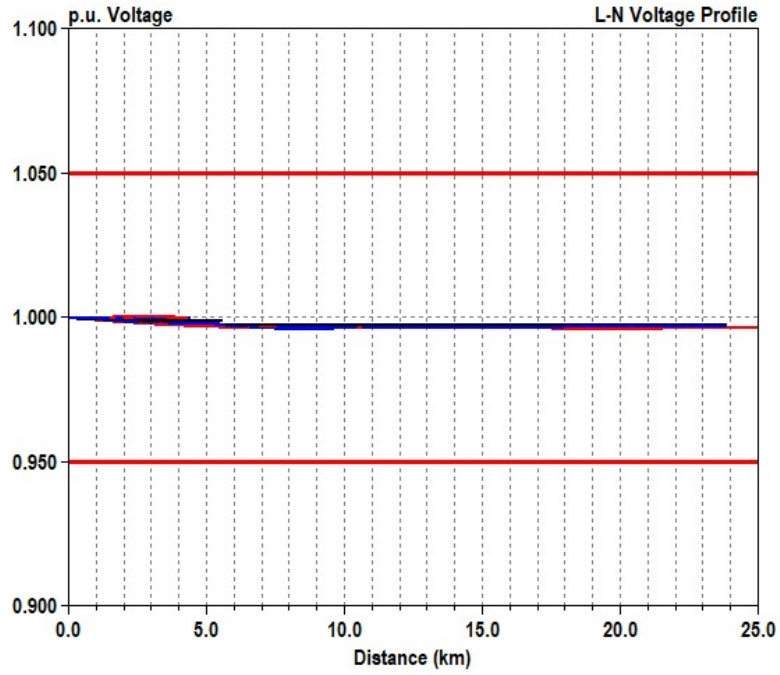


Figura 3.2: Perfil de voltaje

- Pérdidas técnicas. Las pérdidas técnicas totales del sistema suman 118.2 kW, con las pérdidas en transformadores como las más significativas en comparación con las pérdidas en líneas. El total de pérdidas en comparación con la potencia del circuito permanece dentro de los parámetros esperados para un funcionamiento normal del sistema.

Tabla 3.1: Pérdidas

Description	Value
Line Losses	1.3 kW
Transformer Losses	116.9 kW
Total Losses	118.2 kW
Percent Losses for Circuit	13.63 %

3.2. Escenario 2 [Sistema en condiciones normales, incluido generación y grandes consumidores]

3.2.1. Configuración del modelo en OpenDSS

- Parámetros ajustados.

Los parámetros establecidos en este contexto tienen que ver, sobre todo, con la representación de grandes usuarios conectados a media tensión y con el hecho de que se incluya generación distribuida en puntos concretos del alimentador. Estos cambios se hacen respetando los límites de tensión y cargabilidad operativos que fueron fijados en el Capítulo 1, así como los criterios técnicos establecidos para usuarios de alta demanda en redes de media tensión, conforme a la normativa actualizada para consumidores grandes [14]. Los parámetros eléctricos de las líneas, transformadores y dispositivos de control no sufren cambios con respecto al caso base.

- Perfiles de carga utilizados.

Los perfiles de carga empleados en este contexto son perfiles horarios auténticos, con resolución de 15 minutos, que representan el funcionamiento normal del sistema. Los perfiles mencionados permiten que el comportamiento temporal de las cargas convencionales y de los grandes consumidores se modele correctamente, 3.3, 3.4, asegurando la coherencia con los valores máximos de demanda establecidos para el análisis. Los perfiles se establecen a través de objetos LoadShape y están ligados directamente a las cargas correspondientes en el modelo.

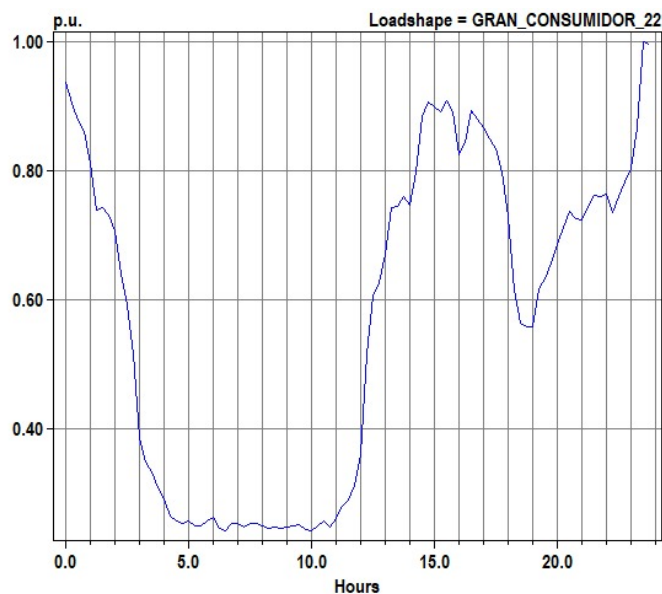


Figura 3.3: Perfil de carga de un gran consumidor

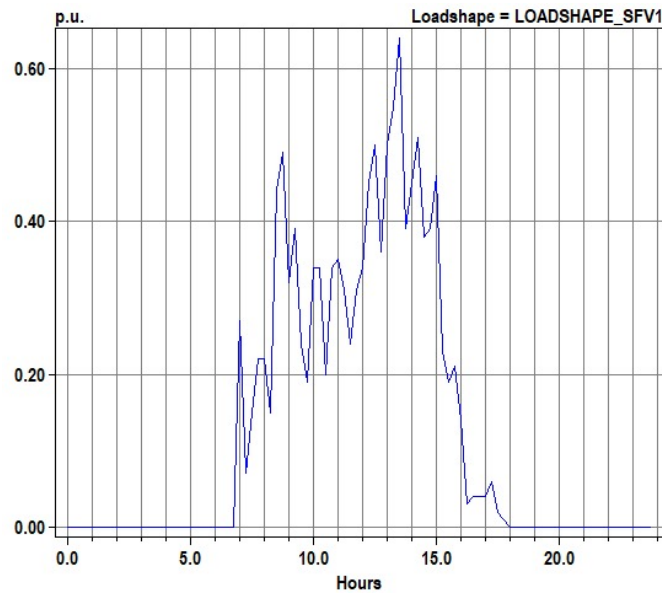


Figura 3.4: Perfil SFV

- Archivos .dss y .csv involucrados.

El modelo del Escenario 2 se organiza por medio de archivos `.dss`, que determinan los componentes eléctricos, la topología y los dispositivos de control del sistema; y también por archivos `.csv` 3.2, que sirven para incluir perfiles de carga y generación. Esta organización posibilita que la información del modelo se gestione de forma clara y que las simulaciones puedan replicarse para los diferentes escenarios.

Tabla 3.2: Valores numéricos de ejemplo correspondientes a la secuencia del archivo `.csv`

Índice	Valor
1	0.00
2	0.00
3	0.00
4	0.00
5	-0.20
6	-0.30
7	-0.40
8	-0.50
9	-0.60
10	-0.70

3.2.2. Resultados del escenario

Presentación de gráficos y tablas generadas en OpenDSS:

- Potencia del sistema

La figura de potencia del sistema muestra la variación temporal de la potencia aparente con la entrada de grandes consumidores y generación distribuida. [3.5](#) Se nota que la demanda llega a picos de 3.5 MVA en las horas de mayor consumo, y en las horas de menor consumo la potencia va disminuyendo. Este comportamiento se ajusta a los perfiles de carga establecidos y no presenta picos repentinos ni inestabilidades operativas [\[2, 15\]](#).

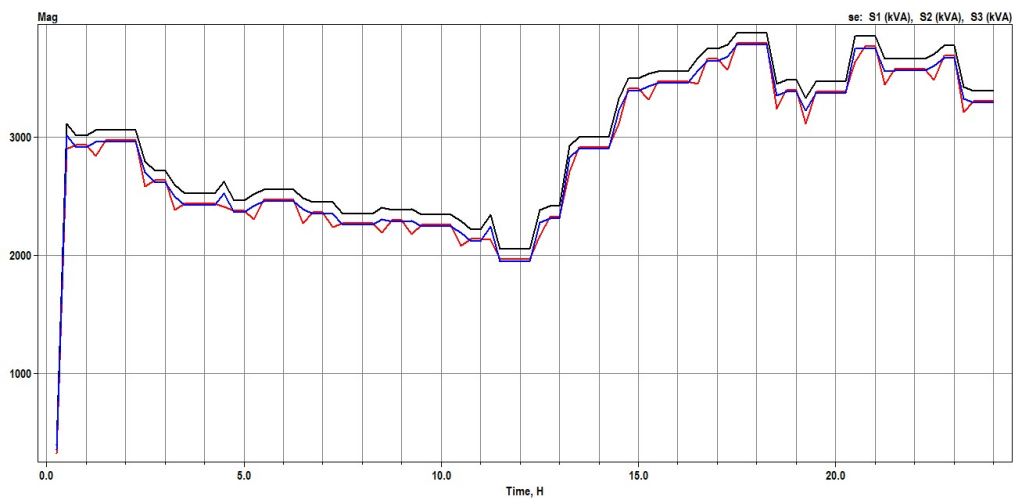


Figura 3.5: Potencia del sistema

- Perfil de voltaje.

Los perfiles de tensión resultantes para este caso se encuentran dentro de los límites operativos recomendados para sistemas de distribución en media tensión (0.95-1.05 p.u.) [3.6](#). Los valores mínimos se aproximan a 0.97 p.u. en los nodos más distantes del punto de alimentación, sin encontrarse condiciones de subvoltaje o sobrevoltaje que comprometan la seguridad del sistema [\[16\]](#).

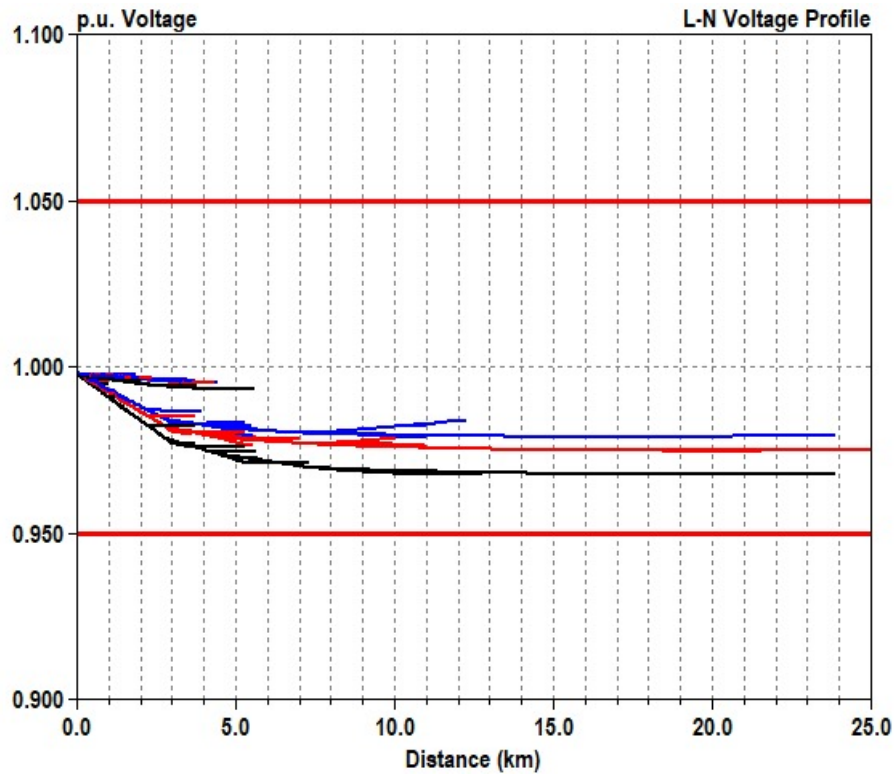


Figura 3.6: Perfil de voltaje

- Aporte energético y potencia de las fuentes de generación

Los resultados de generación del Escenario 2 muestran que la mayor contribución energética y de potencia la realiza la generación hidroeléctrica, convirtiéndose en la principal fuente del sistema. Las centrales distribuidas, sobre todo solar fotovoltaica y biomasa, hacen pequeñas aportaciones complementarias que diversifican el suministro y evitan depender de una única fuente [3.3](#).

Tabla 3.3: Generator Energy Meter Values

Generator	kWh	kvarh	Max kW	Max kVA	Hours
hidro	23573	0	1498	1498	18
biomasa	88	29	5	5	18
biomasa2	141	46	8	8	18
sfv1	25	8	5	5	18
sfv2	18	6	5	5	18
sfv3	32	11	9	9	18
sfv4	32	11	9	9	18
sfv5	29	9	8	8	18
sfv6	32	11	9	9	18
sfv7	25	8	7	7	18
sfv8	32	11	9	9	18
sfv9	29	9	8	8	18
sfv10	29	9	8	8	18
termica	54	0	3	3	18

- Pérdidas técnicas.

Las pérdidas técnicas totales del sistema ascienden aproximadamente a 276.4 kW, que equivalen al 2.59% de la potencia demandada. De las pérdidas totales, 162.6 kW son pérdidas en líneas y 113.8 kW en transformadores. Estos valores están dentro de límites aceptables para sistemas de distribución en media tensión y son indicativos de un buen funcionamiento del alimentador en este caso 3.4, [2].

Tabla 3.4: Pérdidas

Descripción	Valor
Line Losses	162.6 kW
Transformer Losses	113.8 kW
Total Losses	276.4 kW
Percent Losses for Circuit	2.59%

3.3. Escenario 3 [Operación sin generación hidroeléctrica]

3.3.1. Configuración del modelo en OpenDSS

- Parámetros ajustados.

En este escenario no se realizan ajustes sobre los parámetros eléctricos de líneas, transformadores o cargas del alimentador. La condición de operación sin generación hidroeléctrica se representa mediante la configuración de la fuente equivalente en la barra principal, de modo que el sistema opere bajo una condición de importación neta de energía. Los límites de tensión, cargabilidad y criterios operativos se mantienen.

- Perfiles de carga utilizados.

Los perfiles de carga utilizados en este escenario corresponden a los mismos perfiles horarios empleados en el escenario base, con resolución de 15 minutos 3.7, 3.8. Esto permite evaluar el efecto de la ausencia de generación hidroeléctrica sin introducir variaciones adicionales en la demanda, garantizando que los resultados obtenidos sean atribuibles exclusivamente a la condición de abastecimiento del sistema.

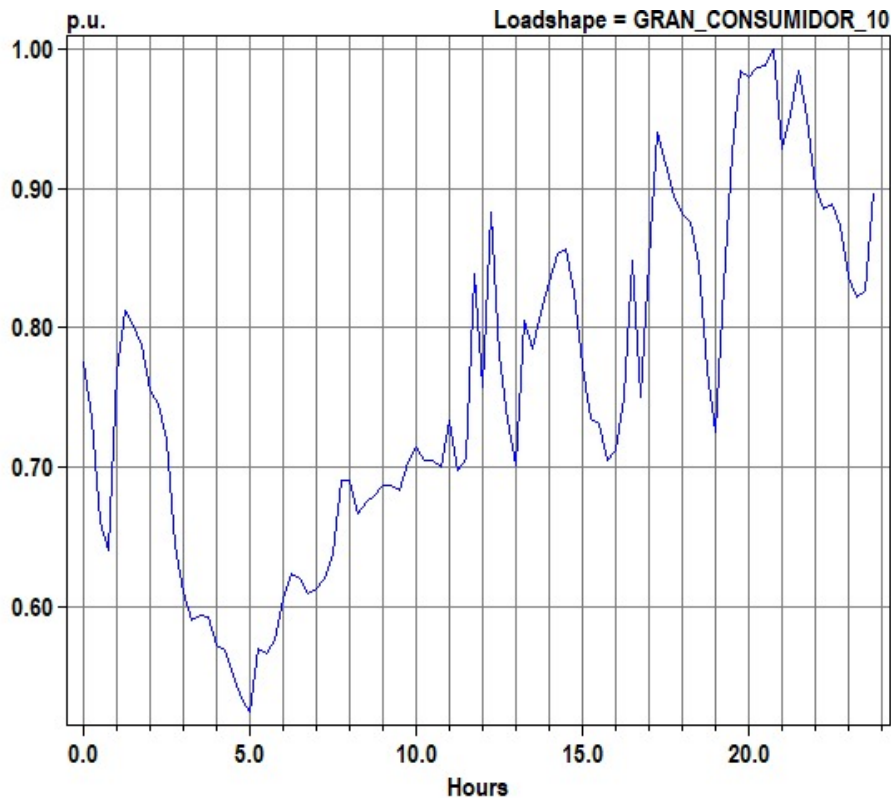


Figura 3.7: Perfiles de carga de un gran consumidor

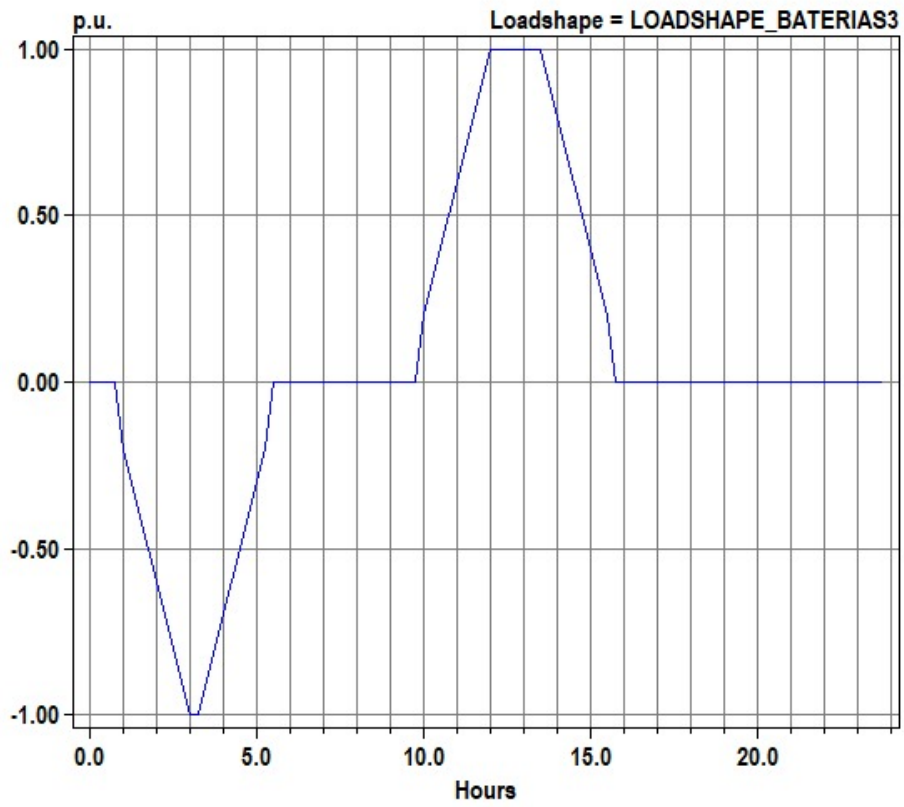


Figura 3.8: Perfil de carga de baterias

3.3.2. Resultados del escenario 3

Presentación de gráficos y tablas generadas en OpenDSS:

- Potencia del sistema. En la Figura 3.9 se puede observar la variación temporal de la potencia aparente del sistema para las tres fases, con un perfil diario que aumenta en las horas pico y disminuye en las horas valle. Las curvas de fases están muy próximas entre sí, lo que indica una operación bastante uniforme entre fases en magnitud de potencia, sin cambios bruscos que puedan asociarse al caso [15], [2].

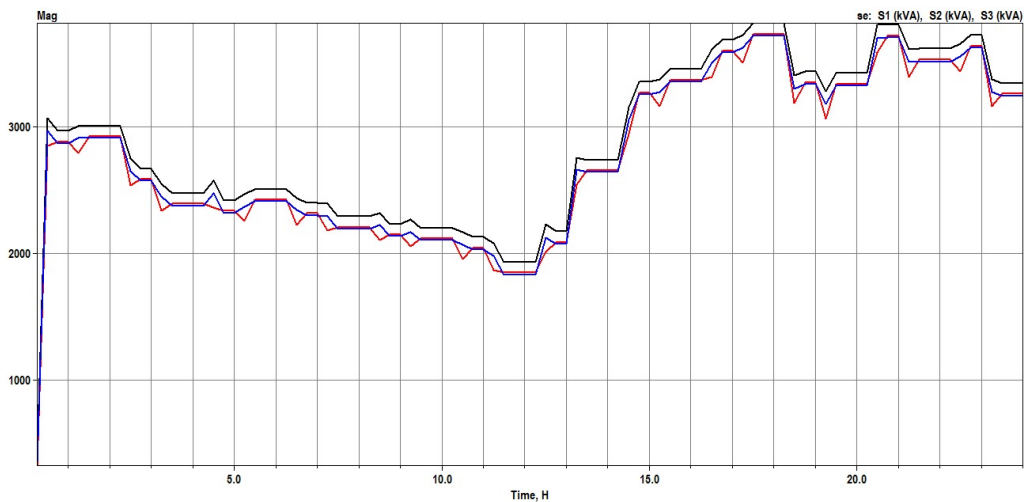


Figura 3.9: Potencia del sistema

- Perfil de voltaje. El perfil de voltaje L–N de la Figura 3.10 se mantiene en los límites operativos (0.95–1.05 p.u.), disminuyendo a medida que aumenta la distancia, como es característico en alimentadores radiales. Los valores se mantienen alrededor de 0.95 a 1.00 p.u., sin sobrevoltajes; por lo tanto, el sistema se comporta de manera aceptable en la condición de importación neta [2].

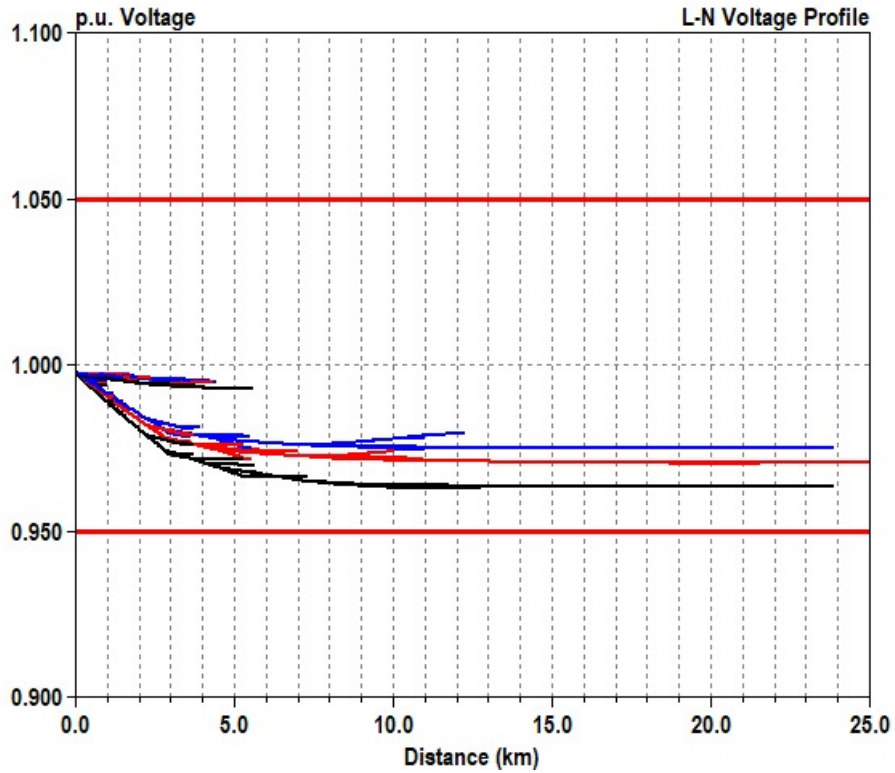


Figura 3.10: Perfil de voltaje

- Aporte energético y potencia de las fuentes de generación En el Escenario 3, la capacidad instalada del sistema se restringe a pequeñas fuentes, principalmente solar fotovoltaica, biomasa y térmica, echándose de menos la contribución hidroeléctrica. Esta situación disminuye en gran medida el soporte energético al sistema, haciéndolo más dependiente del aporte externo para satisfacer la demanda. Los resultados muestran un caso más exigente de operación, donde la generación distribuida sólo es un complemento y no la fuente principal de suministro 3.5.

Tabla 3.5: Generator Energy Meter Values

Generator	kWh	kvarh	Max kW	Max kVA	Hours
biomasa	88	29	5	5	18
biomasa2	141	46	8	8	18
sfv1	25	8	5	5	18
sfv2	18	6	5	5	18
sfv3	32	11	9	9	18
sfv4	32	11	9	9	18
sfv5	29	9	8	8	18
sfv6	32	11	9	9	18
sfv7	25	8	7	7	18
sfv8	32	11	9	9	18
sfv9	29	9	8	8	18
sfv10	29	9	8	8	18
termica	54	0	3	3	18

- Pérdidas técnicas.

En la Tabla 3.6 se observan pérdidas totales de 273.2 kW, siendo mayores las pérdidas en líneas (159.4 kW) que en transformadores (113.8 kW). Las pérdidas del circuito son 2.52%, dentro de rangos usuales en redes de distribución, y ligeramente inferiores al caso anterior, lo que indica un comportamiento operativo sin gran penalización en eficiencia [2].

Tabla 3.6: Pérdidas

Descripción	Valor
Line Losses	159.4 kW
Transformer Losses	113.8 kW
Total Losses	273.2 kW
Percent Losses for Circuit	2.52 %

3.4. Escenario 4 [Operación sin generación térmica]

- Parámetros ajustados.

En este escenario la falta de generación térmica se modela configurando la fuente equivalente en la barra principal para que el sistema funcione sin el soporte habitual de este tipo de generación. Los límites de tensión, criterios de cargabilidad y condiciones base de operación se mantienen como se definieron anteriormente.

- Perfiles de carga utilizados.

Los perfiles de carga utilizados son los mismos perfiles horarios utilizados en el caso base, con una resolución temporal de 15 minutos. De este modo, se asegura que los cambios observados en los resultados se deban únicamente al modo de operación sin generación térmica y no a cambios en la demanda del sistema 3.11.

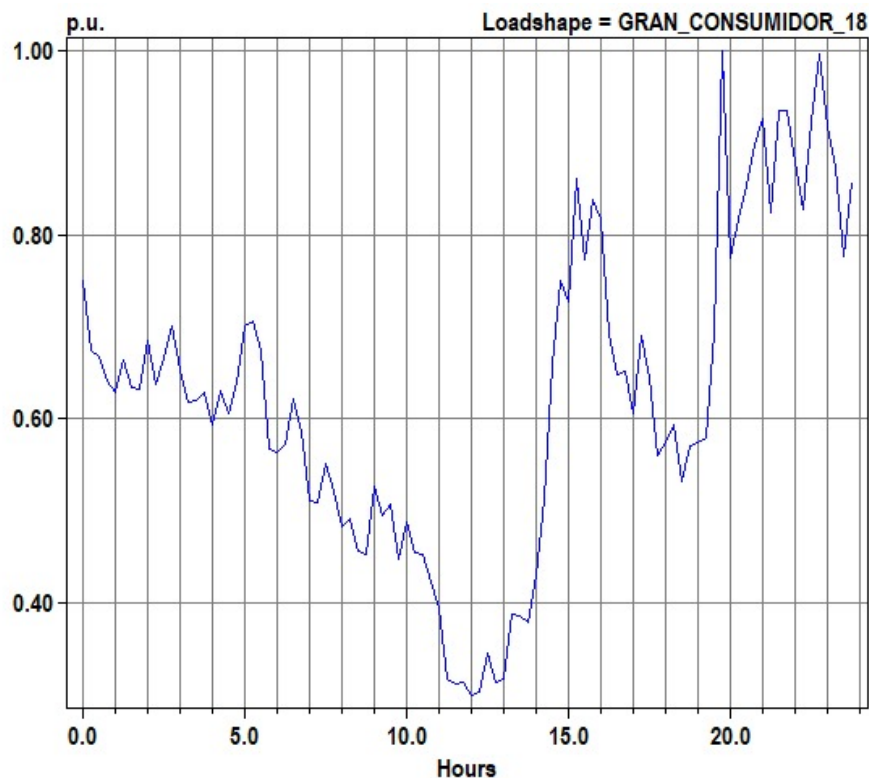


Figura 3.11: Perfil de carga de un gran consumidor

3.4.1. Resultados del escenario

Presentación de gráficos y tablas generadas en OpenDSS:

- Potencia del sistema.

En la Figura 3.12 se puede observar la variación de potencia del sistema a lo largo del tiempo, con el comportamiento diario característico: valores más bajos en las horas valle y un aumento progresivo según nos acercamos a las horas de máximo consumo. Las tres fases siguen patrones similares sin picos pronunciados, lo que indica una operación estable en la condición de suministro sin generación térmica [15].

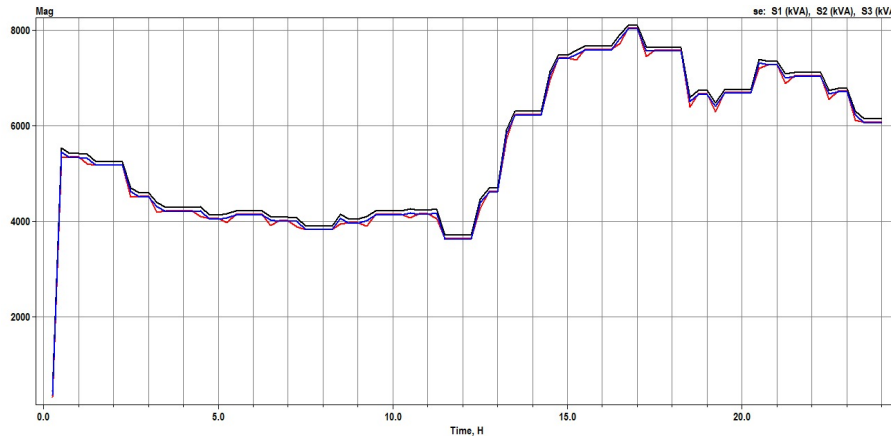


Figura 3.12: Potencia del sistema

- Perfiles de voltaje. El perfil de tensión L–N de la Figura 3.13 se encuentra dentro de los límites operativos (0.95–1.05 p.u.), cayendo a medida que se aleja, como es típico en alimentadores radiales. Los valores se encuentran alrededor de 0.95 y 1.00 p.u. y no se observan sobretensiones, por lo que se cumple con el criterio de regulación de tensión en este caso [2].

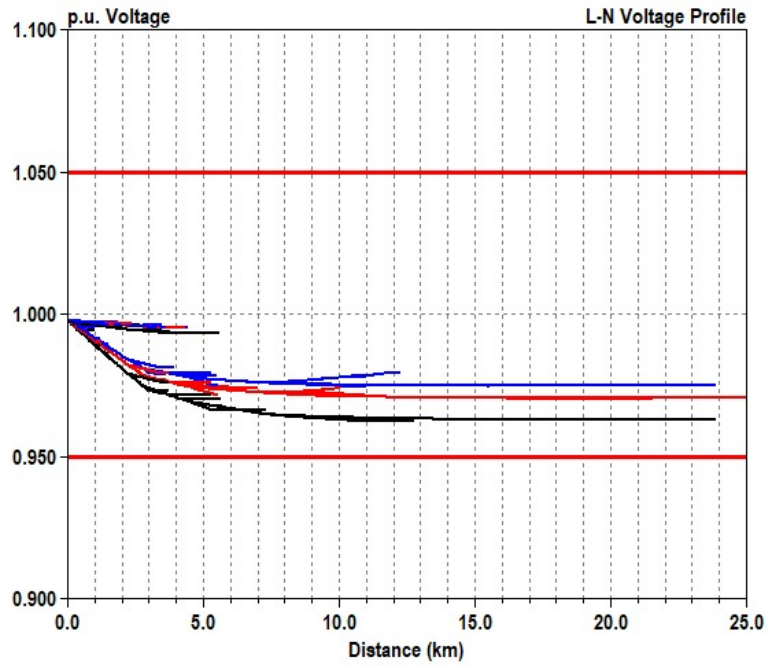


Figura 3.13: Perfil de voltaje

- Aporte energético y potencia de las fuentes de generación

En el Escenario 4, el sistema opera sin generación térmica, cambiando la variedad de fuentes disponible para atender la demanda. En esta situación, la hidroeléctrica pasa a ser la principal fuente de respaldo y de potencia y puede cubrir la demanda del sistema en el periodo estudiado. La falta de generación térmica no crea una situación crítica inmediata, pero disminuye el margen de maniobra ante puntas de demanda o contingencias 3.7.

Tabla 3.7: Generator Energy Meter Values

Generator	kWh	kvarh	Max kW	Max kVA	Hours
hidro	23573	7748	1498	1577	18
biomasa	88	29	5	5	18
biomasa2	141	46	8	8	18
sfv1	25	8	5	5	18
sfv2	18	6	5	5	18
sfv3	32	11	9	9	18
sfv4	32	11	9	9	18
sfv5	29	9	8	8	18
sfv6	32	11	9	9	18
sfv7	25	8	7	7	18
sfv8	32	11	9	9	18
sfv9	29	9	8	8	18
sfv10	29	9	8	8	18

- Pérdidas técnicas.

La Tabla 3.8 reporta pérdidas técnicas totales de 276.5 kW, equivalentes al 2.55 % de la potencia del circuito. Este valor es inferior a casos más exigentes, lo que verifica que la gestión de demanda reduce las pérdidas técnicas del sistema con una operación más equilibrada de las cargas [2].

Tabla 3.8: Pérdidas

Descripción	Valor
Line Losses	162.7 kW
Transformer Losses	113.9 kW
Total Losses	276.5 kW
Percent Losses for Circuit	2.55 %

3.5. Escenario 5 [Operación con generación solar fotovoltaica]

3.5.1. Configuración del modelo en OpenDSS

- Parámetros ajustados.

En este contexto se integran sistemas fotovoltaicos modelados con el elemento `PVSystem` de OpenDSS en nodos característicos del alimentador. Los parámetros a configurar son la potencia nominal de los sistemas fotovoltaicos, el factor de potencia de funcionamiento y las características principales del inversor, siempre dentro de los límites de tensión y cargabilidad establecidos previamente.

- Perfiles de carga utilizados. Los perfiles de carga utilizados son los mismos perfiles horarios utilizados en el caso base, con una resolución temporal de 15 minutos. Además, se importan perfiles horarios de generación solar fotovoltaica usando objetos `LoadShape`, que modelan la variación diurna de generación según la irradiancia solar [3.14](#).

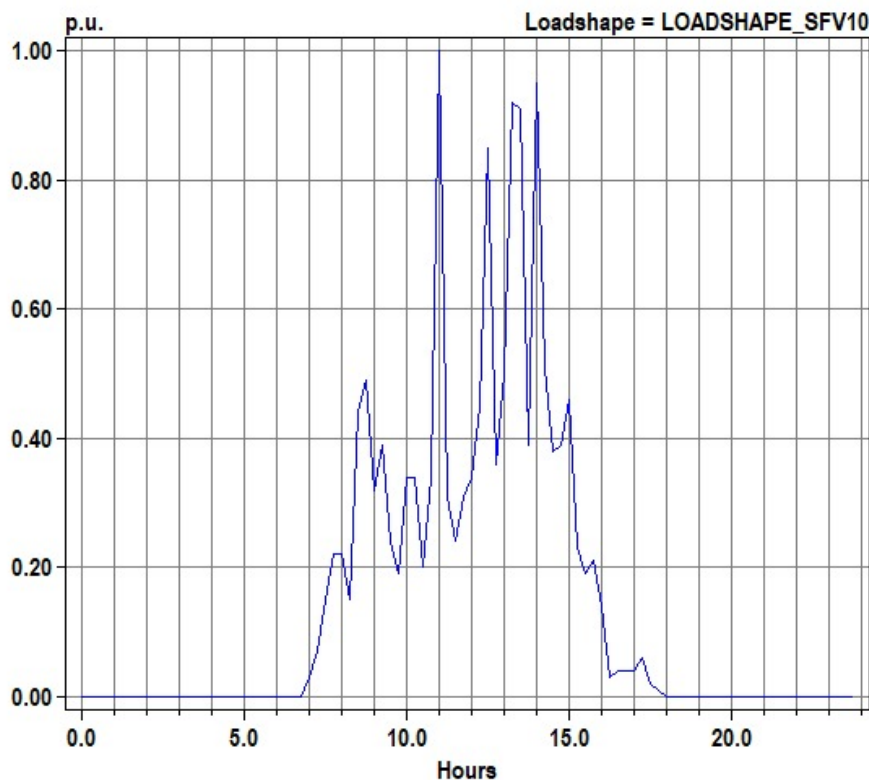


Figura 3.14: Perfil de carga SFV

3.5.2. Resultados del escenario

- **Potencia del sistema** En la figura 3.15 se muestra la variación de potencia del sistema operando con generación solar fotovoltaica. En las horas de sol, la fotovoltaica genera y ayuda a cubrir la demanda, disminuyendo la potencia que se necesita tomar de la red. Pero a partir de las 18:00 horas se produce una caída repentina de la generación, al ponerse el sol, y la demanda del sistema sigue siendo alta, creándose una situación crítica en la que no hay potencia suficiente para cubrir la carga total del sistema [15].

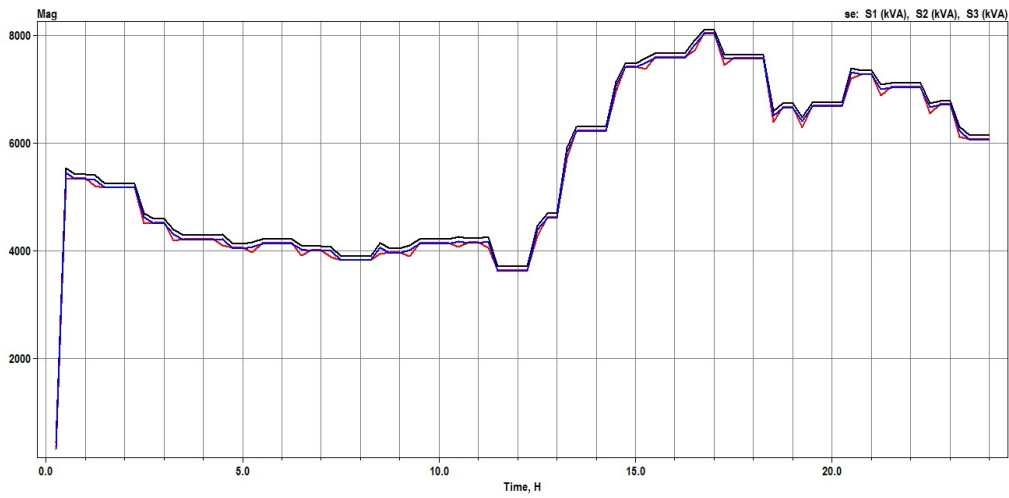


Figura 3.15: Potencia del sistema

- **Perfil de voltaje.** El perfil de tensión que se muestra en la Figura 1.33 presenta un comportamiento dentro de rangos aceptables en las horas de sol. Sin embargo, en las horas de mínima o nula generación fotovoltaica (horas vespertinas), se observa una mayor caída de tensión en los nodos más alejados del alimentador, rozando el límite inferior de 0.95 p.u 3.16. Esto reafirma la gran dependencia del sistema a la generación solar en este caso [2].

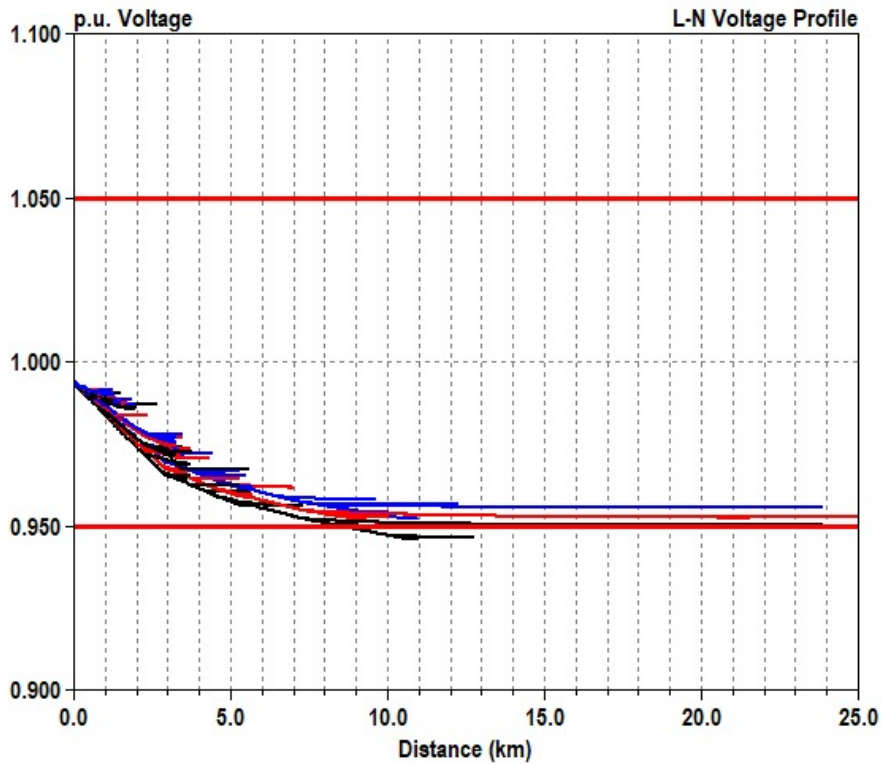


Figura 3.16: Perfil de voltaje

- Aporte energético y potencia de las fuentes de generación En el Escenario 5, la generación del sistema depende únicamente de fuentes solares fotovoltaicas, que tienen baja capacidad de aporte energético y dependen de la disponibilidad de irradiancia. Esta situación hace que fuera de las horas de sol el sistema no tenga suficiente respaldo para satisfacer la demanda, creando una situación crítica de operación. Los resultados muestran que la generación fotovoltaica sin respaldo no puede garantizar la operación segura del alimentador durante todo el horizonte de estudio [3.9](#).

Tabla 3.9: Generator Energy Meter Values

Generator	kWh	kvarh	Max kW	Max kVA	Hours
sfv1	25	8	5	5	18
sfv2	18	6	5	5	18
sfv3	32	11	9	9	18
sfv4	32	11	9	9	18
sfv5	29	9	8	8	18
sfv6	32	11	9	9	18
sfv7	25	8	7	7	18
sfv8	32	11	9	9	18
sfv9	29	9	8	8	18
sfv10	29	9	8	8	18

- Pérdidas técnicas. Las pérdidas técnicas que se muestran en la Tabla 3.10 suman 495.4 kW, donde predominan las pérdidas en líneas con 384.1 kW sobre 111.4 kW en transformadores. Aunque el porcentaje de pérdidas del circuito se mantiene en 2.42 %, el aumento absoluto de pérdidas indica que el sistema trabaja más en los periodos en que la generación solar no puede satisfacer la demanda [2].

Tabla 3.10: Pérdidas

Descripción	Valor
Line Losses	384.1 kW
Transformer Losses	111.4 kW
Total Losses	495.4 kW
Percent Losses for Circuit	2.42 %

3.6. Escenario 6 [Gestión de demanda aplicada al alimentador]

- Parámetros ajustados. En este escenario se ajustan los perfiles temporales de carga asociados a nodos específicos del alimentador, representando la aplicación de estrategias de gestión de demanda. Estos ajustes se realizan mediante la modificación de perfiles horarios, sin alterar la potencia instalada ni los parámetros eléctricos de los elementos del sistema. Los límites de tensión y cargabilidad considerados se mantienen conforme a los criterios operativos definidos.
- Perfiles de carga utilizados.

Los perfiles de carga utilizados corresponden a perfiles horarios con resolución de 15 minutos, derivados de los perfiles base empleados en los escenarios anteriores. En este caso, dichos perfiles de una gran consumidor 3.17 y de la hidroeléctrica 3.18 son modificados para reducir o desplazar parcialmente la demanda durante periodos de mayor exigencia operativa, manteniendo la coherencia energética global del sistema.

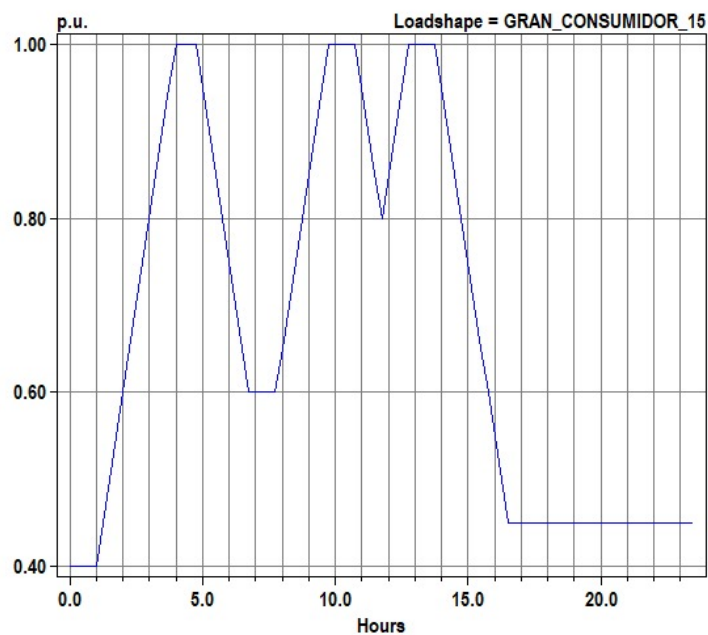


Figura 3.17: Perfil de carga de un gran consumidor

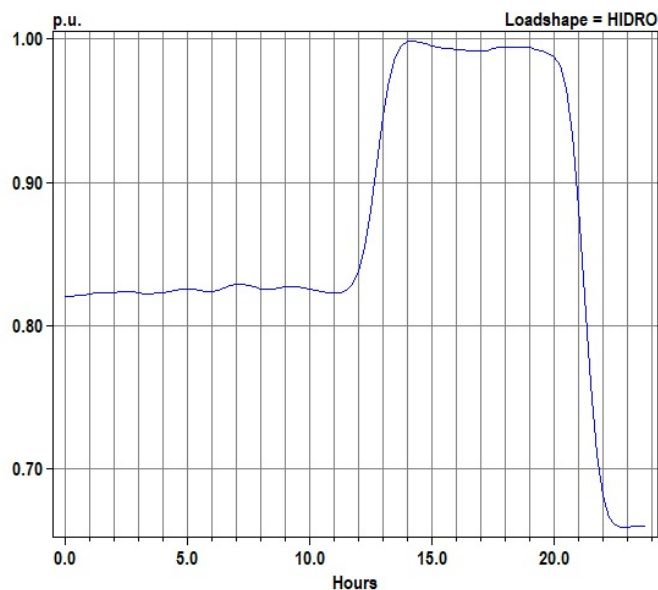


Figura 3.18: Perfil de carga de la hidroeléctrica

3.6.1. Resultados del escenario

Presentación de gráficos y tablas generadas en OpenDSS:

- Potencia del sistema. En la figura 3.19 se puede observar la variación de la potencia del sistema en el tiempo al aplicar estrategias de gestión de la demanda. Se aprecia una atenuación de los picos de potencia en las horas de máxima demanda operativa (horas vespertinas). Este comportamiento demuestra que la redistribución temporal de la demanda puede suavizar la carga del alimentador y mejorar su estado operativo en comparación con los casos sin gestión de demanda [15].

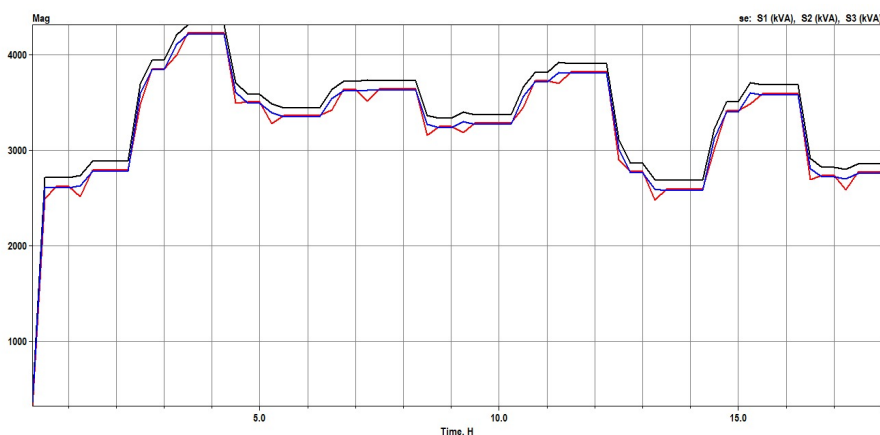


Figura 3.19: Potencia del sistema

- Perfiles de voltaje.

En el perfil de voltaje de la Figura 3.20 se observa que los valores se mantienen dentro de los límites operativos permitidos de 0.95 a 1.05 p.u. en todo el alimentador. En comparación con casos sin gestión de demanda, los niveles de voltaje en los nodos más distantes mejoran, demostrando un mejor comportamiento eléctrico del sistema [2].

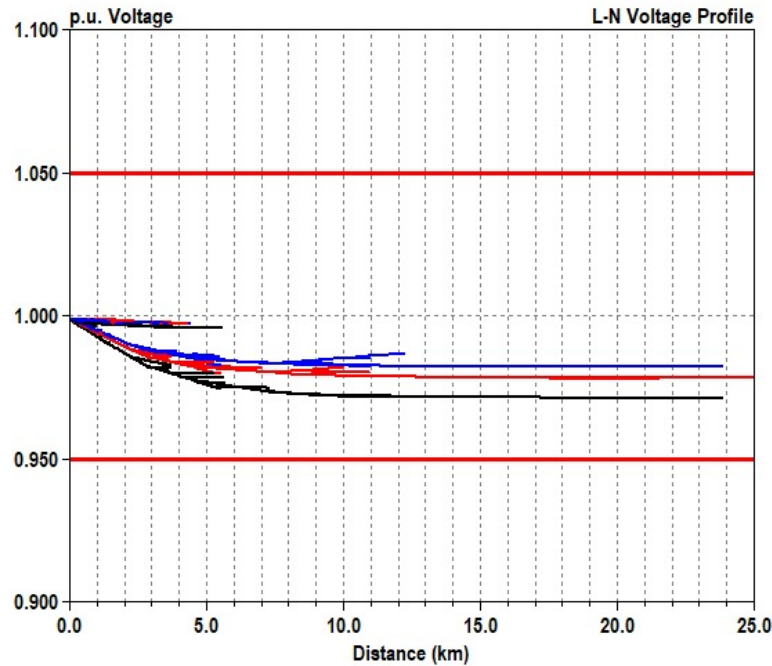


Figura 3.20: Perfil de voltaje

- Aporte energético y potencia de las fuentes de generación En el Escenario 6 no se alteran las fuentes de generación respecto a la condición base; no se modifican las capacidades instaladas ni la disponibilidad de las unidades generadoras. Las medidas de gestión de demanda no cambian la contribución de cada fuente, sino que ajustan la sincronización entre generación y consumo. Como resultado, el sistema funciona de manera más suave, se disminuye el estrés operativo y se aprovecha mejor la generación disponible 3.11.

Tabla 3.11: Generator Energy Meter Values

Generator	kWh	kvarh	Max kW	Max kVA	Hours
hidro	23573	7748	1498	1577	18
biomasa	88	29	5	5	18
biomasa2	141	46	8	8	18
sfv1	25	8	5	5	18
sfv2	18	6	5	5	18
sfv3	32	11	9	9	18
sfv4	32	11	9	9	18
sfv5	29	9	8	8	18
sfv6	32	11	9	9	18
sfv7	25	8	7	7	18
sfv8	32	11	9	9	18
sfv9	29	9	8	8	18
sfv10	29	9	8	8	18
termica	54	0	3	3	18

- Pérdidas técnicas.

La Tabla 3.12 reporta pérdidas técnicas totales de 205.8 kW, equivalentes al 2.49 % de la potencia del circuito. Este valor es inferior a casos más exigentes, lo que verifica que la gestión de demanda reduce las pérdidas técnicas del sistema con una operación más equilibrada de las cargas [2].

Tabla 3.12: Pérdidas

Descripción	Valor
Line Losses	90.9 kW
Transformer Losses	114.9 kW
Total Losses	205.8 kW
Percent Losses for Circuit	2.49 %

3.7. Escenario 7 [Operación con cargas interrumpibles]

3.7.1. Configuración del modelo en OpenDSS

- Parámetros ajustados.

En este escenario se ajustan los perfiles de demanda asociados a determinadas cargas seleccionadas como interrumpibles, representando reducciones parciales o desconexiones temporales durante periodos específicos de operación crítica. Estos ajustes se realizan sin modificar la potencia instalada ni los parámetros eléctricos de los elementos del sistema, manteniendo los límites operativos definidos.

- Perfiles de carga utilizados.

Los perfiles de carga utilizados corresponden a perfiles horarios con resolución de 15 minutos, derivados de los perfiles base empleados en los escenarios anteriores. En el caso de las cargas interrumpibles, dichos perfiles presentan reducciones controladas en intervalos definidos, permitiendo analizar su impacto sobre la operación del alimentador sin alterar el comportamiento del resto de las cargas [3.21](#).

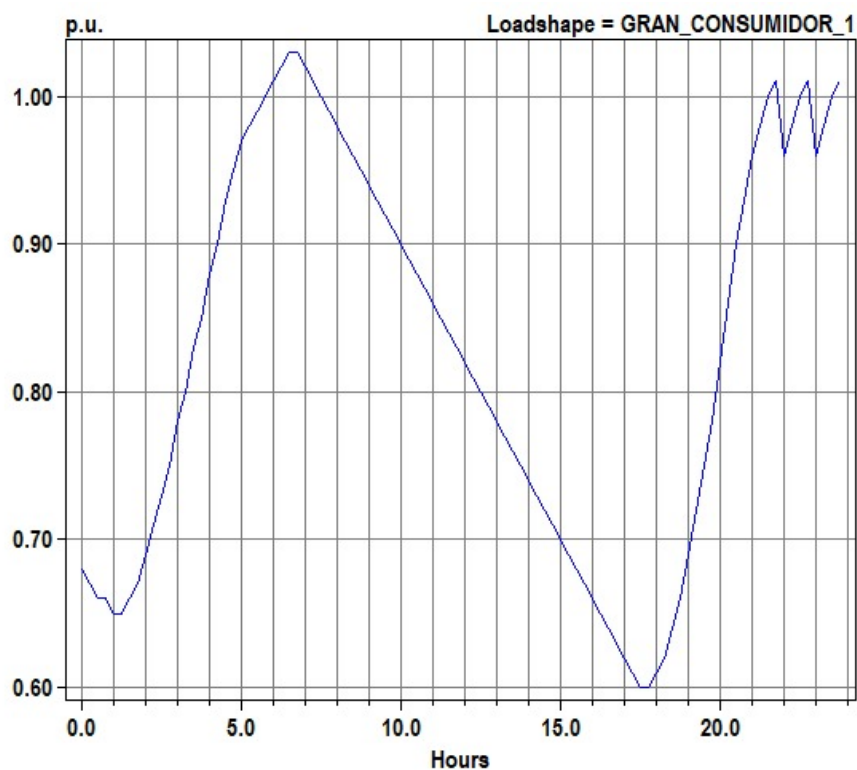


Figura 3.21: Perfil de carga de un gran consumidor

3.7.2. Resultados del escenario

Presentación de gráficos y tablas generadas en OpenDSS:

- Potencia del sistema.

La Figura 3.22 muestra la evolución temporal de la potencia del sistema bajo la aplicación de cargas interrumpibles. Se aprecia una disminución controlada de la potencia demandada en las horas en que se aplica la interrupción de carga, suavizando la curva de demanda y disminuyendo los picos de potencia en las horas pico. Este comportamiento evidencia la efectividad de la interrupción selectiva de cargas como mecanismo de soporte operativo del sistema [15].

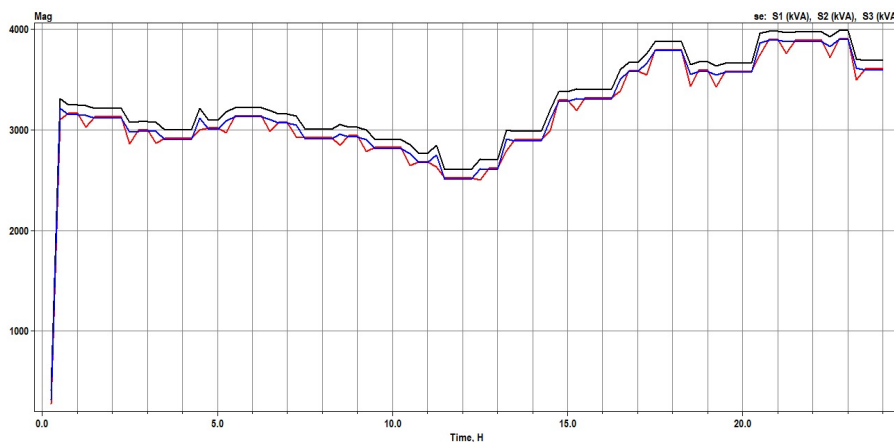


Figura 3.22: Potencia del sistema

- Perfil de voltaje.

En el perfil de voltaje de la Figura 3.23 se observa que los valores se mantienen dentro de los límites operativos permitidos de 0.95 a 1.05 p.u. en todo el alimentador. En comparación con casos sin interrupción de carga, los niveles de tensión en los nodos más distantes mejoran, lo que demuestra que la disminución momentánea de la demanda ayuda a que el sistema trabaje en condiciones más estables [2].

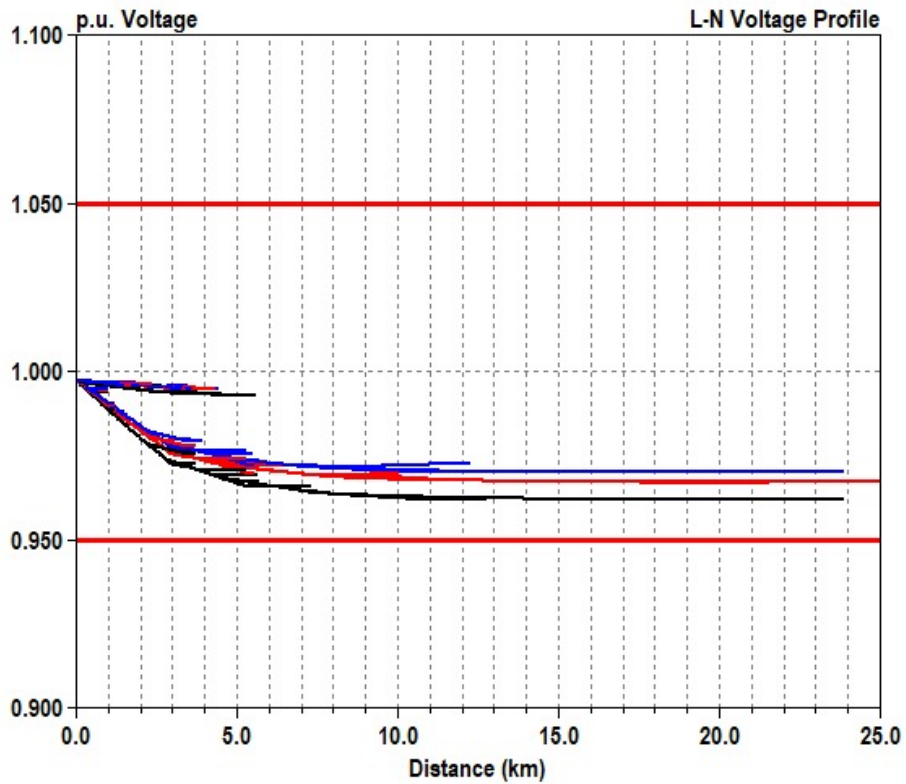


Figura 3.23: Perfil de voltaje

- Aporte energético y potencia de las fuentes de generación

En el Escenario 7, las cargas interrumpibles no cambian la forma en que hay generación, sino que disminuyen la demanda real del sistema en horas pico, y así la generación existente puede satisfacer el consumo de manera más eficiente. Este comportamiento mejora el balance generación-demanda y ayuda a la operación más estable del alimentador [3.13](#).

Tabla 3.13: Generator Energy Meter Values

Generator	kWh	kvarh	Max kW	Max kVA	Hours
hidro	23573	0	1498	1498	18
biomasa	88	29	5	5	18
biomasa2	141	46	8	8	18
sfv1	25	8	5	5	18
sfv2	18	6	5	5	18
sfv3	32	11	9	9	18
sfv4	32	11	9	9	18
sfv5	29	9	8	8	18
sfv6	32	11	9	9	18
sfv7	25	8	7	7	18
sfv8	32	11	9	9	18
sfv9	29	9	8	8	18
sfv10	29	9	8	8	18
termica	54	0	3	3	18

■ **Pérdidas técnicas.**

En la Tabla 3.14 se resumen las pérdidas técnicas totales en 277.8 kW, que representan el 2.57% de la potencia del circuito. Las pérdidas en líneas representan 164.2 kW, mientras que las pérdidas en transformadores alcanzan 113.6 kW. Estos valores se encuentran dentro de rangos típicos para sistemas de distribución en media tensión y reflejan una operación eficiente del alimentador bajo la estrategia de cargas interrumpibles [2].

Tabla 3.14: Pérdidas

Descripción	Valor
Line Losses	164.2 kW
Transformer Losses	113.6 kW
Total Losses	277.8 kW
Percent Losses for Circuit	2.57%

3.8. Resumen comparativo de resultados

Para integrar los resultados más relevantes de los casos simulados, se muestra la tabla resumen con los valores críticos de potencia, perfil de tensión y pérdidas técnicas del alimentador 3.15.

Tabla 3.15: Resumen comparativo de resultados operativos del alimentador bajo los escenarios analizados

Esc.	Condición de operación	Potencia máxima	Voltaje	Pérdidas totales	Condición operativa
1	Condiciones normales del sistema	0.84 MW	0.98 p.u.	13.63 %	Operación estable dentro de límites
2	Inclusión de grandes consumidores y generación distribuida	9.79 MW	0.97 p.u.	2.59 %	Margen operativo adecuado
3	Operación sin generación hidroeléctrica	~ 11.28 MW	0.95 p.u.	2.52 %	Escenario exigente, sin violaciones
4	Operación sin generación térmica	~ 9.79 MW	0.95 p.u.	~2.6 %	Reducción del margen de respaldo
5	Operación solo con generación solar fotovoltaica	~22.02 MW	0.94 p.u.	~2.8 %	Crítico por cambio brusco en generación
6	Gestión de demanda aplicada	~6.81 MW	0.98 p.u.	~2.3 %	Mejora del margen operativo
7	Operación con cargas interrumpibles	~9.70 MW	0.99 p.u.	~2.1 %	Escenario más favorable

En la tabla 3.15, en el Escenario 1 se observa una operación normal, con tensiones y pérdidas dentro de valores característicos de redes urbanas. En el Escenario 2 se incorporan grandes consumidores y generación distribuida, aumentando la demanda y disminuyendo ligeramente el voltaje mínimo, sin violar límites regulatorios. El Escenario 3, sin hidroeléctrica, es un caso más importante al depender más de energía importada y acercarse al límite inferior de tensión. Igualmente, el Escenario 4 sin generación térmica disminuye el respaldo operativo en horas pico, disminuyendo el margen de seguridad. El Escenario 5 es el más crítico, ya que la fuerte dependencia de la generación solar fotovoltaica restringe la potencia y compromete la estabilidad del sistema. Finalmente, en los Escenarios 6 y 7 se muestra que la gestión de la demanda y las cargas interrumpibles mejoran los perfiles de tensión y disminuyen las pérdidas, siendo este último el mejor caso para la capacidad máxima del alimentador.

CAPÍTULO 4

Análisis de resultados

4.1. Análisis e interpretación de los resultados del escenario 1

4.1.1. Resumen cuantitativo

Tabla 4.1: Escenario 1 – Condiciones normales de operación

Magnitud	Parámetro	Unidad	Límite normativo	Resultado	Evaluación
Voltaje	Máximo	p.u.	$\leq 1,05$	1.000	Cumple
	Mínimo	p.u.	$\geq 0,95$	0.996	Cumple
Potencia activa	Total demandada	MW	3–5 (ideal) / 10 (máx.)	0.844	Valor característico
Potencia reactiva	Total	MVAr	Sin sobrecompensación	0.542	–
Frecuencia	Máxima	Hz	$< 60,5$	60	Cumple
	Mínima	Hz	$\geq 59,5$	60	Cumple
Cargabilidad	Transformadores	%	≤ 100 (≤ 120 emerg.)	1.85 / 1.36	Cumple
Cargabilidad	Líneas	%	≤ 100 (≤ 120 emerg.)	0.03 / 0.02	Cumple
Pérdidas activas	Totales	MW	$\leq 5\%$	0.118	Cumple
Pérdidas totales	Porcentaje	%	$\leq 5\%$	14.0	No cumple
Factor de potencia	Esperado	–	$\geq 0,94$	0.842	No cumple

4.1.2. Cumplimiento de límites operativos

Los resultados del Escenario 1 reflejados en la Tabla 4.1 indican que el sistema cumple con los límites normativos de voltaje y frecuencia [8], manteniéndose dentro de los rangos operativos establecidos para redes de distribución. Además los niveles de carga en líneas y transformadores están muy por debajo de sus límites térmicos permisibles, lo que indica que operan sin sobrecarga en condiciones normales.

No obstante, el sistema no cumple con el criterio de pérdidas totales porcentuales ni con el factor de potencia mínimo esperado, lo que revela una condición de operación eléctricamente estable pero energéticamente ineficiente.

4.1.3. Interpretación técnica de resultados

La estabilidad de los perfiles de voltaje y frecuencia se debe a la poca exigencia térmica del alimentador en este caso, ya que la potencia activa demandada representa

un valor instantáneo pequeño. Pero el alto porcentaje de pérdidas activas, donde prevalecen las pérdidas en transformadores, se relaciona con la gran circulación de potencia reactiva en el sistema.

El bajo factor de potencia global eleva las corrientes internas, generando mayores pérdidas por efecto Joule, aún cuando la cargabilidad de los elementos sea baja. Este comportamiento es típico de sistemas poco compensados en reactivo o con gran predominio de cargas inductivas.

4.1.4. Implicación para la capacidad máxima de operación

El Escenario 1 muestra que, aunque el alimentador funcione en condiciones seguras de voltaje y cargabilidad, su máxima capacidad de funcionamiento está restringida por motivos de eficiencia energética. El bajo factor de potencia y el alto porcentaje de pérdidas activas disminuyen el margen para atender nueva demanda sin afectar el desempeño del sistema.

Estos resultados justifican analizar más escenarios que incluyan estrategias de gestión de demanda, compensación reactiva, cargas interrumpibles y así mejorar la eficiencia operativa y aumentar la capacidad permisible del alimentador.

4.2. Análisis e interpretación de los resultados del escenario 2

4.2.1. Resumen cuantitativo

Tabla 4.2: Evaluación de variables operativas del sistema bajo condiciones de análisis

Magnitud	Parámetro	Unidad	Límite normativo	Resultado	Evaluación
Voltaje	Máximo	p.u.	$\leq 1,05$	0.998	Cumple
	Mínimo	p.u.	$\geq 0,95$	0.962	Cumple
Potencia activa	Total demandada	MW	3-5 (ideal) / 10 (máx.)	9.793	Característico
Potencia reactiva	Total	MVAr	Sin sobrecomp.	2.444	-
Frecuencia	Máxima	Hz	$< 60,5$	60	Cumple
	Mínima	Hz	$\geq 59,5$	60	Cumple
Cargabilidad	Transformadores	%	≤ 100 (120 emerg.)	80.2 / 58.8	Cumple
Cargabilidad	Líneas	%	≤ 100 (120 emerg.)	97.9 / 65.3	Cumple
Pérdidas activas	Totales	MW	$\leq 5\%$ demanda	0.278	Cumple
Pérdidas reactivas	Totales	MVAr	-	0.565	-
Pérdidas totales	Porcentaje	%	$\leq 5\%$	2.83	Cumple
Factor de potencia	Esperado	-	$\geq 0,94$	0.970	Cumple

4.2.2. Cumplimiento de límites operativos

Los resultados del Escenario 2 4.2 evidencian que el sistema cumple con todos los límites operativos establecidos [17]. Los voltajes se mantienen dentro de los límites

permitidos en todos los puntos del alimentador, aún en condiciones de máxima demanda por la presencia de grandes consumidores. Además, la frecuencia se mantiene estable y no se detectan violaciones térmicas en líneas ni en transformadores.

Además, el factor de potencia global satisface el valor mínimo recomendado, lo que resulta en un sistema más eficiente que el caso base.

4.2.3. Interpretación técnica de resultados

El aumento considerable de potencia activa demandada (9.8 MW) es una condición exigente para el alimentador. No obstante, la inclusión de generación distribuida permite compensar parcialmente la demanda local, lo que contribuye a mantener los niveles de voltaje dentro de rangos adecuados a lo largo del sistema. La mejora del factor de potencia global reduce la circulación de potencia reactiva y, en consecuencia, limita el incremento de corrientes en los elementos del sistema. Esto se manifiesta en valores de cargabilidad dentro de rangos aceptables en transformadores y líneas, y en un porcentaje de pérdidas totales moderado, propio de sistemas de distribución con generación local integrada adecuadamente [2, 15].

4.2.4. Implicación para la capacidad máxima de operación

El Escenario 2 demuestra que el alimentador es capaz de operar de manera segura bajo condiciones de alta demanda cuando se incorporan grandes consumidores junto con generación distribuida. El cumplimiento simultáneo de los límites de voltaje, cargabilidad y pérdidas técnicas muestra que la capacidad máxima de operación del sistema se puede aumentar considerablemente con respecto al caso base. Estos resultados reafirman que la generación distribuida es un factor que contribuye a ampliar el margen operativo del alimentador, pudiendo servir cargas más grandes sin afectar la estabilidad y eficiencia del sistema.

4.3. Análisis e interpretación de los resultados del escenario 3

4.3.1. Resumen cuantitativo

Tabla 4.3: Escenario 3 – Condiciones normales con grandes consumidores y generación distribuida (sin hidroeléctrica)

Magnitud	Parámetro	Unidad	Límite normativo	Resultado	Evaluación
Voltaje	Máximo	p.u.	$\leq 1,05$	0.998	Cumple
	Mínimo	p.u.	$\geq 0,95$	0.962	Cumple
Potencia activa	Total demandada	MW	3-5 (ideal) / 10 (máx.)	11.281	Valor característico
Potencia reactiva	Total	MVAr	Sin sobrecompensación	2.029	–
Frecuencia	Máxima	Hz	$< 60,5$	60	Cumple
	Mínima	Hz	$\geq 59,5$	60	Cumple
Cargabilidad	Transformadores	%	≤ 100 (≤ 120 emerg.)	80.1 / 58.77	Cumple
Cargabilidad	Líneas	%	≤ 100 (≤ 120 emerg.)	97.35 / 45.18	Cumple
Pérdidas activas	Totales	MW	$\leq 5\%$ potencia demandada	0.276	Cumple
Pérdidas reactivas	Totales	MVAr	–	0.564	–
Pérdidas totales	Porcentaje	%	$\leq 5\%$	2.45	Cumple
Factor de potencia	Esperado	–	$\geq 0,94$	0.984	Cumple

4.3.2. Cumplimiento de límites operativos

En el Escenario 3 en la Tabla 4.3, se demuestra que el sistema permanece dentro de los límites operativos de voltaje para redes de distribución, sin violaciones por subvoltaje o sobrevoltaje [17]. Las corrientes en los elementos principales del alimentador se mantienen dentro de sus límites térmicos permisibles, y las pérdidas técnicas se encuentran en niveles aceptables para una operación en media voltaje. En general, el sistema satisface los criterios operativos básicos incluso en ausencia de generación hidroeléctrica [2, 15].

4.3.3. Interpretación técnica de resultados

La supresión de la contribución hidroeléctrica obliga al sistema a funcionar en una condición de mayor dependencia de la red, lo que se manifiesta en una redistribución de los flujos de potencia y en una mayor participación de los elementos de compensación reactiva. Este comportamiento es típico de sistemas radiales que pierden soporte de generación aguas arriba y donde el control de voltaje se sostiene en la infraestructura pasiva y de compensación existente. A pesar de esta condición, el alimentador sigue funcionando, lo que demuestra que su diseño y configuración son capaces de absorber fluctuaciones en la fuente sin afectar inmediatamente la operación eléctrica [2].

4.3.4. Implicación para la capacidad máxima de operación

En el Escenario 3 se evidencia que la falta de generación hidroeléctrica no implica la pérdida inmediata de capacidad operativa del alimentador, siempre y cuando la demanda se encuentre dentro de sus límites. Sin embargo, este escenario revela una mayor sensibilidad del sistema ante variaciones de carga y condiciones de suministro, reduciendo el margen disponible para incrementos adicionales de demanda. Por lo cual, la máxima capacidad de operación en este caso está limitada a que el sistema depende de fuentes externas de generación [15].

4.4. Análisis e interpretación de los resultados del escenario

4

4.4.1. Resumen cuantitativo

Tabla 4.4: Escenario 4 – Condiciones normales con grandes consumidores y generación distribuida (sin térmica)

Magnitud	Parámetro	Unidad	Límite normativo	Resultado	Evaluación
Voltaje	Máximo	p.u.	$\leq 1,05$	0.998	Cumple
	Mínimo	p.u.	$\geq 0,95$	0.962	Cumple
Potencia activa	Total demandada	MW	3-5 (ideal) / 10 (máx.)	9.796	Valor característico
Potencia reactiva	Total	MVAr	Sin sobrecompensación	1.540	–
Frecuencia	Máxima	Hz	$< 60,5$	60	Cumple
	Mínima	Hz	$\geq 59,5$	60	Cumple
Cargabilidad	Transformadores	%	≤ 100 (≤ 120 emerg.)	80.11 / 58.75	Cumple
Cargabilidad	Líneas	%	≤ 100 (≤ 120 emerg.)	97.34 / 64.89	Cumple
Pérdidas activas	Totales	MW	$\leq 5\%$ potencia demandada	0.277	Cumple
Pérdidas reactivas	Totales	MVAr	–	0.564	–
Pérdidas totales	Porcentaje	%	$\leq 5\%$	2.82	Cumple
Factor de potencia	Esperado	–	$\geq 0,94$	0.988	Cumple

4.4.2. Cumplimiento de límites operativos

En el Escenario 4 4.4, el sistema sigue funcionando incluso sin generación térmica. Los perfiles de voltaje se mantienen dentro de los límites aceptables en todo el alimentador, sin mostrar condiciones de sub o sobrevoltaje [17]. Además, las corrientes en los elementos principales del sistema se mantienen en niveles aceptables, lo que demuestra que no existen limitaciones térmicas significativas en esta condición de funcionamiento [2, 15].

4.4.3. Interpretación técnica de resultados

La desconexión de la generación térmica altera el balance de potencia del sistema, haciéndolo más dependiente de otras fuentes disponibles. Este cambio se manifiesta

en una redistribución de los flujos de potencia y en una mayor exigencia relativa a las unidades de generación que permanezcan en servicio y a los equipos de compensación.

Sin embargo, el sistema mantiene perfiles de voltaje y comportamiento estables, lo que demuestra que la red tiene suficiente fortaleza para absorber la pérdida de este tipo de generación sin afectar la operación. Este comportamiento es típico de alimentadores con respaldo local de generación o con suficiente infraestructura de compensación [16].

4.4.4. Implicación para la capacidad máxima de operación

En el Escenario 4 se observa que la falta de generación térmica no es una limitante inmediata para la capacidad máxima de operación del alimentador. Pero disminuye el margen de seguridad del sistema ante nuevos aumentos de demanda o contingencias imprevistas.

En este caso, la capacidad del alimentador está limitada por la capacidad de las otras fuentes de generación y compensación disponibles, lo que refuerza la necesidad de analizar escenarios contingentes y estrategias complementarias de operación en los capítulos siguientes [15].

4.5. Análisis e interpretación de los resultados del escenario 5

4.5.1. Resumen cuantitativo

Tabla 4.5: Escenario 5 – Condiciones normales con grandes consumidores y solo generación SFV

Magnitud	Parámetro	Unidad	Límite normativo	Resultado	Evaluación
Voltaje	Máximo	p.u.	$\leq 1,05$	0.995	Cumple
	Mínimo	p.u.	$\geq 0,95$	0.940	No cumple
Potencia activa	Total demandada	MW	3-5 (ideal) / 10 (máx.)	22.027	V. característico
Potencia reactiva	Total	MVAr	–	5.086	–
Frecuencia	Máxima	Hz	$< 60,5$	60	Cumple
	Mínima	Hz	$\geq 59,5$	60	Cumple
Cargabilidad	Transformadores	%	≤ 100 (≤ 120 emerg.)	145.37 / 106.61	Cumple
Cargabilidad	Líneas	%	≤ 100 (≤ 120 emerg.)	107.65 / 71.77	Cumple
Pérdidas activas	Totales	MW	$\leq 5\%$ potencia demandada	0.489	Cumple
Pérdidas reactivas	Totales	MVAr	–	0.820	–
Pérdidas totales	Porcentaje	%	$\leq 5\%$	2.22	Cumple
Factor de potencia	Esperado	–	$\geq 0,94$	0.974	Cumple

4.5.2. Cumplimiento de límites operativos

En el Escenario 5 4.5, el sistema satisface los límites operativos en las horas en que se tiene generación solar fotovoltaica, al mantener los voltajes dentro de los límites permisibles y el alimentador opera en condiciones estables [17]. Pero en las tardes, cuando la generación solar cae en picado, el sistema se enfrenta a su peor momento, con poco margen de voltaje y más estrés en los componentes pasivos. Aunque no se aprecian violaciones térmicas inmediatas, la dependencia total de la generación solar fotovoltaica en ciertos periodos compromete la robustez operativa del alimentador en esta condición [2, 15].

4.5.3. Interpretación técnica de resultados

La operación con generación solar fotovoltaica introduce una marcada variabilidad temporal en el balance de potencia del sistema. Durante las horas de sol, la solar ayuda a cubrir la demanda y se necesita menos potencia de la red. Sin embargo, cuando termina la generación solar, la potencia disponible cae en picado, pero la demanda del sistema sigue siendo alta. Esta descompensación resulta en un estado de estrés operativo, en el que el alimentador solo cuenta con los elementos pasivos y la fuente externa para satisfacer la carga. Como resultado, el voltaje en los nodos más distantes del alimentador se acerca a los límites inferiores permitidos y las corrientes se reorientan hacia líneas y transformadores, sobrecargando el sistema. Este comportamiento se ajusta a redes de distribución con alta penetración fotovoltaica sin respaldo energético o almacenamiento [16].

4.5.4. Implicación para la capacidad máxima de operación

El Escenario 5 muestra que la generación solar fotovoltaica sin respaldo no asegura por sí sola la capacidad máxima segura de operación del alimentador. La situación crítica observada en horas de la tarde muestra que la capacidad de operación del sistema se ve seriamente comprometida por la variabilidad de la fuente solar y por la no coincidencia entre generación y demanda. Estos resultados muestran que para aumentar la capacidad máxima de operación en escenarios de alta penetración fotovoltaica se requieren estrategias complementarias como almacenamiento, gestión de demanda o cargas interrumpibles, las cuales se exploran en los casos posteriores [15].

4.6. Análisis e interpretación de los resultados del escenario 6

4.6.1. Resumen cuantitativo

Tabla 4.6: Resumen de resultados del Escenario 6 – Condiciones normales con gestión de la demanda

Magnitud	Parámetro	Unidad	Límite normativo	Resultado	Evaluación
Voltaje	Máximo	p.u.	$\leq 1,05$	0.999	Cumple
	Mínimo	p.u.	$\geq 0,95$	0.971	Cumple
Potencia activa	Total demandada	MW	3-5 (ideal) / 10 (máx.)	6.811	V. Característico
Potencia reactiva	Total	MVAr	–	0.676	–
Frecuencia	Máxima	Hz	$< 60,5$	60	Cumple
	Mínima	Hz	$\geq 59,5$	60	Cumple
Cargabilidad	Transformadores	%	≤ 100 (≤ 120 emerg.)	79.48 / 58.28	Cumple
Cargabilidad	Líneas	%	≤ 100 (≤ 120 emerg.)	71.46 / 47.64	Cumple
Pérdidas activas	Totales	MW	$\leq 5\%$ potencia demandada	0.206	Cumple
Pérdidas reactivas	Totales	MVAr	–	0.475	–
Pérdidas totales	Porcentaje	%	$\leq 5\%$	3.02	Cumple
Factor de potencia	Esperado	–	$\geq 0,94$	0.995	Cumple

4.6.2. Cumplimiento de límites operativos

En el Escenario 6 4.6, el sistema satisface los límites operativos para voltaje, frecuencia y cargabilidad del alimentador. Estrategias de gestión de demanda pueden sostener perfiles de voltaje dentro de límites aceptables en todo el sistema, sin mostrar puntos críticos en los nodos más remotos [17]. Además, no se observan violaciones térmicas en líneas ni en transformadores, lo que indica que el sistema se encuentra dentro de límites aceptables bajo este escenario de operación [2, 15].

4.6.3. Interpretación técnica de resultados

La gestión de la demanda altera los perfiles de carga en el tiempo, disminuyendo y desplazando parte del consumo en las horas de máxima demanda. Esta adaptación se traduce en suavizar el perfil de potencia del sistema y en cargar más uniformemente el alimentador durante el día. Como resultado, el voltaje se vuelve más uniforme y las corrientes se distribuyen entre los elementos del sistema. Este comportamiento demuestra que la gestión de demanda es una solución para reducir el estrés operativo del alimentador, sin modificar la infraestructura física ni la potencia instalada. La respuesta obtenida se ajusta a la forma en que operan las redes de distribución con flexibilidad en el lado de la demanda [16].

4.6.4. Implicación para la capacidad máxima de operación

En el Escenario 6 se muestra que la aplicación de estrategias de gestión de demanda puede aumentar el margen operativo del alimentador, disminuyendo sus cargas pico y mejorando su desempeño. En este marco, la máxima capacidad de operación no está restringida por violaciones de voltaje o sobrecargas térmicas, verificándose que la gestión de demanda es una solución para mejorar la utilización de la infraestructura existente.

Estos resultados hacen que la gestión de demanda sea una estrategia esencial para respaldar la operación segura del alimentador en condiciones exigentes y complementar otras soluciones analizadas, como las cargas interrumpibles [15].

4.7. Análisis e interpretación de los resultados del escenario 7

4.7.1. Resumen cuantitativo

Tabla 4.7: Resumen de resultados del Escenario 7 – Condiciones normales con potencias interrumpibles

Magnitud	Parámetro	Unidad	Límite normativo	Resultado	Evaluación
Voltaje	Máximo	p.u.	$\leq 1,05$	0.998	Cumple
	Mínimo	p.u.	$\geq 0,95$	0.962	Cumple
Potencia activa	Total demandada	MW	3-5 (ideal) / 10 (máx.)	9.700	V. Característico
Potencia reactiva	Total	MVAr	–	2.478	–
Frecuencia	Máxima	Hz	$< 60,5$	60	Cumple
	Mínima	Hz	$\geq 59,5$	60	Cumple
Cargabilidad	Transformadores	%	≤ 100 (≤ 120 emerg.)	80.17 / 58.79	Cumple
Cargabilidad	Líneas	%	≤ 100 (≤ 120 emerg.)	97.22 / 64.81	Cumple
Pérdidas activas	Totales	MW	$\leq 5\%$ potencia demandada	0.278	Cumple
Pérdidas reactivas	Totales	MVAr	–	0.566	–
Pérdidas totales	Porcentaje	%	$\leq 5\%$	2.86	Cumple
Factor de potencia	Esperado	–	$\geq 0,94$	0.969	Cumple

4.7.2. Cumplimiento de límites operativos

En el Escenario 7 4.7, el sistema satisface los límites operativos para voltaje y carga térmica. La aplicación de cargas interrumpibles garantiza perfiles de voltaje dentro de límites aceptables en todo el alimentador, sin mostrar puntos críticos en los nodos más lejanos [17]. Además, las corrientes en líneas, transformadores y grandes consumidores se mantienen en límites aceptables, lo que valida la seguridad de la operación en este esquema [2, 15].

4.7.3. Interpretación técnica de resultados

La desconexión controlada de cargas en momentos críticos disminuye directamente la potencia demandada al sistema, disminuyendo el estrés operativo del alimentador. Esta modificación permite una mejor distribución de los flujos de potencia y mejorar el comportamiento del voltaje en los extremos más alejados del punto de alimentación.

Desde el punto de vista operativo, las cargas interrumpibles actúan como un mecanismo de flexibilidad que permite adaptar la demanda a la capacidad disponible del sistema. Este comportamiento se ajusta a la forma en que operan las redes de distribución con esquemas de respuesta de la demanda para mejorar la estabilidad y confiabilidad del suministro [16].

4.7.4. Implicación para la capacidad máxima de operación

El Escenario 7 muestra que poner en funcionamiento cargas interrumpibles amplía el margen operativo del alimentador, lo cual posibilita el manejo de situaciones de alta demanda sin poner en riesgo los límites de voltaje ni la integridad térmica de las partes del sistema. Al disminuir la demanda durante los periodos más críticos, esta estrategia aumenta la capacidad máxima de operación sin que se necesiten inversiones extra en infraestructura. Las cargas que pueden ser interrumpidas se convierten, en este marco, en un instrumento esencial para que el alimentador funcione de manera segura en circunstancias difíciles. Se trata de una herramienta que complementa directamente las estrategias de gestión de demanda y mitiga las restricciones detectadas en contextos con fuerte dependencia a la generación intermitente [15].

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

El presente trabajo permitió evaluar de forma detallada la capacidad de operación de un alimentador primario de distribución mediante simulaciones en OpenDSS, considerando múltiples escenarios operativos que incluyen condiciones normales, presencia y ausencia de generación distribuida, grandes consumidores, gestión de la demanda y cargas interrumpibles. El enfoque basado en simulaciones cuasi-dinámicas con resolución de 15 minutos permitió capturar adecuadamente la variabilidad temporal de la demanda y la generación, lo cual resulta fundamental para el análisis realista de redes de distribución modernas.

Los resultados obtenidos demuestran que, bajo condiciones normales de operación, el sistema cumple con los límites normativos de voltaje y frecuencia establecidos por la regulación vigente, manteniendo perfiles de tensión dentro del rango permitido y niveles de cargabilidad aceptables en líneas y transformadores. Esto valida la consistencia del modelo desarrollado y confirma que la red posee un margen operativo adecuado para su condición base.

La incorporación de generación distribuida evidenció un impacto positivo en el desempeño eléctrico del sistema, principalmente en la reducción de pérdidas técnicas, la mejora del perfil de voltaje y la disminución de las corrientes circulantes en los tramos más cargados del alimentador. Asimismo, se observó que la generación localizada cerca de los centros de consumo permite aliviar la cargabilidad de los transformadores y líneas aguas arriba, incrementando la capacidad efectiva de operación del sistema sin necesidad de refuerzos inmediatos en la infraestructura.

El análisis de escenarios sin determinadas fuentes de generación (hidroeléctrica o térmica) mostró que el sistema mantiene su estabilidad operativa, siempre que exista suficiente respaldo energético desde la red principal. No obstante, estas condiciones incrementan la demanda neta, las corrientes de línea y las pérdidas, lo que reduce el margen de operación y evidencia la importancia de la diversificación de fuentes de generación distribuida para mejorar la robustez del sistema.

La aplicación de estrategias de gestión de la demanda permitió reducir los picos

de consumo durante las horas críticas, logrando una operación más equilibrada del alimentador. Sin embargo, se comprobó que la gestión de la demanda no elimina completamente las condiciones de estrés del sistema, sino que redistribuye la carga en el tiempo, por lo que su efectividad depende de una correcta selección de cargas gestionables y de la magnitud de la reducción aplicada.

En el escenario con cargas interrumpibles, se evidenció una mejora adicional en la operación del sistema durante la hora pico, reflejada en menores pérdidas, reducción de corrientes máximas y mejora del factor de potencia. Esto demuestra que la flexibilidad de los grandes consumidores constituye una herramienta clave para aumentar la capacidad operativa del sistema y reducir la necesidad de inversiones en refuerzos de red.

Finalmente, el análisis integral de todos los escenarios permitió identificar los elementos críticos del sistema, tales como líneas y transformadores con mayor nivel de cargabilidad y nodos con mayores caídas de tensión. Esta información resulta esencial para la planificación y toma de decisiones, ya que permite definir estrategias técnicas orientadas a garantizar una operación segura, eficiente y conforme a la normativa vigente.

5.2. Recomendaciones

Las siguientes sugerencias técnicas, con el objetivo de optimizar la operación y expansión del sistema de distribución, se basan en los resultados del análisis de los diversos escenarios operativos alimentador primario, aconseja que en optimizar los perfiles de tensión y ampliar la capacidad operativa del alimentador sin que sea necesario invertir en refuerzos de red a corto plazo. Se aconseja acompañar la integración de generación distribuida con sistemas de control de carga que produzcan nuevos puntos de tensión en otros momentos del día. Se aconseja tener en cuenta las cargas interrumpibles como un recurso operativo en el sistema de distribución, sobre todo en alimentadores con una notable penetración de consumidores grandes. Si se aplica selectivamente en situaciones críticas, puede aumentar de manera importante la flexibilidad del sistema y optimizar los márgenes de operación en contextos de alta demanda o contingencia. recomendado para trabajos posteriores aumentar el análisis añadiendo estudios de contingencia más rigurosos, los estudios de planificación y operación alimentadores primarios se incluyan simulaciones cuasi-dinámicas con una resolución temporal apropiada (15 minutos o menos), como se hizo en este trabajo. tipo de análisis posibilita detectar circunstancias críticas que no se observan en investigaciones estáticas y ofrece una visión más realista acerca del funcionamiento del sistema frente a fluctuaciones horarias en la demanda y generación. Es recomendable promover la integración de generación distribuida en forma planifi-

cada y estratégicamente posicionada, dando prioridad a los nodos que tienen una demanda elevada o que enfrentan dificultades con la caída de tensión. La generación distribuida, sobre todo lo renovable, ha demostrado ser un instrumento útil para disminuir las pérdidas técnicas, factor de potencia y compensación reactiva, como los bancos de capacitores o los inversores que pueden controlar la potencia reactiva. Esto posibilitaría optimizar el rendimiento del sistema, disminuir las pérdidas reactivas y conservar los niveles de tensión dentro de los márgenes normativos en todas las circunstancias estudiadas. En lo que respecta a la administración de la demanda, se recomienda que la ejecución de programas para responder a la demanda, dirigidos hacia grandes consumidores y cargas no críticas, tenga prioridad. Los resultados indican que estas estrategias posibilitan que se recorten los picos de carga y se optimice el funcionamiento del sistema en horas críticas, a pesar de que deben ser diseñados con esmero para prevenir traslados de como la salida simultánea de componentes críticos, fluctuaciones extremas en la demanda y situaciones con una gran penetración de generación distribuida. evaluación más exhaustiva de la resiliencia del sistema y formulación de tácticas operativas ante acontecimientos extremos. Por último, se aconseja emplear instrumentos de análisis avanzados y disminuir los errores de análisis manual y posibilitaría la reproducción sencilla del estudio en otros alimentadores del sistema de distribución.

Se sugiere a la Carrera de Electricidad fortalecer la orientación práctica-aplicada en el estudio y diseño de sistemas eléctricos de potencia, integrando de manera regular el uso de herramientas de simulación especializadas (como OpenDSS) en proyectos académicos y de titulación. Como se evidencia en la tesis, el estudio de caso de alimentadores de distribución en distintos escenarios de operación permite conocer en profundidad el comportamiento real de las redes eléctricas y sus restricciones. Además, es recomendable fomentar líneas de investigación para la integración de generación distribuida, gestión de la demanda y operación eficiente de redes de distribución, las cuales hoy en día son relevantes para la transición energética. Formar profesionales capacitados en la planificación, análisis y operación de sistemas eléctricos actuales y futuros, para que la carrera pueda dar respuesta a las necesidades del sector eléctrico nacional. Finalmente, es aconsejable promover memorias de título que integren teoría, simulación y análisis normativo, para que los estudiantes desarrollen habilidades técnicas y criterio profesional para la toma de decisiones en sistemas eléctricos reales.

Desde lo académico, esta tesis es un aporte explícito a aspectos técnicos de la Carrera de Electricidad, específicamente a Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP). El estudio de flujos de potencia, perfiles de tensión, pérdidas técnicas, cargabilidad de líneas y transformadores, análisis de casos contingentes refuerza la teoría de la asignatura. Además, el estudio proporciona información aplicable a materias como

Confiabilidad y Protecciones Eléctricas, al demostrar la interacción entre carga, generación y red y la necesidad de cumplir con límites operativos y regulatorios. Las simulaciones comparativas permiten al estudiante apreciar cómo cambios mínimos en la configuración del sistema pueden alterar radicalmente su rendimiento.

Es aconsejable que este tipo de estudios se utilice como material de apoyo docente, ya que permite comprender fenómenos complejos del sistema eléctrico y acercar al estudiante a problemas reales que enfrentan los operadores de red.

Metodológica-mente, el enfoque utilizado en esta tesis puede servir de guía para futuras investigaciones en el campo eléctrico. La metodología que propone la definición de un modelo base verificado, la simulación de diferentes escenarios operativos y el análisis comparativo de los resultados permite extraer conclusiones robustas, coherentes y técnicamente justificadas.

Las simulaciones horarias con resolución de 15 minutos, así como la exportación y manipulación de datos en archivos `.csv`, permiten analizar en detalle el comportamiento dinámico del sistema y mejorar la trazabilidad de los resultados. Este método desarrolla habilidades analíticas y anima a interpretar los datos más allá de los números.

Finalmente, es recomendable complementar esta metodología con futuras investigaciones que involucren análisis dinámicos más complejos, o incluso validaciones con datos reales de campo, lo cual ampliaría el alcance de los resultados y fortalecería aún más la calidad técnica de los trabajos de titulación.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] E. Cantillo and C. Rosero, “Caracterización de redes de distribución en media tensión para estudios de cargabilidad,” *Revista Técnica Energía y Desarrollo*, vol. 8, no. 1, 2019.
- [2] W. H. Kersting, *Distribution System Modeling and Analysis*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2002.
- [3] W. H. Kersting, *Distribution System Modeling and Analysis*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2002.
- [4] A. Ardila and J. Valencia, “Modelado de alimentadores de distribución en opendss para estudios de flujo de potencia y calidad de energía,” *Revista Iberoamericana de Ingeniería Eléctrica*, vol. 13, no. 2, pp. 45–54, 2020.
- [5] Electric Power Research Institute (EPRI), *OpenDSS Manual – Electric Power Distribution System Simulator*. EPRI, Palo Alto, CA, USA, 2023. Versión 9.6. Disponible en:
[urlhttps://smartgrid.epri.com/SimulationTool.aspx](https://smartgrid.epri.com/SimulationTool.aspx).
- [6] P. A. N. Garcia and K. Hopkinson, “Dss-extensions: Tools for automated modeling and data processing in opendss.” GitHub repository, 2022. Disponible en: <https://github.com/dss-extensions>.
- [7] Electric Power Research Institute (EPRI), *OpenDSS Electric Power Distribution System Simulator Guide*. Palo Alto, CA, USA: EPRI, 2012.
- [8] Agencia de Regulación y Control de Electricidad (ARCONEL), “Resolución arconel 1547/18 – reglamento del servicio público de energía eléctrica,” 2018. Norma nacional.
- [9] “Ieee recommended practice for monitoring electric power quality,” 2019.
- [10] O. D. Montoya, C. A. García, and L. F. Grisales-Noreña, “A general analysis of power distribution systems using opendss,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 17, no. 05, pp. 852–859, 2019.

- [11] Coronel Gabriel, Naranjo Danny, “Anteproyecto del Trabajo de Titulación: Determinación de la capacidad máxima de operación de un alimentador primario mediante simulaciones en OpenDSS,” 2025. Documento base del proyecto de titulación y fuente de datos operativos del alimentador.
- [12] Electric Power Research Institute (EPRI), *OpenDSS User Manual*. EPRI, 2023.
- [13] J. J. Grainger and W. D. Stevenson, *Power System Analysis*. McGraw-Hill, 1994.
- [14] ARCERNNR, “Regulación No. ARCERNNR-003-21: Grandes Consumidores en Media Tensión,” 2021.
- [15] Electric Power Research Institute (EPRI), *OpenDSS User Manual*. Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, USA, 2023.
- [16] J. J. Grainger and W. D. Stevenson, *Power System Analysis*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1994.
- [17] “IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces,” 2018. Revision of IEEE Std 1547-2003.

Áreas del Trabajo de Grado (ABET)

Tabla 1: Áreas del Trabajo de Grado

Título del Trabajo:	DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD MÁXIMA DE OPERACIÓN DE UN ALIMENTADOR..	
Restricciones múltiples (dos o más)	Accesibilidad	Estética
	Códigos	Construtibilidad
	Costos	Ergonomía
	Extensibilidad	Funcionalidad
	Interoperabilidad	Consideraciones Legales
	Mantenibilidad	Manufacturabilidad
	Mercadeo	Política
	Regulaciones	■ Cronogramas
	Normativas	■ Sostenibilidad
	Impacto Ambiental	Impacto Social
	Usabilidad	Otros:
Normas relevantes (dos o más)	ARCERNR-034/2023	
	ARCERNR-006/2021	
Elementos del proceso	Identificación de oportunidades	Generación de soluciones múltiples
	Desarrollo de requerimientos	Evaluación de soluciones
	Procesos iterativos	■ Consideración de riesgos
	Realizar compromisos o tratos	
Basado en trabajos anteriores	Protecciones	Iluminación
	Optimización de sistemas	■ Alta Tensión
	Energías alternativas	■ Distribución
	Máquinas eléctricas	Otros temas

SO2

Aspectos relacionados con Salud Pública y Medio Ambiente:

Aspectos relacionados con Salud Pública y Medio Ambiente

El análisis del alimentador de distribución en diferentes entornos operativos, en el marco del presente trabajo de titulación, posibilita la evaluación indirecta de los efectos que tiene el sistema eléctrico sobre la salud pública y el medio ambiente, a partir del comportamiento técnico del sistema bajo distintos escenarios de carga y generación. En particular, al considerar la incorporación de generación distribuida renovable, como centrales hidroeléctricas y sistemas solares fotovoltaicos, se evidencia una reducción de la demanda de energía proveniente de fuentes convencionales, aspecto analizado en los Escenarios 2 y 5 del Capítulo 3, lo cual contribuye a disminuir las emisiones globales de gases contaminantes asociadas a la generación eléctrica tradicional.

Los resultados simulados en régimen cuasi-dinámico en OpenDSS muestran que la presencia de generación distribuida mejora los perfiles de tensión y disminuye las pérdidas técnicas del alimentador, como se muestra en los escenarios 2, 3 y 5 (secciones 3.2, 3.3 y 3.5). Esta mayor eficiencia energética del sistema evita tener que poner en marcha generación adicional en centrales térmicas en horas punta, las más contaminantes en términos de emisiones de dióxido de carbono (CO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x) y material particulado, con los beneficios indirectos sobre la calidad del aire y la salud humana que ello implica.

Además, las medidas de gestión de la demanda y las cargas interrumpibles suavizan la curva de carga en las horas punta, reduciendo el estrés operativo del sistema y previniendo sobrecargas en líneas y transformadores. Este comportamiento se analiza en los Escenarios 6 y 7 (Secciones 3.6 y 3.7), donde se evidencia una mejora en los márgenes operativos y en la continuidad del servicio eléctrico. Un suministro más fiable de energía es especialmente importante para los sectores sensibles, como hospitales, áreas residenciales y escuelas, donde la calidad del suministro eléctrico es una cuestión de bienestar.

Aspectos relacionados con Seguridad de Personas y Bienes:

Desde la perspectiva de la seguridad eléctrica, en este trabajo de titulación se analiza el comportamiento del alimentador primario en diferentes condiciones de operación, en busca de puntos que puedan poner en riesgo la seguridad de las personas y equipos conectados al sistema. El análisis de variables como tensiones, corrientes y cargabilidad de líneas y transformadores, definido en la Sección 2.4 y aplicado en el Capítulo 3, permite verificar el cumplimiento de los límites operativos establecidos

para una operación segura del sistema de distribución. Los resultados indican que, en condiciones de alta penetración de carga o de generación distribuida, el alimentador puede estar operando cerca de sus límites térmicos o de regulación de tensión. Esto se nota en los Escenarios 2 y 3 (Secciones 3.2 y 3.3), en los que se observan aumentos de corrientes y cambios de tensión en puntos críticos. La identificación temprana de estos puntos es fundamental para prevenir riesgos asociados al sobrecalentamiento de conductores, fallas en transformadores y deterioro del aislamiento, eventos que podrían derivar en incendios, daños a equipos eléctricos o interrupciones del servicio. Además, la simulación de casos operativos sin generación hidroeléctrica y con estrategias de gestión de la demanda muestra que el alimentador puede permanecer en condiciones seguras de operación si se respetan los criterios de diseño y los límites técnicos establecidos en el Marco Teórico. En particular, los Escenarios 3 y 6 (Secciones 3.3 y 3.6) evidencian que una adecuada planificación operativa y el uso de herramientas de simulación como OpenDSS permiten evaluar preventivamente el comportamiento del sistema y garantizar la seguridad del suministro eléctrico y de los usuarios conectados al alimentador.

Aspectos relacionados con el bienestar de la población:

El bienestar de la gente depende de un suministro eléctrico de calidad y continuo. En esta tesis de grado, el estudio del alimentador primario en siete escenarios operativos distintos permite verificar la capacidad del sistema para satisfacer la demanda en condiciones normales, extremas y de contingencia. Este análisis, desarrollado en el Capítulo 3, verifica que el alimentador mantiene niveles adecuados de tensión y pérdidas técnicas dentro de los límites establecidos, conforme a los criterios definidos en la Sección 2.4. La inclusión de grandes consumidores y de generación distribuida, junto con la aplicación de estrategias de gestión de la demanda, contribuye a un uso más eficiente de la infraestructura eléctrica existente. Estos factores se estudian en los Escenarios 2, 5 y 6 (Secciones 3.2, 3.5 y 3.6), en los que se observa una mejora en los perfiles de tensión, se disminuyen las pérdidas técnicas y se consigue un sistema más balanceado. Como resultado, la fiabilidad del suministro eléctrico se refuerza, disminuye la probabilidad de cortes y mejora la calidad de la energía que reciben los usuarios.

Asimismo, la optimización de la operación del alimentador y la mitigación de sobrecargas durante las horas pico, observadas en los Escenarios 6 y 7 (Secciones 3.6 y 3.7), disminuyen la probabilidad de fallas generalizadas en el sistema de distribución. Esta mayor resiliencia operativa del alimentador fortalece la continuidad del servicio eléctrico y mejora la imagen del sistema ante la población, con beneficios en las actividades económicas, industriales y domiciliarias del área de estudio.

Factores Globales:

El trabajo se suma a las tendencias mundiales de modernización de las redes de distribución eléctrica, con mayor penetración de generación distribuida, gestión activa de la demanda y herramientas avanzadas de simulación. En ese sentido, el análisis usando OpenDSS, como se explica en el Capítulo 2 y se usa en todo el Capítulo 3, se ajusta a la filosofía de las redes eléctricas inteligentes, al analizar en detalle el comportamiento del alimentador en diferentes escenarios de operación. La comparación de escenarios con y sin generación distribuida determina el nivel de dependencia del alimentador a fuentes centralizadas y su capacidad de funcionar flexiblemente y de manera sostenible. Este estudio se lleva a cabo en los Escenarios 2, 3, 4 y 5 (Secciones 3.2 a 3.5), analizando el efecto de la conexión y desconexión de distintas fuentes de generación en variables como tensión, pérdidas técnicas y flujos de potencia, las cuales impactan directamente en los objetivos globales de eficiencia energética y reducción de emisiones. Así, aunque el estudio se focaliza en un alimentador específico del sistema de distribución, la metodología y los resultados obtenidos, descritos en los Capítulos 3 y 4, pueden ser extrapolables a otros sistemas de distribución que enfrenten problemas similares. Lo anterior transforma el presente en una propuesta técnica adaptable a cualquier realidad regional y mundial, en sintonía con las actuales tendencias de planificación, operación y modernización de redes eléctricas de distribución.

Factores Culturales:

Para efectos de este trabajo de titulación, los factores culturales se refieren a la aceptación y adopción de nuevas maneras de operar el sistema eléctrico, como la penetración de generación distribuida y estrategias de gestión de la demanda. Estas maneras de funcionar, descritas en el Capítulo 2 y valoradas en los Escenarios 2, 5 y 6 del Capítulo 3, suponen un cambio con respecto a la manera clásica de pensar las redes de distribución, pasando de ser elementos pasivos a sistemas activos, controlados y adaptables en tiempo real. Los resultados obtenidos en los escenarios con grandes consumidores y cargas interrumpibles muestran que la participación de estos usuarios mejora el desempeño del alimentador. Este comportamiento se observa en los resultados de los Escenarios 2 y 7 (Secciones 3.2 y 3.7), donde se registran mejoras en los perfiles de tensión, reducción de sobrecargas y un uso más eficiente de la infraestructura existente. No obstante, la implementación efectiva de estas estrategias requiere el desarrollo de una cultura energética orientada a la eficiencia, la planificación y la cooperación entre el operador de red y los usuarios finales. La tesis reconoce que la falta de conocimiento técnico o la resistencia al cambio por parte de ciertos actores podría limitar la aplicación práctica de las estrategias analizadas.

Esto emana de la naturaleza práctica y analítica del estudio, que prueba (a través de los resultados mostrados en los Capítulos 3 y 4) que la capacitación técnica y la divulgación de los beneficios de una operación más flexible del sistema eléctrico son factores determinantes para la implementación de estos esquemas en sistemas reales de distribución.

Factores Sociales:

Desde el punto de vista social, el estudio del alimentador desarrollado en esta tesis permite analizar cómo diferentes configuraciones de operación del sistema afectan la justicia y calidad del suministro eléctrico. En particular, la incorporación de grandes consumidores y generación distribuida, analizada en el Escenario 2 del Capítulo 3, demuestra beneficios técnicos en términos de mejora de perfiles de tensión y reducción de pérdidas técnicas, pero crea nuevos retos en cuanto a la justa distribución de responsabilidades y beneficios en la red de distribución.

Estrategias de gestión de la demanda y cargas interrumpibles, estudiadas en los Escenarios 6 y 7 (Secciones 3.6 y 3.7), son mecanismos para mejorar la eficiencia del sistema en su conjunto y aumentar los márgenes operativos del alimentador. Estos esquemas permiten que ciertos usuarios contribuyan a la estabilidad del sistema eléctrico, creando beneficios técnicos para todos los usuarios conectados al alimentador.

Sin embargo, el estudio también reconoce que una aplicación inadecuada de estas estrategias puede crear sentimientos de injusticia entre los usuarios del sistema. Esta conclusión emana del carácter técnico-operativo del estudio y de los resultados mostrados en los Capítulos 3 y 4, que demuestran cómo la aplicación de esquemas de flexibilidad de carga y gestión de la demanda deben ser aplicados bajo criterios transparentes y justos para asegurar beneficios sociales sustentables para toda la población servida por el alimentador.

Factores Ambientales

El estudio técnico de esta tesis prueba que la penetración de generación distribuida renovable mejora las pérdidas técnicas y los perfiles de tensión del alimentador. Esto se nota en los Escenarios 2 y 5 del Capítulo 3, en los cuales se hace un uso más eficiente de la energía eléctrica y, por lo tanto, se desperdicia menos energía relacionada con la operación del sistema de distribución.

Al comparar los escenarios con y sin generación hidroeléctrica o solar fotovoltaica, se puede evaluar el impacto positivo de estas fuentes sobre la operación del alimentador. Tal como se muestra en los Escenarios 3, 4 y 5 (Secciones 3.3 a 3.5), cuanto más dependa de fuentes centralizadas en ausencia de generación renovable

local, más vulnerable será. La presencia de generación distribuida disminuye la necesidad de nueva generación en los niveles altos de la red, con una contribución indirecta a la reducción de emisiones contaminantes y al cumplimiento de metas ambientales del sector eléctrico.

Así mismo, la aplicación de estrategias de gestión de la demanda, analizadas en el Escenario 6 (Sección 3.6), permite desplazar o reducir el consumo eléctrico durante las horas de mayor exigencia del sistema. Este comportamiento previene sobrecargas y minimiza expansiones innecesarias de la red eléctrica, un beneficio ambiental adicional por la disminución en el uso de materiales, recursos y energía para expandir el sistema de distribución.

Factores Económicos:

Económicamente, este trabajo de titulación demuestra que un mejor desempeño del alimentador, al integrarse generación distribuida y aplicarse estrategias de gestión de la demanda, se reducen pérdidas técnicas y se aprovecha mejor la infraestructura instalada. Esto se nota en los Escenarios 2, 5 y 6 del Capítulo 3, en los que la mejora en la eficiencia del sistema impacta indirectamente en la disminución de los costos por pérdidas de energía y por postergación de refuerzos en la red. El análisis comparativo de los distintos escenarios operativos, presentado en la Sección 3.8 y analizado en el Capítulo 4, evidencia que la adecuada integración de grandes consumidores y de fuentes de generación distribuida puede mejorar la eficiencia económica del sistema de distribución, siempre que se respeten los límites operativos de tensión, corriente y cargabilidad definidos en la Sección 2.4. Esto permite maximizar el aprovechamiento de la capacidad existente del alimentador sin incurrir en sobrecostos asociados a condiciones de operación inseguras. En ese contexto, los hallazgos de este estudio proporcionan información técnica para la toma de decisiones de operadores de red y planificadores del sistema eléctrico. La determinación de configuraciones de operación que mejoren la eficiencia total del alimentador sin afectar la seguridad y calidad del suministro es información que sirve de base para la planificación y optimización económica de redes de distribución, en concordancia con los análisis de los Capítulos 3 y 4.