

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



TEMA:

“DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD DE ALOJAMIENTO EN EL ALIMENTADOR EL CHOTA I, CONSIDERANDO LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA EXISTENTE Y SU IMPACTO EN LAS PÉRDIDAS DE POTENCIA Y ENERGÍA.”

Trabajo de Grado previo a la obtención del título de Ingeniero (a) Eléctrico (a)

Línea de investigación: Biotecnología, energía y recursos renovables

AUTOR:

Kevin Alexander Morales Limaico

DIRECTOR:

Ing. Omar Darío Chacón Herrera

Ibarra-Ecuador 2026



AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1004724926		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Morales Limaico Kevin Alexander		
DIRECCIÓN:	Rocafuerte y Simón Bolívar		
EMAIL:	kamoralesl@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:		TELÉFONO MÓVIL:	0986231127

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Determinación de la capacidad de alojamiento en el alimentador El Chota I, considerando la generación distribuida existente y su impacto en las pérdidas de potencia y energía.
AUTOR (ES):	Morales Limaico Kevin Alexander
FECHA DE APROBACIÓN: DD/MM/AAAA	30/03/2026
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero(a) Eléctrico(a)
ASESOR /DIRECTOR:	Ing. Omar Darío Chacón Herrera MSc. Ing. Ramiro Mauricio Vásquez Villarruel MSc.

2. CONSTANCIAS

El autor (es) manifiesta (n) que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 31 días del mes de marzo de 2026

EL AUTOR:



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



**CERTIFICADO DEL DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN
CURRICULAR**

Yo, Chacón Herrera Omar Darío en calidad de director del Sr. estudiante Morales Limaico Kevin Alexander, certifico que ha culminado con las normas establecidas en la elaboración del Trabajo de Integración Curricular con el tema: “DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD DE ALOJAMIENTO EN EL ALIMENTADOR EL CHOTA I, CONSIDERANDO LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA EXISTENTE Y SU IMPACTO EN LAS PÉRDIDAS DE POTENCIA Y ENERGÍA.”

Para la obtención del título de Ingeniero Eléctrico, aprobado la defensa, impresión y empastado.

.....

Ing. Chacón Herrera Omar Darío MSc.

DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



DEDICATORIAS

Dedico este logro a quienes me enseñaron que la educación es la herramienta más poderosa para transformar la realidad. A mis seres queridos, por su paciencia infinita y por acompañarme en la búsqueda constante del conocimiento y la excelencia profesional.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



AGRADECIMIENTOS

Deseo manifestar mi sincero agradecimiento al Msc. Omar Chacón, tutor de este trabajo, cuya paciencia y dedicación fueron pilares esenciales en mi formación y en el desarrollo de este proyecto. De igual manera, agradezco al Msc. Ramiro Vásquez, por su acertada asesoría y por compartir sus conocimientos en favor de la mejora de este estudio.

A mis amigos Johan Salazar y Josué Tates, por ser compañeros incansables en este viaje. Con ustedes no solo compartí las aulas, sino la construcción de proyectos, la superación de desafíos y esas alegrías compartidas que ahora se convierten en recuerdos imborrables; gracias por la lealtad y por estar presente en cada paso de mi formación.

A Daniel Angamarca, Anthony Quezada e Ian Naranjo, cuya amistad ha sido un pilar fundamental. Gracias por su apoyo incondicional, por la colaboración constante en los momentos de mayor presión y por hacer que las dificultades del camino se volvieran más ligeras. Su compañía transformó la vida universitaria en una etapa de verdadera fraternidad y aprendizaje mutuo que trascendió lo académico.

Finalmente, extendiendo mi gratitud a todas aquellas personas que, de una u otra manera, depositaron su confianza en mí. A quienes, con una palabra de aliento, un consejo oportuno o un gesto de apoyo silencioso, me brindaron la motivación necesaria para mantenerme firme y cumplir con determinación esta importante meta profesional.



INDICE DE CONTENIDOS

CAPITULO I.....	13
INTRODUCCIÓN.....	13
1.1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	13
1.1.1 PROBLEMÁTICA A INVESTIGACIÓN.....	13
1.1.1 FORMULACIÓN DE LA PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.....	14
1.2 OBJETIVOS.....	15
1.2.1 OBJETIVO GENERAL.....	15
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
1.3 ALCANCE Y DELIMITACIÓN.....	15
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	16
CAPÍTULO II.....	18
MARCO TEÓRICO.....	18
2.1 CAPACIDAD DE ALOJAMIENTO.....	18
2.1.1 CONCEPTO.....	18
2.1.2 FACTORES DETERMINANTES.....	21
2.1.3 RELACIÓN CON LAS PÉRDIDAS.....	21
2.1.4 MECANISMOS DE INFLUENCIA:.....	22
2.1.5 METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS:.....	22
2.2 GENERACIÓN DISTRIBUIDA (GD) EN REDES DE DISTRIBUCIÓN.....	23
2.2.1 INTEGRACIÓN DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA.....	23
2.2.2 TECNOLOGÍAS DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA.....	23
2.2.2.1 Generación fotovoltaica (FV).....	23
2.2.2.2 Generación hidroeléctrica.....	24
2.3 SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA.....	25



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



2.3.2. CONFIGURACIONES Y TOPOLOGÍAS DE REDES DE DISTRIBUCIÓN	26
2.3.3 SUBESTACIONES DE DISTRIBUCIÓN Y SU ROL EN LA CAPACIDAD DE ALOJAMIENTO	28
2.4 FUNDAMENTOS DE ENERGÍA ACTIVA Y REACTIVA EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN	28
2.4.1 POTENCIA ACTIVA	28
2.4.2 POTENCIA REACTIVA E IMPACTO EN EL PERFIL DE VOLTAJE	29
2.4.3 FACTOR DE POTENCIA Y POTENCIA APARENTE	29
2.5 AGENCIA DE REGULACIÓN Y CONTROL DE ELECTRICIDAD.....	29
2.5.1 ARCONEL 001/24:.....	30
2.5.2 ARCONEL 005/24:.....	31
2.5.3 ARCONEL 006/2024:.....	32
2.5.3.1 Artículo 6. Caracterización de una central de generación distribuida:	33
2.5.4 ARCONEL 009/24:.....	34
2.5.5 ATRIBUTOS DE CALIDAD	36
CAPÍTULO III	38
MATERIALES Y MÉTODOS.....	38
3.1 INTRODUCCIÓN.....	38
3.2 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	38
3.3 ENFOQUE Y TIPO DE INVESTIGACIÓN:	39
3.3.1 UBICACIÓN	39
3.4 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN MATERIALES, EQUIPOS Y SOFTWARE	40
3.4.1 SOFTWARE DE SIMULACIÓN Y ANÁLISIS TÉCNICO CYME	40
3.5 METODOLOGÍA.....	40
3.5.1 PROCEDIMIENTO	41



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



3.5.2 CRITERIOS NORMATIVOS PARA EL CÁLCULO DE LA CAPACIDAD DE ALOJAMIENTO	42
3.5.3 METODOLOGÍA DE CÁLCULO NORMALIZADO MEDIANTE SIMULACIÓN	44
3.5.4 ANÁLISIS DE PÉRDIDAS DE ENERGÍA MEDIANTE EL FLUJO DE CARGA CON PERFILES	46
3.5.5 ANÁLISIS DE PÉRDIDAS DE POTENCIA EN EL PUNTO DE GENERACIÓN MÁXIMA	46
3.5.6 IMPACTO EN PÉRDIDAS	47
CAPITULO IV	48
RESULTADOS Y ANÁLISIS	48
4.1 CARACTERÍSTICAS DEL ALIMENTADOR SIN GENERACIÓN DISTRIBUIDA.....	48
4.2 ANÁLISIS DEL ALIMENTADOR CON GENERACIÓN REAL	50
4.3 INTEGRACIÓN DE GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA.....	51
4.4 INTEGRACIÓN DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICA.....	53
4.5 ANÁLISIS DE RESPUESTA BAJO INYECCIÓN DE POTENCIA INSTANTÁNEA	56
4.6 DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD DE ALOJAMIENTO (HOSTING CAPACITY) DEL ALIMENTADOR EL CHOTA I.....	59
CONCLUSIONES.....	61
RECOMENDACIONES	62
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	63



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



INDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Curva de capacidad de alojamiento (Pérdidas de potencia y energía vs Generación distribuida). 19

Fig. 2. Sistema eléctrico de potencia (SEP) y sus partes. [17] 25

Fig. 3. Forma simple de un sistema de distribución tipo radial. [17] 26

Fig. 4. Sistema en anillo. [17] 27

Fig. 5. Sistema de doble alimentación. [17] 27

Fig. 6. Procedimiento representado por diagrama de bloques. 42

Fig. 7. Perfil de carga sin generación 49

Fig. 8. Ubicación de la cabecera del Alimentador “El Chota I” 49

Fig. 9. Ubicación de la generación hidroeléctrica 51

Fig. 10. Curvas de pérdidas de energía activa y reactiva en porcentaje y penetración de generación hidroeléctrica..... 52

Fig. 11. Ubicación de la generación fotovoltaica 54

Fig. 12. Curvas de pérdidas de energía activa y reactiva en porcentaje y penetración de generación hidroeléctrica y fotovoltaica..... 56



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



INDICE DE TABLAS

Tabla I	36
Tabla II	36
Tabla III	37
Tabla IV	51
Tabla V	54
Tabla VI	57
Tabla VII	58



RESUMEN

La integración de generación distribuida en redes de distribución rurales requiere un análisis del comportamiento de la red eléctrica frente a la incorporación de nuevas fuentes de energía; en este contexto, la presente investigación estudia la respuesta del alimentador El Chota I, perteneciente a la empresa EMELNORTE, ante el incremento de la penetración de potencia proveniente de recursos renovables. El propósito central de este estudio consiste en determinar la capacidad de alojamiento de la red mediante el análisis de la inyección de potencia activa y reactiva en relación con los flujos de carga con perfiles; para ello, se examinaron los límites de operación donde la estabilidad del sistema podría verse comprometida por flujos de potencia no previstos en el diseño original de la línea de distribución.

La metodología empleada se basó en el modelado y cálculo de flujos de carga en series temporales, utilizando datos reales de demanda y generación para capturar el comportamiento estacionario y dinámico del alimentador; este proceso incluyó la simulación de diversos niveles de inyección, desde el aporte de la central hidroeléctrica hasta la configuración de sistemas híbridos con generación fotovoltaica en nodos de carga.

Los resultados obtenidos revelan que el alimentador mantiene un desempeño técnico adecuado con una inyección combinada de hasta 2,0 MW, logrando reducir las pérdidas de potencia activa de un 15% a un 9,8% bajo condiciones de operación controladas; no obstante, al superar este umbral, el sistema manifiesta un incremento desmedido en la demanda de potencia reactiva.

Palabras clave:

Capacidad de alojamiento, generación distribuida, pérdidas de energía, flujo de potencia, estabilidad de voltaje.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



ABSTRACT

The integration of distributed generation in rural distribution networks requires an analysis of the electrical grid's behavior regarding the incorporation of new energy sources; in this context, the present research studies the response of the El Chota I feeder, belonging to the utility company EMELNORTE, to the increased penetration of power from renewable resources. The core purpose of this study is to determine the hosting capacity of the grid by analyzing active and reactive power injection in relation to load flows with profiles; for this purpose, the operating limits where system stability could be compromised by power flows not foreseen in the original design of the distribution line were examined.

The methodology employed was based on modeling and calculating time-series load flows, using real demand and generation data to capture the steady-state and dynamic behavior of the feeder; this process included the simulation of various injection levels, ranging from the contribution of the hydroelectric plant to the configuration of hybrid systems with photovoltaic generation at load nodes.

The results obtained reveal that the feeder maintains an adequate technical performance with a combined injection of up to 2.0 MW, succeeding in reducing active power losses from 15% to 9.8% under controlled operating conditions; however, upon exceeding this threshold, the system exhibits an excessive increase in reactive power demand.

Keywords: Hosting capacity, distributed generation, energy losses, power flow, voltage stability.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

Tema

Determinación de la capacidad de alojamiento en el alimentador el Chota I, considerando la generación distribuida existente y su impacto en las pérdidas de potencia y energía.

El problema

1.1 Problema de investigación.

1.1.1 Problemática a investigación.

El alimentador El Chota I enfrenta desafíos operativos derivados de la integración de generación distribuida renovable, principalmente solar e hidroeléctrica. Si bien estas fuentes aportan sostenibilidad energética, su operación en períodos de baja demanda genera flujos inversos de potencia que incrementan las pérdidas técnicas y provocan variaciones en los perfiles de voltaje. Estas condiciones afectan la estabilidad de la red, especialmente en escenarios donde la generación supera la demanda local, generando un desequilibrio entre la energía inyectada y la consumida.

Este comportamiento es crítico en redes rurales como el alimentador El Chota I, donde la interacción entre generación variable, demanda dispersa y restricciones operativas influye directamente en la estabilidad del sistema. La normativa ARCONEL 009/2024, aunque establece requisitos generales para la conexión de generación distribuida, no aborda evaluaciones específicas para redes con características como su topología única, perfiles de carga dinámicos y alta penetración renovable.

Ante este contexto, resulta prioritario desarrollar análisis que caractericen las pérdidas técnicas asociadas a la generación distribuida existente, enfocándose en cuantificar su magnitud y relación con la capacidad de alojamiento del sistema. Para ello, se evaluará cómo los flujos de potencia derivados de la generación solar e hidroeléctrica interactúan con los perfiles de demanda.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



1.1.1 Formulación de la pregunta de investigación.

¿Cuál es la capacidad de alojamiento de generación distribuida en el alimentador El Chota I, considerando su impacto en las pérdidas de potencia y energía bajo condiciones operativas reales?



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

- Determinar la capacidad de alojamiento de la generación distribuida actual en el alimentador El Chota I para la identificación de las pérdidas de potencia y energía, mediante un análisis que considere la interacción entre fuentes de generación distribuida, perfiles de demanda y restricciones operativas de la red.

1.2.2 Objetivos específicos

- Identificar la generación distribuida instalada y su impacto en las pérdidas actuales.
- Modelar la operación actual de la red mediante simulación de flujos de carga.
- Determinar la capacidad de alojamiento y las pérdidas en el alimentador.

1.3 Alcance y delimitación

El alcance de este trabajo se centra en analizar el comportamiento del alimentador el Chota I bajo la operación actual de generación distribuida renovable, principalmente solar e hidroeléctrica, con énfasis en su impacto sobre parámetros críticos como niveles de voltaje, pérdidas energéticas y capacidad de carga de la red. Este análisis es prioritario debido a los flujos inversos de potencia que surgen en períodos de baja demanda, generando un desbalance entre la energía inyectada y consumida, lo que incrementa las pérdidas técnicas y altera los perfiles de voltaje.

El proceso se fundamenta en información operativa real proporcionada por EMELNORTE, incluyendo perfiles horarios de generación solar e hidroeléctrica, patrones de consumo detallados y la topología completa del sistema. Mediante simulaciones en el software CYME, se recrearán condiciones operativas reales, desde escenarios normales hasta irregulares (como máxima generación con mínima demanda y viceversa), que considera para evaluar cómo la interacción entre la generación distribuida y la demanda variable influyen en la estabilidad del alimentador. El modelado facilitará



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



un análisis detallado de flujos de potencia, perfiles de voltaje y pérdidas energéticas, aprovechando las capacidades de esta herramienta para sistemas de distribución.

El marco normativo ARCONEL 009/2024 sirve como base para definir los criterios de evaluación, particularmente los rangos aceptables de voltaje y los límites máximos de carga. A través de los modelos desarrollados y análisis gráficos, se determinará la relación cuantitativa entre la capacidad de alojamiento de la generación distribuida existente y las pérdidas de potencia y energía, identificando puntos críticos donde los flujos inversos excedan los márgenes operativos apropiados.

Como parte fundamental del proceso, se generarán representaciones visuales que vinculen la producción energética distribuida con las pérdidas técnicas y las variaciones de voltaje en nodos estratégicos.

Estas herramientas facilitarán la comprensión de cómo el alimentador integra los recursos renovables sin comprometer su estabilidad. El enfoque se limita exclusivamente a caracterizar el comportamiento actual del sistema, considerando su perfil rural de bajo crecimiento y alta dependencia de generación renovable.

1.4 Justificación

La integración de generación distribuida en redes de distribución plantea un reto crítico para empresas como EMELNORTE, lo que requiere soluciones operativas avaladas por análisis exhaustivos. Este estudio se enfoca en un problema prioritario para la gestión del alimentador El Chota I: determinar su capacidad de alojamiento y evaluar cómo la generación distribuida existente impacta en las pérdidas de potencia y energía.

La investigación se enmarca en el Convenio de Cooperación Interinstitucional entre EMELNORTE y la Universidad Técnica del Norte, una alianza estratégica que garantiza viabilidad técnica y operativa al facilitar acceso a datos reales de generación, perfiles de demanda y topología de la red, junto con herramientas de simulación.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



La ejecución del estudio es factible gracias a su enfoque centrado en identificar la operación actual de la red. La colaboración con profesionales de EMELNORTE asegura retroalimentación experta, mientras que el uso de metodologías validadas en redes análogas respalda la confiabilidad de los resultados. Socialmente, al reducir pérdidas técnicas, se mejora el aprovechamiento energético del sistema, beneficiando a usuarios con un servicio más estable y alineado con objetivos de sostenibilidad. Académicamente, el proyecto genera conocimiento aplicable, donde la falta de incentivos económicos y la variabilidad de recursos renovables complican su gestión.

Este enfoque no solo ofrece a EMELNORTE estrategias técnicas para determinar generación y pérdidas, sino que también fortalece la formación de estudiantes mediante proyectos aplicados, consolidando el rol de la universidad como puente entre la teoría y las necesidades reales del sector energético regional.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Capacidad de alojamiento

2.1.1 Concepto

La capacidad de alojamiento (Hosting Capacity, HC) representa un concepto fundamental en la planificación y operación de los sistemas de distribución modernos, particularmente ante la creciente integración de Recursos Energéticos Distribuidos (DER). La capacidad de alojamiento se define como la máxima capacidad de generación distribuida que puede ser integrada en una red eléctrica sin violar los límites operativos establecidos [16]. Esta definición engloba no solo aspectos cuantitativos de capacidad instalada, sino también consideraciones cualitativas sobre la calidad del servicio y la estabilidad del sistema.

Se clasifican los métodos para estimar la capacidad de alojamiento en dos grandes categorías: convencionales y modificados. Los métodos convencionales incluyen aproximaciones determinísticas, estocásticas y de series temporales. Los enfoques determinísticos, descritos como modelos basados en escenarios fijos de generación y carga [16], son computacionalmente ágiles, pero pueden subestimar la complejidad de sistemas reales. Por su parte, los métodos estocásticos, que emplean distribuciones probabilísticas para representar la variabilidad en generación y demanda [1], ofrecen mayor precisión a costa de mayor complejidad computacional.

La implementación práctica de estos métodos requiere herramientas especializadas, por ejemplo, existen simuladores como Power Factory para análisis de flujo de potencia en sistemas balanceados y desbalanceados, OpenDSS para simulación de sistemas de distribución con alta penetración de generación distribuida y CYME para simulación de sistemas de distribución con sus módulos ICA y EPRI DRIVE para análisis iterativo y simplificado de capacidad de alojamiento [16].



Un aspecto crítico que debe ser resaltado es la relación entre capacidad de alojamiento y las técnicas de mejora, ya que la capacidad de alojamiento puede incrementarse mediante estrategias de gestión de demanda activa de la red, transformadores con tap bajo carga (Load Tap Changer LTC), o sistemas de almacenamiento de energía. Estas soluciones permiten superar limitaciones técnicas sin requerir refuerzos convencionales de infraestructura.

Se puede representar la capacidad de alojamiento como un indicador dinámico que evoluciona con los avances tecnológicos y cambios en los paradigmas operativos [16], su cálculo preciso requiere considerar no solo aspectos técnicos inmediatos, sino también la evolución futura de la red, la penetración esperada de la generación distribuida como los avances en técnicas de simulación y análisis de datos.

La Fig.1 representa el comportamiento característico de las pérdidas eléctricas en función de la cantidad de generación distribuida conectada a una red eléctrica. La forma en “U” refleja la evolución de las pérdidas de potencia y energía conforme aumenta el nivel de penetración de generación distribuida dentro del sistema.

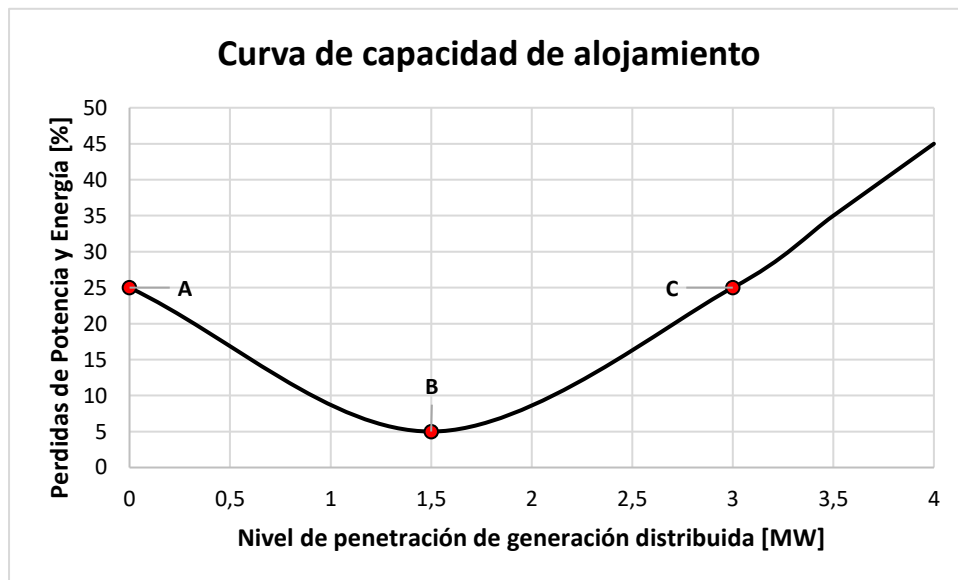


Fig. 1. Curva de capacidad de alojamiento (Pérdidas de potencia y energía vs Generación distribuida).
Elaboración propia.



El comportamiento de las pérdidas de potencia y energía respecto a la penetración de generación distribuida se describe mediante tres estados fundamentales. En el Punto A de la Fig. 1, el sistema presenta su nivel más alto de disipación de energía debido a la dependencia de la fuente centralizada o cabecera. En esta condición, el flujo de potencia recorre la extensión total del conductor para abastecer las cargas, lo que aumenta las pérdidas.

La integración de generación distribuida permite alcanzar el Punto B en la Fig. 1, donde se registra el nivel mínimo de pérdidas en el alimentador. En este umbral, la potencia inyectada localmente compensa el requerimiento de demanda, reduciendo la circulación de corriente desde la subestación.

En el Punto C de la Fig. 1, se delimita el rebase de la capacidad de alojamiento. Al existir un excedente de generación que sobrepasa el consumo local, se originan flujos inversos de potencia hacia la cabecera del alimentador. Este fenómeno incrementa nuevamente la disipación energética, marcando el límite donde la incorporación de nuevos recursos deja de reducir las pérdidas y comienza a degradar el comportamiento de la red.

El punto de mínima pérdida constituye el nivel más adecuado de penetración de generación distribuida, también conocido como capacidad de alojamiento del sistema. Más allá de este valor, la red requiere estrategias de control, almacenamiento o modernización de infraestructura para mantener su operación dentro de márgenes seguros.

En síntesis, la gráfica evidencia que la integración de generación distribuida no siempre implica una reducción continua de pérdidas, sino que existe un umbral más favorable donde se logra el máximo beneficio energético.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



2.1.2. Factores determinantes

Los fundamentos teóricos de la capacidad de alojamiento se sustentan en el análisis detallado de múltiples índices de desempeño que actúan como restricciones operativas. Entre los más relevantes se encuentran:

- **Límites de voltaje:** La inyección de potencia desde fuentes de generación distribuida puede provocar incrementos de voltaje que excedan los límites permitidos. Este fenómeno es particularmente crítico en redes radiales.
- **Pérdidas de potencia y energía** La integración de generación distribuida modifica los patrones de flujo de potencia, pudiendo aumentar las pérdidas de potencia y energía si no se gestiona adecuadamente su ubicación y despacho [16].
- **Flujo inverso de potencia:** Cuando la generación local excede la demanda, el excedente fluye hacia la red de subtransmisión, lo que puede requerir ajustes en los esquemas de protección convencionales [16].

2.1.3 Relación con las pérdidas

La Capacidad de Alojamiento de una red de distribución presenta una relación de interdependencia bidireccional con las pérdidas técnicas del sistema eléctrico por lo que su evaluación dependerá del tipo de generación distribuida conectada a la red; como por ejemplo la integración de Recursos Energéticos Distribuidos (DER), particularmente generación intermitente como la generación fotovoltaica que induce una modificación sustancial en los patrones del flujo de potencia; esta alteración, caracterizada por la posibilidad de flujos bidireccionales y cambios en la magnitud de las corrientes en distintos sectores de la red, impacta directamente el nivel de pérdidas de energía. Cabe destacar que este impacto no es unidireccional; si bien una ubicación o penetración inadecuada de los recursos energéticos distribuidos puede incrementar las pérdidas, una integración adecuada y gestionada activamente puede, por el contrario, contribuir a su reducción.



En consecuencia, la evaluación precisa de la capacidad de alojamiento se erige como un factor crítico en la planificación y operación de redes modernas, requiriendo modelos de análisis que consideren de manera integral este vínculo complejo para determinar el nivel de penetración renovable sostenible sin comprometer una buena operación del sistema. [16].

2.1.4 Mecanismos de influencia:

- **Efecto de localización y tamaño de generación distribuida:** La integración de generación distribuida puede reducir las pérdidas técnicas al acortar las trayectorias del flujo de potencia. Sin embargo, esta reducción solo ocurre cuando la generación distribuida se ubica estratégicamente en nodos con alta demanda local. La colocación aleatoria de generación distribuida puede incrementar las pérdidas hasta en un 15-20%, particularmente cuando la generación excede la demanda local y causa flujos inversos [16].
- **Impacto del perfil de generación:** La variabilidad intrínseca de fuentes renovables como la fotovoltaica crea patrones dinámicos de pérdidas que difieren significativamente de los sistemas convencionales [16]. Durante periodos de alta generación y baja demanda, pueden aparecer picos de pérdidas asociados a flujos bidireccionales.
- **Efecto escala:** Se identifica un comportamiento no lineal donde pequeñas penetraciones de generación distribuida generalmente reducen las pérdidas, mientras que penetraciones cercanas al límite de capacidad de alojamiento pueden generar incrementos abruptos. Este fenómeno se atribuye a la saturación de la capacidad de absorción local de la red.

2.1.5 Metodologías de análisis:

Existen varios enfoques para evaluar esta relación:

- **En métodos determinísticos:**



Se emplea el cálculo iterativo de flujos de potencia para determinar el punto donde el incremento en pérdidas excede umbrales predefinidos [16].

- **En enfoques estocásticos:**

Se modela la distribución probabilística conjunta de generación y demanda para obtener perfiles estadísticos de pérdidas [16], permitiendo evaluar no solo valores medios sino también eventos extremos.

- **En métodos de optimización:**

Se formula "la minimización de pérdidas como una función objetivo secundaria en problemas de maximización de la capacidad de alojamiento" [16].

2.2 Generación distribuida (GD) en redes de distribución

2.2.1 Integración de generación distribuida

La generación distribuida representa un paradigma fundamental en la transición energética moderna, permitiendo la integración de recursos energéticos descentralizados cerca de los puntos de consumo. Su implementación requiere cumplir rigurosamente con requisitos de interconexión para recursos energéticos distribuidos, que regula la conexión de generación distribuida en redes de distribución eléctrica. Estos marcos garantizan la interoperabilidad, seguridad operativa y calidad del servicio ante la creciente penetración de tecnologías renovables [5] [13].

2.2.2 Tecnologías de generación distribuida

2.2.2.1 Generación fotovoltaica (FV)

La generación de energía fotovoltaica constituye un proceso de conversión directa de la radiación solar, ya sea de carácter directo o difuso, en energía eléctrica. Este fenómeno se fundamenta en el efecto fotovoltaico, el cual tiene lugar en dispositivos semiconductores, predominantemente células de silicio en sus variantes monocristalina y policristalina, así como en otros materiales semiconductores emergentes. Una de las virtudes inherentes a esta tecnología reside en su naturaleza modular, que permite su



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



escalabilidad en un amplio espectro de aplicaciones, desde sistemas de autoconsumo residencial con potencias del orden de los kilovatios (kW) hasta plantas de generación a gran escala que alcanzan el rango de los megavatios (MW).

En el contexto energético actual, la tecnología fotovoltaica se posiciona como la de mayor crecimiento dinámico dentro del sector de la generación distribuida a nivel global. Este auge es impulsado de manera concertada por su inherente flexibilidad de diseño y de manera crucial, por la continua y significativa reducción en sus costos de implementación, que la ha convertido en una alternativa crecientemente competitiva.

No obstante, la integración de este recurso de generación intermitente en los sistemas de distribución eléctrica existentes requiere considerar varios aspectos, lo que hace imperativo el desarrollo de estrategias de gestión avanzada; donde el objetivo primordial de dichas estrategias es incrementar la Capacidad de Alojamiento de las redes.

Tecnológicamente se implementan metodologías de mejora jerárquica que combinan de forma sinérgica mecanismos de respuesta de la demanda con esquemas de control Volt/VAR en los inversores. Esta integración de capacidades de control activo y reactivo ha demostrado ser efectiva para elevar los niveles de penetración fotovoltaica, al tiempo que mitiga problemas operativos críticos, como las desviaciones de voltaje fuera de los límites permisibles y el incremento de las pérdidas técnicas en la red [2] [3].

2.2.2.2 Generación hidroeléctrica

La generación hidroeléctrica de pequeña escala (<10 MW) aprovecha la energía cinética o potencial de cursos fluviales mediante turbinas (Pelton, Francis, Kaplan) acopladas a generadores síncronos o asíncronos. Se clasifica según la altura de caída:

- **Baja carga (<20 m):** Turbinas de hélice o Kaplan en ríos caudalosos [17]
- **Media carga (20-200 m):** Turbinas Francis en sistemas mixtos [4]
- **Alta carga (>200 m):** Turbinas Pelton en sistemas montañosos [17]



Pese a sus beneficios la integración de generación hidroeléctrica está limitada a restricciones topográficas y operativas, tales como pendientes y la disponibilidad de caudales mínimos, lo que limita los emplazamientos viables. En consecuencia, resulta imperativo cuantificar su impacto en la capacidad de alojamiento mediante herramientas estandarizadas [17] [13].

2.3 Sistema de distribución eléctrica

El sistema eléctrico de distribución comprende la porción del sistema eléctrico de potencia (SEP) encargada de llevar la energía eléctrica desde las subestaciones de distribución hasta los usuarios finales, como residencias, comercios e industrias. Este sistema está diseñado para suministrar energía en niveles de voltaje adecuados a las cargas de consumo, atendiendo a normas internacionales y nacionales; en particular, en Ecuador, la norma de ARCONEL 009/2024 determina los niveles y valores estandarizados de voltaje utilizados en los sistemas eléctricos de 60 Hz [17].

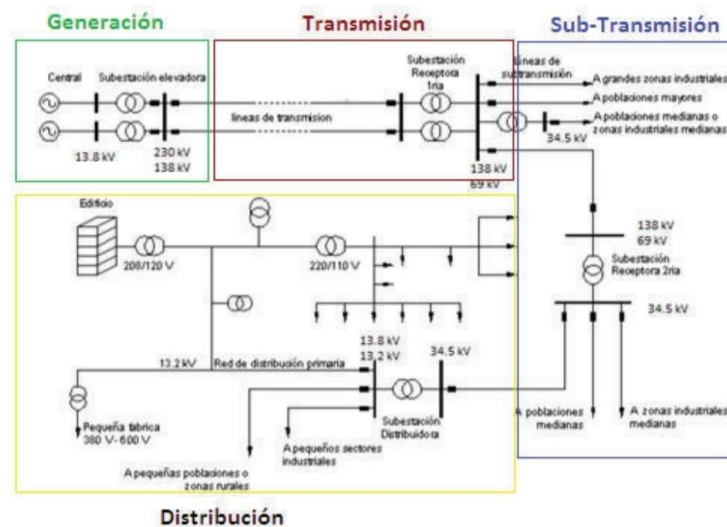


Fig. 2. Sistema eléctrico de potencia (SEP) y sus partes. [17]



2.3.2. Configuraciones y topologías de redes de distribución

Las redes de distribución están diseñadas en diversas configuraciones, cada una con ventajas específicas en términos de confiabilidad, costo y capacidad de soporte para generación distribuida:

Sistema radial: Es la estructura más común, donde la energía fluye en una sola dirección desde la subestación hacia los consumidores. La simplicidad y menor costo hacen de esta configuración la preferida en muchas áreas, aunque su vulnerabilidad ante fallas limita su capacidad de respuesta en condiciones operativas [17].

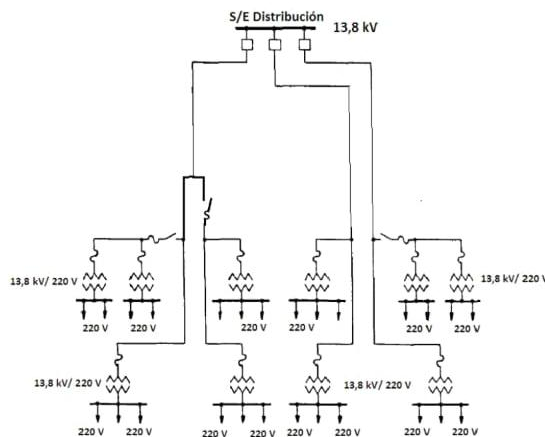


Fig. 3. Forma simple de un sistema de distribución tipo radial. [17]

Sistema en anillo: Emplea una topología cerrada donde la carga puede ser alimentada desde dos vías de alimentación eléctrica distintas [17].



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD

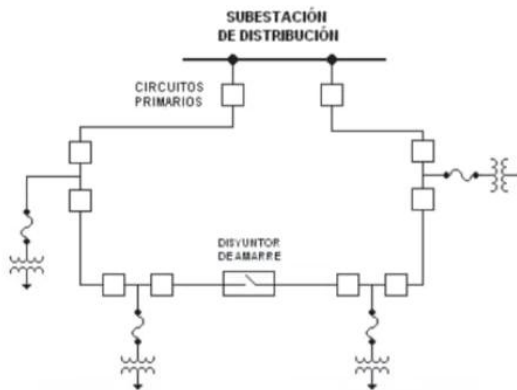


Fig. 4. Sistema en anillo. [17]

Doble alimentación: Combina características del sistema radial y en anillo, asegurando mayor continuidad del servicio y capacidad para soportar cargas adicionales o generación distribuida, aunque a un mayor costo y complejidad operativa.

Asimismo, las redes pueden ser aéreas o subterráneas, en función de consideraciones técnicas, económicas y de protección contra condiciones climáticas adversas [17].

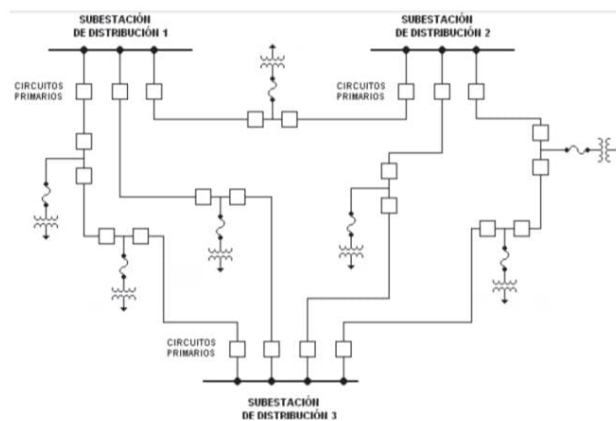


Fig. 5. Sistema de doble alimentación. [17]



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



2.3.3 Subestaciones de distribución y su rol en la capacidad de alojamiento

Una subestación eléctrica es una instalación fundamental dentro del sistema eléctrico de potencia, cuyo propósito principal es constituir un nodo de interconexión para la manipulación, transformación y distribución de la energía eléctrica. Equipada con componentes como transformadores, interruptores, seccionadores, barras de distribución, sistemas de protección y control. Su operación permite modificar los parámetros del suministro eléctrico (principalmente voltaje y corriente) para garantizar su transporte y su entrega segura y confiable en los distintos niveles de voltaje de la red. Actúan como puntos de inflexión estratégicos que enlazan los sistemas de transmisión de alto voltaje con las redes de distribución de media y bajo voltaje que finalmente alimentan a los consumidores finales.

Las subestaciones de distribución se erigen como nodos críticos dentro de la infraestructura eléctrica, no solo por su función tradicional de transformar los niveles de voltaje para adaptar la energía a las necesidades del consumo, sino también por haberse convertido en puntos de interfaz esenciales para la conexión de cargas y de manera creciente, para la integración de fuentes de energía renovable en esquemas de generación distribuida.

2.4 Fundamentos de Energía Activa y Reactiva en Sistemas de Distribución

El flujo de potencia en las redes de distribución eléctrica se descompone en dos magnitudes vectoriales que definen el comportamiento técnico y la estabilidad del sistema: la potencia activa (P) y la potencia reactiva (Q).

2.4.1 Potencia Activa

La potencia activa representa la componente de la energía que se transforma en trabajo útil dentro del sistema. En el contexto de la integración de generación distribuida, la inyección de potencia activa local permite el desplazamiento de la carga suministrada desde la subestación, lo que modifica el perfil de flujo de potencia en el sistema eléctrico. De acuerdo con los principios de flujo de carga, esta reducción de corriente conlleva una



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



disminución de las pérdidas por efecto Joule, siempre que la magnitud de inyección no exceda la capacidad de conducción de los elementos de red [17].

2.4.2 Potencia Reactiva e Impacto en el Perfil de Voltaje

La potencia reactiva es la componente necesaria para el sostenimiento de los campos electromagnéticos en elementos inductivos. A diferencia de la potencia activa, el flujo de reactivos no realiza trabajo útil, pero su tránsito por las líneas de distribución consume capacidad de transporte y es el principal determinante del perfil de voltajes.

Según lo expuesto por Castellanos-Campana et al. [25], la gestión de la energía reactiva en sistemas con penetración de fuentes renovables es crítica para evitar la degradación del servicio eléctrico. Una sobrecarga de energía reactiva en el punto de acoplamiento común (PCC) provoca caídas de tensión severas e incrementa las pérdidas de potencia, limitando la capacidad de la red eléctrica. Este fenómeno explica por qué, al incrementar la inyección de potencia activa sin una compensación reactiva adecuada, el sistema eléctrico alcanza un umbral de inestabilidad donde los niveles de voltaje divergen de los rangos permitidos por la normativa vigente.

2.4.3 Factor de Potencia y Potencia Aparente

La relación entre las potencias activa y reactiva se define mediante el Factor de Potencia (FP), el cual indica la integridad con la que se utiliza la capacidad de la red eléctrica. La Potencia Aparente (S), resultante de la suma vectorial de P y Q, determina la carga total sobre la infraestructura.

2.5 Agencia de Regulación y Control de Electricidad

La Agencia de Regulación y Control de Electricidad (ARCONEL) establece el marco normativo, definiendo los requerimientos que se rigen para la integración segura de generación renovable en las redes de distribución eléctrica nacional. Estas disposiciones legales y técnicas son la base para determinar el impacto de los recursos renovables en alimentadores locales, asegurando que la integración de la generación existente se realice bajo parámetros que preserven la estabilidad del sistema eléctrico.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



Asimismo, la normativa busca que la expansión de estos recursos no incremente de forma imprevista las pérdidas de potencia y energía, manteniendo la operatividad del sistema eléctrico dentro de los límites permitidos [5] [13] [18] [19].

2.5.1 ARCONEL 001/24:

La Regulación ARCONEL-001/24 se denomina «Código de Conexión del Sistema Eléctrico Ecuatoriano», establece el marco técnico obligatorio que rige la vinculación de centrales de generación y autogeneradores al Sistema Eléctrico de Potencia (SEP). Su propósito fundamental es determinar los requisitos de diseño, instalación y operación que garantizan que la incorporación de nuevos puntos de inyección no degrade la integridad de la infraestructura eléctrica nacional ni afecte la continuidad del suministro.

Este código actúa como un protocolo de interoperabilidad que asegura que cada planta de generación posea la capacidad de respuesta necesaria ante perturbaciones. La normativa abarca desde los procedimientos administrativos para la obtención del punto de conexión hasta las exigencias técnicas de control de voltaje, frecuencia y calidad de potencia, proporcionando una base técnica sólida para la planificación y operación del sistema nacional interconectado.

Incentivos y beneficios operativos

La implementación de esta normativa ofrece ventajas estratégicas para el desarrollo de proyectos energéticos:

- **Viabilización de energías renovables:** Proporciona un esquema técnico claro para la integración de fuentes no convencionales, facilitando la transición hacia una matriz energética más diversificada.
- **Garantía de acceso a la red:** Asegura el derecho de conexión a los interesados mediante la determinación transparente de la capacidad remanente en los nodos de la red de transporte y distribución.



- **Protección de infraestructura:** Al cumplir con los estándares de seguridad y protección, el generador minimiza el riesgo de daños en sus propios activos ante eventos transitorios o fallas externas.
- **Confiabilidad del Sistema:** Establece parámetros de desempeño que aseguran que la inyección de potencia sea estable, reduciendo la probabilidad de colapsos o salidas no programadas de operación.

2.5.2 ARCONEL 005/24:

La Regulación ARCONEL-005/24 se denomina «Marco normativo de la generación distribuida para el autoabastecimiento de consumidores regulados de energía eléctrica», establece las condiciones técnicas, legales y comerciales para la implementación de sistemas de generación distribuida destinados al autoabastecimiento de consumidores regulados. El objetivo primordial es normar la integración de tecnologías de energía renovable en los puntos de consumo, permitiendo que los usuarios produzcan su propia electricidad y entreguen los excedentes a la red de distribución local bajo un esquema de compensación técnica y económica.

Esta normativa regula el dimensionamiento de los sistemas, los requisitos de conexión y el procedimiento de medición neta. Al definir reglas claras para la interacción entre el consumidor-generador y la empresa distribuidora, la regulación busca asegurar que la incorporación masiva de estas fuentes se realice sin comprometer la estabilidad operativa de las redes eléctricas, manteniendo la calidad del servicio dentro de los estándares nacionales.

Incentivos y beneficios operativos

El marco normativo de la generación distribuida ofrece incentivos orientados a fomentar la autogeneración y la sostenibilidad del sistema:



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



- **Esquema de balance neto (Net Metering):** Permite compensar la energía consumida de la red con la energía inyectada por el sistema de generación, reduciendo el valor total de la facturación mensual.
- **Créditos de energía:** Los excedentes de energía inyectados que no sean consumidos en el mes corriente se registran como un crédito a favor del usuario, el cual puede ser utilizado en periodos de facturación posteriores (hasta por un año).
- **Reducción de pérdidas de transporte:** Al generar la energía en el mismo punto de consumo, se disminuye la carga sobre las líneas de transmisión y distribución, mejorando el perfil de voltajes local.
- **Exoneración de cargos por uso de red:** La energía auto consumida de forma instantánea no está sujeta a cargos de transporte o distribución, lo que representa un beneficio directo en la estructura de costos energéticos del usuario.

2.5.3 ARCONEL 006/2024:

La Regulación ARCONEL-006/24 se denomina «Marco normativo para la participación en generación distribuida de empresas interesadas en realizar la actividad de generación», establece las directrices para que empresas privadas, públicas o de economía mixta desarrollen proyectos de generación distribuida con el fin de comercializar energía. A diferencia de la 005/24 (que se enfoca en el autoabastecimiento), esta normativa regula a la Generación Distribuida (GD) como una actividad de negocio dentro del sector eléctrico, conectada a las redes de las empresas distribuidoras.

El código define los requisitos técnicos para la obtención de títulos habilitantes, los procedimientos de conexión y la metodología para determinar los plazos de concesión. Su propósito es fomentar la inversión en proyectos de pequeña y mediana escala, asegurando que la infraestructura soporte la inyección de potencia sin comprometer la seguridad del Sistema Eléctrico de Potencia.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



Incentivos y beneficios operativos

Esta regulación promueve el desarrollo energético mediante los siguientes incentivos estratégicos:

- **Seguridad en la inversión:** Establece periodos de evaluación de proyectos acordes a la tecnología (hasta 30 años), permitiendo la amortización de capital y una utilidad razonable.
- **Acceso preferencial a la red:** Obliga a las distribuidoras a facilitar el punto de conexión siempre que exista capacidad de alojamiento disponible.
- **Descentralización de la matriz:** Al incentivar plantas cercanas a los centros de carga, se reduce el uso de grandes líneas de transmisión y se mejora el perfil de voltajes en zonas rurales o industriales.
- **Sostenibilidad técnica:** Obliga a la implementación de sistemas de control modernos que ayudan a regular la frecuencia y el voltaje local, beneficiando la estabilidad de la red de distribución.

2.5.3.1 Artículo 6. Caracterización de una central de generación distribuida:

A los efectos de esta regulación, se considera Central de Generación Distribuida a toda central de generación eléctrica que cumpla simultáneamente con las siguientes condiciones:

- a) **Potencia:** Contar con una Potencia Nominal entre 100 kW y 10 MW, inclusive.
- b) **Conexión:** Conectarse de forma síncrona a la red de transporte, de acuerdo con la categorización establecida en la Regulación ARCONEL 001/2024.
- c) **Fuente de Energía:** Utilizar exclusivamente una fuente primaria de energía renovable no convencional.
- d) **Factor de Potencia:** De acuerdo con la remisión técnica a la Regulación ARCONEL 001/24, la central debe garantizar un factor de potencia mínimo de



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



0,92 en el punto de acoplamiento. El incumplimiento de este parámetro conlleva penalizaciones técnicas y económicas.

Adicionalmente, si la central de generación distribuida incorpora sistemas de almacenamiento de energía, estos solo podrán ser cargados con la energía eléctrica generada por la propia central.

2.5.3.2 Requerimientos de Calidad y Estabilidad

Para que una Central de Generación Distribuida opere bajo el marco de la Regulación ARCONEL 006/24, debe asegurar que su integración no desestabilice los parámetros de red. En este sentido, dicha norma (referente a la Operación y Mantenimiento) subraya que:

- **Soporte de Reactivos:** Los sistemas de conversión de energía (inversores o generadores síncronos) deben tener la capacidad de gestionar la energía reactiva para mantener el voltaje dentro de los límites operativos.
- **Control de Pérdidas:** La central es responsable de no inducir pérdidas que afecten el factor de potencia global del alimentador, asegurando que el transporte de energía desde la subestación hasta los centros de carga no se vea comprometida.

2.5.4 ARCONEL 009/24:

La Regulación ARCONEL-009/24 se denomina «Calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica», tiene como objetivo establecer los indicadores, índices y valores límite que garantizan la calidad del producto, del servicio técnico y del servicio comercial en el ámbito de la distribución. Esta normativa asegura que las empresas eléctricas brinden un suministro que cumpla con condiciones operativas de voltaje y continuidad, protegiendo los equipos de los usuarios y la estabilidad de la red eléctrica.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



Esta regulación es el marco de referencia para juzgar si la inyección de generación distribuida degrada el servicio. Los parámetros definidos son los que pueden ser vulnerados cuando el sistema alcanza el punto de colapso, especialmente en lo que respecta a las variaciones de voltaje y la distorsión armónica en los nodos de consumo.

a. Incentivos y beneficios operativos

El cumplimiento de los estándares de calidad de esta regulación genera beneficios directos para la gestión del alimentador:

- **Reducción de multas por incumplimiento:** Mantener los indicadores dentro de los límites evita las compensaciones económicas que las distribuidoras deben pagar a los consumidores por mala calidad.
- **Prolongación de la vida útil de activos:** Un suministro con bajos niveles de distorsión y voltajes estables reduce el estrés térmico en transformadores y conductores del alimentador.
- **Atención mejorada a los mantenimientos:** Los indicadores de continuidad (frecuencia y duración de interrupciones) permiten identificar los tramos del alimentador que requieren intervención prioritaria.
- **Satisfacción del consumidor:** Garantiza que los usuarios finales reciban energía con parámetros que no dañen sus electrodomésticos ni procesos industriales.

b. Niveles de voltaje en el sistema de distribución

El sistema de distribución eléctrica contempla una escala de niveles de voltaje que abarca desde la red secundaria hasta los 69 kV correspondientes a la subtransmisión. Dentro de esta estructura, las redes secundarias operan bajo voltajes normalizados de 120V/240V en sistemas monofásicos y 220V/127V en sistemas trifásicos para el consumo final. Esta configuración técnica permite que el flujo de potencia se distribuya de manera adecuada desde los centros de transformación hacia los distintos puntos de entrega, cumpliendo con los parámetros operativos establecidos para la red nacional.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



La clasificación de los niveles de voltaje en el sistema de distribución está descrita en la normativa de ARCONEL 009/2024, en el artículo 8.2 que establece los umbrales para diferenciar entre bajo, medio y alto voltaje [5]:

Tabla I

Niveles de voltaje. [5]

Nivel de Voltaje	Valores de Voltaje
Bajo Voltaje	$\leq 0,6 \text{ kV}$
Medio Voltaje	$> 0,6 \text{ kV y } \leq 40 \text{ kV}$
Alto Voltaje (Grupo 1)	$> 40 \text{ kV y } \leq 138 \text{ kV}$
Alto Voltaje (Grupo 2)	$> 138 \text{ kV}$

Esta clasificación es esencial para determinar las características de protección y operación, además de facilitar la integración de generación distribuida en diferentes niveles del sistema eléctrico.

2.5.5 Atributos de calidad

La evaluación de la calidad de la prestación del servicio de energía eléctrica se efectuará considerando los siguientes índices e indicadores:

a. Nivel de voltaje:

Tabla II

Niveles de voltaje y rango de incumplimiento. [5]

Niveles de voltaje	Rango admisible
Alto voltaje (Grupo I y grupo II)	$\pm 5.0\%$
Medio voltaje	$\pm 6.0\%$
Bajo voltaje	$\pm 8.0\%$



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



b. Perturbaciones rápidas de voltaje (Flicker)

El valor límite para el índice de severidad del flicker de corta duración P_{st} en el punto de medición respectivo no debe superar la unidad².

c. Distorsión armónica de voltaje

Tabla III

Distorsión armónica y rango de incumplimiento. [5]

Niveles de voltaje	Rango admisible de THD individual	Rango admisible de THD grupal
Alto voltaje (Grupo II)	$\pm 1,0\%$	$\pm 1,5\%$
Alto voltaje (Grupo I)	$\pm 1,5\%$	$\pm 2,5\%$
Medio voltaje	$\pm 3,0\%$	$\pm 5,0\%$
Bajo voltaje	$\pm 5,0\%$	$\pm 8,0\%$

d. Desequilibrio de voltaje

El valor límite para el índice de desequilibrio de voltaje en un punto de medición será de 2% para todos los niveles de voltaje.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Introducción

El presente capítulo expone de manera detallada la metodología desarrollada para la determinación de la capacidad de alojamiento del alimentador El Chota I, considerando la presencia de generación distribuida y su incidencia en las pérdidas de potencia y energía dentro del sistema de distribución. Para ello, se establecen los criterios metodológicos y de investigación empleados, describiendo el enfoque analítico adoptado, las herramientas de simulación y software especializado utilizados en el proceso; en conjunto con los procedimientos aplicados para la recolección, validación y modelado de la información técnica del sistema eléctrico.

A su vez, se plantea la evaluación del comportamiento operativo del alimentador bajo diferentes escenarios de penetración de generación distribuida renovable, lo que permite identificar las condiciones límite de integración y analizar los efectos sobre las pérdidas energéticas totales. De este modo, la metodología propuesta proporciona una base sólida para el análisis técnico y comparativo del desempeño del sistema ante diversos niveles de penetración de generación renovable.

3.2 Descripción del área de estudio

La Empresa Eléctrica Regional Norte S.A. (EMELNORTE) se constituye como la entidad responsable de la distribución y comercialización de energía eléctrica en el norte del país, operando bajo el marco de un título habilitante de concesión otorgado por el Estado. Su gestión técnica se orienta a garantizar el suministro eléctrico en las provincias de Imbabura, Carchi, el norte de Pichincha, parte de Esmeraldas y Sucumbíos, asegurando la continuidad del servicio bajo los estándares de calidad vigentes.

En este contexto, a EMELNORTE le corresponde una función de vital importancia para la infraestructura regional: garantizar el suministro energético,



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



fundamental para el desarrollo socioeconómico, la productividad y la calidad de vida de la población, las industrias y el comercio asentados en su zona de influencia.

3.3 Enfoque y tipo de investigación:

El estudio adopta un enfoque cuantitativo fundamentado en la interpretación de datos numéricos del sistema de distribución de EMELNORTE, a través de registros reales del perfil de demanda; bajo este esquema, se analiza el comportamiento del alimentador El Chota I para evaluar las pérdidas de potencia y energía, así como las variaciones de voltaje en los distintos nodos de carga. Este procedimiento permite verificar el desempeño del sistema eléctrico ante diversas condiciones de inyección; asegurando de esta manera el cumplimiento de los límites de operación establecidos por la normativa vigente y proporcionando una base técnica para la determinación de la capacidad de alojamiento.

La investigación es de carácter descriptivo y explicativo, ya que busca caracterizar de manera sistemática el comportamiento del sistema eléctrico; simultáneamente, se analizan los efectos de la incorporación de generación distribuida en la funcionalidad operacional de la red eléctrica de distribución. Esta combinación metodológica facilita la identificación de condiciones críticas y la propuesta de medidas; proporcionando el sustento necesario para la toma de decisiones orientadas a una operación más estable del sistema eléctrico frente al incremento de la potencia activa inyectada.

3.3.1 Ubicación

La investigación se enfoca en el comportamiento del alimentador El Chota I, perteneciente a la red de distribución eléctrica de EMELNORTE y con fuente de suministro principal a la subestación El Chota; bajo este marco operativo, el análisis integra las características físicas de la infraestructura con el desempeño de los recursos de generación distribuida interconectados.

El estudio evalúa la interacción entre la demanda de la zona y dos fuentes de energía renovable: la central hidroeléctrica "El Laurel" y la central fotovoltaica referenciada con el perfil de comportamiento de "Gran Solar", ambas con una capacidad



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



nominal de 1 MW; esta configuración permite una comprensión integral de los flujos de potencia y la estabilidad del sistema eléctrico frente a la incorporación de nueva inyección activa. La evaluación de estas unidades generadoras constituye el núcleo del análisis realizado; permitiendo determinar el impacto técnico de dichas fuentes dentro de la red local y asegurar la integridad operativa del alimentador ante diversos escenarios de carga.

3.4 Diseño de la investigación materiales, equipos y software

En este apartado, se detallan los recursos e instrumentos empleados para el desarrollo de esta investigación, cuya selección y aplicación resultan fundamentales para la consecución de los objetivos planteados y la validez de los resultados obtenidos.

3.4.1 Software de simulación y análisis técnico CYME

Para el modelado y la evaluación de la capacidad de alojamiento en el alimentador El Chota I, se utilizó el software especializado CYME (Cyme International T&D). Esta plataforma es reconocida como un estándar en la ingeniería eléctrica para la simulación de sistemas de distribución, permitiendo realizar análisis de estado estacionario y series temporales con alta precisión [20].

La selección de esta herramienta se fundamenta en su capacidad para modelar redes radiales complejas e integrar Recursos Energéticos Distribuidos. Las herramientas de simulación de este tipo son esenciales para cuantificar el impacto de la generación fotovoltaica e hidroeléctrica en los perfiles de voltaje y en la funcionalidad energética de la red [21].

3.5 Metodología

La investigación se basa en un enfoque cuantitativo, se estructuró en fases secuenciales para garantizar un análisis riguroso del alimentador El Chota I, integrando simulaciones de series temporales para evidenciar su cambio, demanda e inyección de generación distribuida.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



Inicialmente, se realizó una revisión documental centrada en la capacidad de alojamiento y la integración de Recursos Energéticos Distribuidos. Esta fase permitió establecer los criterios de evaluación basados en las regulaciones ARCONEL 001/2024, 005/2024, 006/2024, 009/2024 y 010/2024, las cuales delimitan los márgenes operativos en redes de distribución.

Posteriormente, se procesó la información técnica suministrada por EMELNORTE S.A., que incluyó la topología detallada, parámetros de conductores y fundamentalmente, los perfiles de carga y generación anual. Como señalan los estándares de la industria, la verificación y tabulación de estos datos es un paso crítico para asegurar la convergencia de los flujos de carga en el software de simulación.

Con la base de datos validada, se construyó el modelo digital en CYME, representando la subestación El Chota, el alimentador El Chota I y las centrales de generación distribuido de tipo hidroeléctrica y fotovoltaica. La metodología culminó con la ejecución de múltiples escenarios de inyección de potencia, permitiendo cuantificar el impacto en las pérdidas técnicas y determinar la capacidad de alojamiento bajo condiciones de operación real.

3.5.1 Procedimiento

A continuación, mediante un diagrama se describen los procesos a seguir para el estudio de la capacidad de alojamiento.

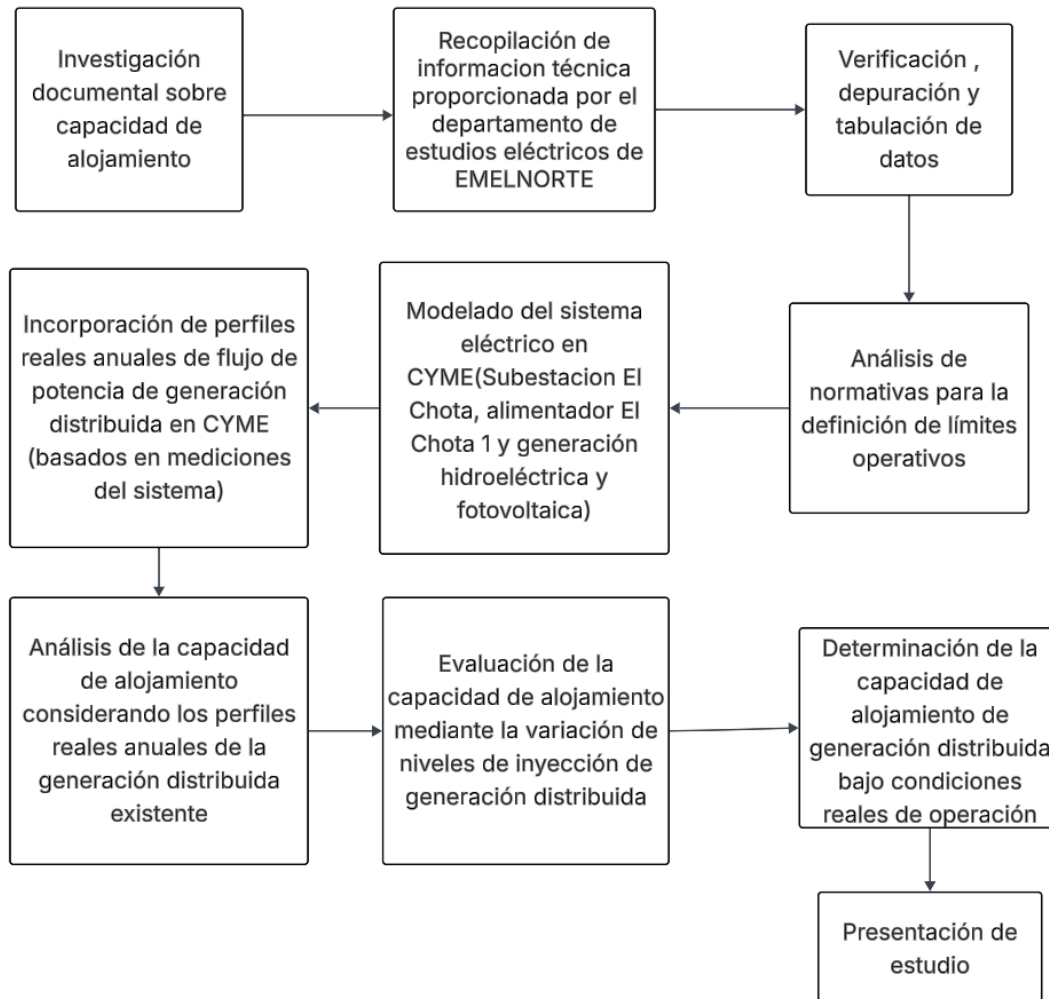


Fig. 6. Procedimiento representado por diagrama de bloques.
Elaboración propia.

3.5.2 Criterios normativos para el cálculo de la capacidad de alojamiento

El cálculo de la capacidad de alojamiento no es una determinación discrecional, sino un proceso técnico normalizado que responde al marco jurídico y regulatorio vigente. Se define como la cantidad máxima de generación distribuida que puede integrarse en una red eléctrica sin vulnerar los límites de operación [19].

En el Ecuador, este análisis se fundamenta en los siguientes instrumentos legales y técnicos:



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



a. Marco legal superior

- Ley Orgánica del Servicio Público de Energía Eléctrica (LOSPEE): Constituye el pilar jurídico que garantiza el acceso a las redes de distribución para la integración de generación renovable, obligando a las empresas distribuidoras a facilitar la conexión bajo principios de aprovechamiento energético y seguridad sistémica [2].

b. Regulaciones técnicas específicas (ARCONEL)

La determinación técnica de los límites de inyección en el alimentador El Chota I se rige por las resoluciones de la Agencia de Regulación y Control de la Electricidad (ARCONEL) emitidas en 2024:

- **Regulación Nro. ARCONEL-001/24 (Código de Conexión):** Establece los requisitos técnicos obligatorios para la vinculación de centrales de generación al Sistema Eléctrico de Potencia. Su función es garantizar que la infraestructura posea la robustez necesaria y que los nuevos puntos de inyección no comprometan la integridad operativa ni la seguridad de la red nacional.
- **Regulación Nro. ARCONEL-005/24 (Generación Distribuida para Autoabastecimiento):** Regula las condiciones para que los consumidores regulados generen su propia energía a partir de fuentes renovables. Define los límites de capacidad instalada y el esquema de medición neta, asegurando que el intercambio de energía con la red de distribución se realice bajo parámetros técnicos controlados.
- **Regulación Nro. ARCONEL-006/24 (Participación de Empresas en Generación Distribuida):** Norma la participación de entidades interesadas en ejercer la actividad de generación distribuida con fines comerciales. Proporciona las directrices para la obtención de títulos habilitantes y los procedimientos de conexión, buscando descentralizar la matriz energética sin afectar la estabilidad de los alimentadores.



- **Regulación Nro. ARCONEL-009/24 (Calidad del Servicio de Distribución):** Determina los indicadores y límites máximos permitidos para los atributos de calidad del producto y servicio técnico. Es el marco de referencia para verificar que el alimentador mantenga niveles adecuados de voltaje y bajas tasas de distorsión armónica, protegiendo así el equipamiento de los usuarios finales.

El límite de voltaje suele ser el primer factor que restringe la capacidad de alojamiento en redes de medio voltaje [18].

c. Definición operativa del estudio

Bajo este marco, la capacidad de alojamiento evaluado se cuantifica como el umbral de potencia activa (P) y reactiva (Q) donde se alcanza al menos una de las siguientes condiciones de borde:

- **Incumplimiento de los límites de voltaje:** El voltaje en cualquier punto de la red de distribución y de manera crítica, en el Punto de Conexión Común y en los puntos de entrega a los clientes finales, debe permanecer dentro del rango en el caso de medio voltaje que es de $\pm 6\%$ del voltaje nominal (entre 0.96 y 1.06 p.u. para un sistema de 13.8 kV) bajo todas las condiciones de operación previstas.
- **Inversión de Flujo y Pérdidas:** Punto en el cual el flujo cambia de dirección y regresa hacia la subestación incrementa las pérdidas de potencia y energía.
- **Factor de potencia:** La central de generación distribuida debe garantizar un factor de potencia mínimo de 0,92 en el punto de acoplamiento.

3.5.3 Metodología de cálculo normalizado mediante simulación

Para la obtención de los resultados presentados en este capítulo, se empleó el software de análisis de sistemas de potencia CYME, utilizando el modelo del alimentador El Chota I proporcionado por EMELNORTE. El proceso se centró en la ejecución de flujos de carga con perfiles variables a lo largo de un periodo anual siguiendo el siguiente orden:



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



a. Modelado del sistema base:

Se construye un modelo del alimentador El Chota I, incorporando todos los datos exigidos por el distribuidor (EMELNORTE). Este modelo incluye la representación detallada de cargas con perfiles típicos reconocidos por ARCONEL.

b. Definición de escenarios de estudio:

Se establecen los escenarios de operación a evaluar para el posterior estudio de comportamiento del sistema.

Escenario 1 (Sin Generación Distribuida): Carga nominal del alimentador. Este caso permite evaluar las pérdidas en el sistema eléctrico.

Escenario 2 (Generación real del sistema): Carga nominal del alimentador + Generación hidroeléctrica nominal inyectada (1 MW). Este caso permite evaluar las pérdidas existentes en el sistema eléctrico.

Escenario 3 (Integración de generación hidroeléctrica): Carga nominal del alimentador + Generación hidroeléctrica inyectada (0,5 MW, 1.5MW, 2MW, 3MW y 4 MW). Este caso permite evaluar las pérdidas al inyectar generación hidroeléctrica en el sistema eléctrico.

Escenario 4 (Integración de generación fotovoltaica): Carga nominal del alimentador + Generación nominal hidroeléctrica inyectada (1MW) + Generación fotovoltaica inyectada (0.5MW, 1MW, 1.5MW, 2MW, 3MW, 4 MW, 5 MW y 6 MW). Este caso es para evaluar el límite de generación fotovoltaica admisible en el sistema con pérdidas mínimas.

Simulación iterativa y monitoreo de límites: Se inyecta potencia desde las fuentes de generación hidroeléctrica (sincrónica) y solar (inversor) en sus puntos de conexión designados, incrementando la potencia total en pasos. Para cada incremento, se ejecutan



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



flujos de carga con perfiles de carga para cada uno de los escenarios en CYME. El software permite monitorear:

Determinación de la capacidad de alojamiento: La capacidad de alojamiento es la máxima potencia inyectada previa a alcanzar al nivel de voltaje fuera de sus límites y el aumento de las pérdidas de potencia y energía.

3.5.4 Análisis de pérdidas de energía mediante el flujo de carga con perfiles

En lugar de un análisis de flujo de carga convencional basado en la demanda máxima, esta investigación empleó el criterio de análisis de flujo de carga con perfiles de carga.

Esta metodología permitió realizar simulaciones de series temporales utilizando datos de demanda y generación con resolución horaria durante un periodo de un año completo. Este enfoque es fundamental para el cumplimiento de los objetivos, ya que permite determinar las pérdidas de energía anuales (kWh).

El uso de perfiles de carga reales es el método más robusto para capturar la variabilidad de la generación renovable y su interacción con la curva de demanda del alimentador, facilitando la evaluación de parámetros cuando se tiene inyección de diferentes fuentes con comportamientos distintos.

3.5.5 Análisis de pérdidas de potencia en el punto de generación máxima

El análisis de las pérdidas de potencia en el punto de generación máxima es fundamental para comprender los límites operativos de un alimentador con integración de recursos renovables; este fenómeno ocurre cuando la inyección de potencia activa desde las fuentes distribuidas alcanza su valor nominal, alterando la dirección y magnitud de los flujos de carga convencionales. Bajo estas condiciones, el sistema puede experimentar una reducción inicial de las pérdidas de potencia debido a la proximidad de la generación con los centros de consumo; no obstante, si la potencia inyectada supera a la carga, el exceso de energía fluye hacia la subestación, incrementando nuevamente las pérdidas por efecto Joule en los conductores de la red de distribución.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



Asimismo, el punto de generación máxima suele coincidir con una demanda elevada de potencia reactiva por parte del sistema, lo que influye directamente en la caída del factor de potencia; esta situación provoca que las pérdidas totales se incrementen de forma no lineal, afectando la estabilidad del perfil de voltajes en los nodos intermedios.

El estudio de este escenario permite identificar el umbral crítico donde el beneficio de la generación distribuida se pierde ante la saturación de la infraestructura eléctrica; por consiguiente, este análisis constituye una herramienta técnica esencial para determinar la capacidad de alojamiento y asegurar que la operación del alimentador se mantenga dentro de los parámetros técnicos establecidos.

3.5.6 Impacto en pérdidas

El estudio se centró en identificar el umbral de potencia inyectada donde las pérdidas técnicas alcanzan su nivel mínimo antes de que la presencia de flujos inversos altere la operación de la red. A través de la evaluación de este comportamiento, se logra validar la factibilidad de incorporar fuentes renovables, garantizando que el impacto en la red eléctrica sea favorable [23].



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



CAPITULO IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS

En el presente capítulo se muestran los resultados obtenidos del análisis de la capacidad de alojamiento del alimentador El Chota I mediante diferentes escenarios de flujos de carga, inyectando diferentes potencias de generación hidroeléctrica como fotovoltaica. El estudio se fundamenta en un análisis de incidencia total utilizando perfiles de carga anual, lo que permite evaluar el comportamiento del sistema bajo condiciones variables de operación.

4.1 Características del alimentador sin generación distribuida

La determinación de los parámetros iniciales se fundamenta en la caracterización técnica del alimentador El Chota I bajo un intervalo de registro anual; para ello, se estableció un escenario base donde la red eléctrica opera de manera radial convencional y la demanda es cubierta íntegramente por la empresa EMELNORTE. Este procedimiento permite obtener los parámetros de estado iniciales del sistema sin la contribución de generación distribuida; por consiguiente, los datos recopilados sirven como marco comparativo para interpretar el impacto de futuras inyecciones de potencia sobre los perfiles de voltaje y las pérdidas de potencia y energía.

A través de esta evaluación, se cuantifica el desempeño de la infraestructura actual; de tal manera que, cualquier variación posterior en los flujos de carga sea atribuible a la integración de las nuevas fuentes de energía, facilitando así un diagnóstico preciso de la capacidad de alojamiento del alimentador.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD

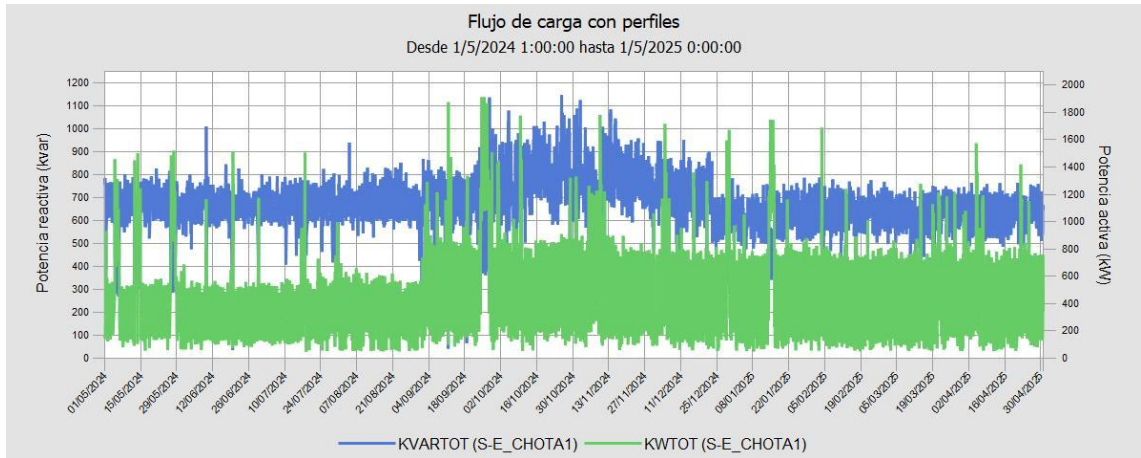


Fig. 7. Perfil de carga sin generación

La evaluación de la red eléctrica en su estado inicial determina que las pérdidas de energía activa alcanzan un valor anual del 15%; este comportamiento técnico se asocia directamente a la topología de un alimentador con características rurales, donde predominan extensas distancias de transporte y la impedancia en los conductores. Dicho porcentaje representa el flujo de potencia requerido para satisfacer la demanda del sector desde un único punto de suministro; por consiguiente, se establece como el umbral de operación, permitiendo contrastar el desempeño del sistema frente a la futura integración de recursos energéticos distribuidos.

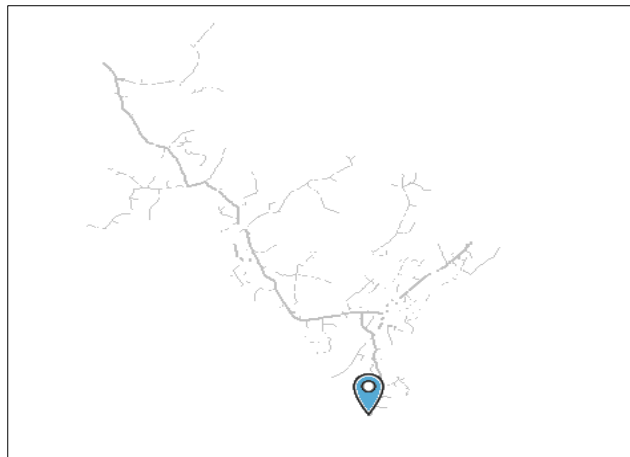


Fig. 8. Ubicación de la cabecera del Alimentador "El Chota I"



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



La potencia reactiva actúa como el soporte técnico indispensable para mantener la estabilidad de voltaje a lo largo del alimentador; en este sentido, su gestión asegura que el transporte de energía eléctrica se realice dentro de los rangos operativos permitidos por ARCONEL.

Las centrales de generación distribuida cuentan con sistemas de regulación de voltaje en sus puntos de interconexión; no obstante, la operación de estas fuentes de generación prioriza la inyección de potencia activa hacia la red eléctrica, dejando la inyección de reactivos bajo la responsabilidad de EMELNORTE. Bajo el escenario de referencia, las pérdidas reactivas se sitúan en el 3,9%; esta condición implica que la subestación debe compensar la totalidad del intercambio de reactivos para sostener la estabilidad del sistema eléctrico.

4.2 Análisis del alimentador con generación real

La evaluación del escenario de operación real integra una central de generación hidroeléctrica de 1 MW conectada al extremo del alimentador El Chota I; esta configuración provoca variaciones significativas en el desempeño de la red eléctrica al situar la fuente de generación distribuida en la zona de mayor caída de voltaje. Las pérdidas de energía activa registran una reducción hasta del 12,7% al inyectar 1 MW; por consiguiente, se evidencia que la generación local compensa el flujo de corriente proveniente desde la subestación y mejora el perfil de voltaje en los tramos más alejados. No obstante, las pérdidas de energía reactiva se elevan hasta el 35,3%; este incremento refleja la demanda de soporte reactivo que el sistema exige para mantener la estabilidad operativa, debido a que la central prioriza la inyección de potencia activa.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD

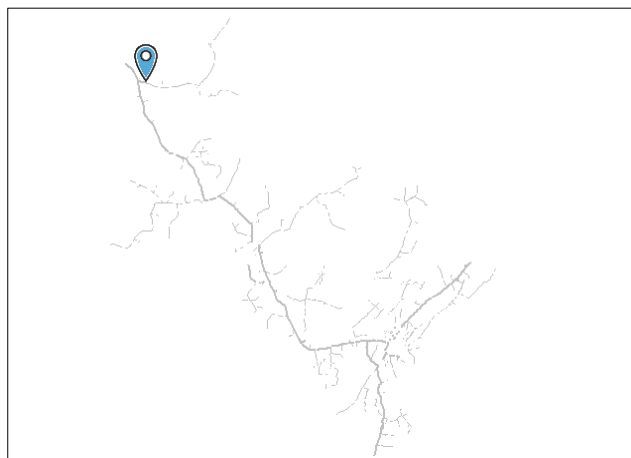


Fig. 9. Ubicación de la generación hidroeléctrica

4.3 Integración de generación hidroeléctrica

En esta sección se evalúa el comportamiento del alimentador ante la incorporación progresiva de potencia proveniente de una central hidroeléctrica ubicada de manera adyacente a la generación existente; se analizan distintos escenarios de inyección con el fin de determinar su impacto en el flujo de potencia, así como en la variación de las pérdidas de energía. Para ello, se han definido seis escenarios de inyección que permiten observar la respuesta del sistema eléctrico bajo diferentes condiciones de operación.

Tabla IV

Nivel de penetración de generación hidroeléctrica y porcentaje de pérdidas de energía activa y reactiva

Nivel de penetración de generación hidroeléctrica [MW]	Pérdidas de energía activa en porcentaje	Pérdidas GWh/año	Pérdidas de energía reactiva en porcentaje	Factor de potencia
0	15,0%	0,8365	3,9%	93,00
0,5	12,9%	0,9855	16,2%	94,57



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



1	12,7%	1,5357	35,3%	99,75
1,5	14,1%	2,2469	56,7%	90,12
2	16,5%	3,5151	87,9%	87,71
3	20,8%	6,5433	156,8%	82,45
4	25,7%	10,2094	349,3%	79,17

Como se aprecia en la Tabla IV, la inyección de 1 MW representa el escenario en el cual se registran las menores pérdidas de energía activa 12,7%, evidenciando una reducción respecto al caso base; este comportamiento se explica porque dicho nivel de generación es absorbido mayoritariamente por la demanda local, lo que disminuye la corriente transportada desde la subestación. A partir de este punto, se observa una tendencia creciente en las pérdidas activas; al alcanzar los 4 MW, estas llegan al 25,7%, como se muestra en la Fig. 10. Este comportamiento se atribuye a que la potencia inyectada supera la demanda del sector en el extremo del alimentador, provocando flujos inversos de potencia; dichos excedentes recorren largos tramos de conductor en sentido contrario hacia la subestación, incrementando la corriente que circula por el conductor y por ende, las pérdidas por efecto Joule.

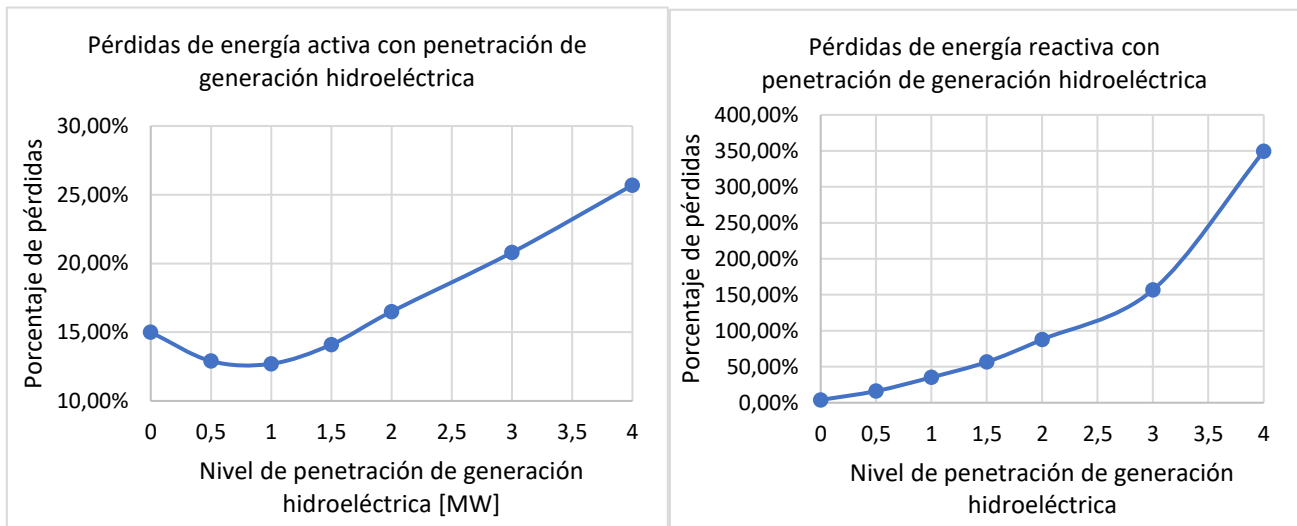


Fig. 10. Curvas de pérdidas de energía activa y reactiva en porcentaje y penetración de generación hidroeléctrica



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



La respuesta del sistema ante la inyección de potencia activa muestra un comportamiento significativo en relación con la necesidad de inyección de reactivos para mantener la estabilidad del sistema eléctrico; mientras que en el caso base las pérdidas reactivas se sitúan en el 3,9%, la incorporación de generación distribuida provoca un incremento considerable, alcanzando valores superiores al 349,3% en el escenario de máxima inyección de 4 MW. Este comportamiento evidencia que, aunque la central aporta potencia activa, se generan alteraciones en los perfiles de voltaje que obligan a la empresa eléctrica EMELNORTE a intensificar la inyección de reactivos para garantizar condiciones adecuadas de operación; al no disponerse de mecanismos de compensación local, la red de distribución asume esta demanda, lo que incrementa la circulación de corriente y eleva de forma desproporcionada las pérdidas asociadas.

En relación con el factor de potencia, se observa una mejora inicial, alcanzando un valor cercano a la unidad (99,75%) para una inyección de 1 MW; en este punto, la generación local satisface de manera equilibrada la demanda activa del alimentador, minimizando el flujo de corriente desde la subestación y estableciendo una condición de operación favorable. Sin embargo, a partir de los 1,5 MW, el factor de potencia presenta una degradación progresiva, descendiendo hasta el 79,17% en el escenario de máxima inyección; este comportamiento es consistente con el incremento en la necesidad de inyección de reactivos, ya que el excedente de potencia activa fluye en sentido inverso hacia la subestación, desequilibrando la relación entre la potencia útil y la potencia total transportada. En este contexto, dicho comportamiento adquiere especial relevancia frente a la regulación ARCONEL 001/24, dado que valores inferiores al 92% evidencian una mayor exigencia de soporte reactivo; esta condición reduce la capacidad de transporte del conductor y compromete la estabilidad del voltaje en el nodo de conexión de la central de generación.

4.4 Integración de generación fotovoltaica

Una vez analizados los escenarios de inyección individual, se desarrolla un análisis comparativo considerando la operación con generación combinada, lo que



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



permite evaluar de manera integral el impacto de la generación distribuida sobre el alimentador El Chota I; este enfoque facilita comprender cómo la ubicación y el tipo de recurso influyen en el desempeño global de la red. Para este propósito, se incorpora una central de generación fotovoltaica en un punto intermedio del alimentador, con el fin de analizar su efecto sobre las pérdidas de energía, así mismo la evaluación de las condiciones de operación del sistema eléctrico.

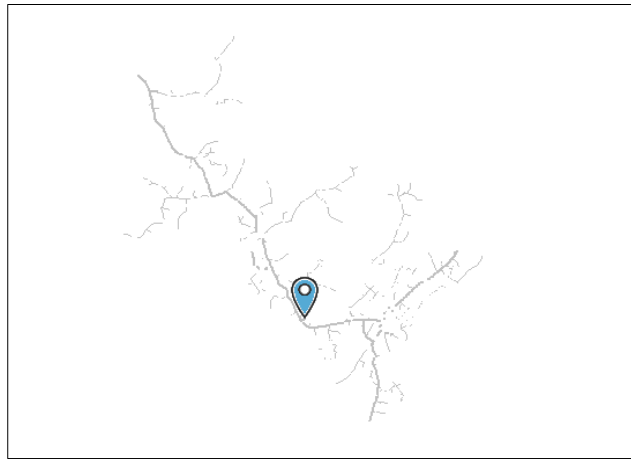


Fig. 11. Ubicación de la generación fotovoltaica

Se han definido ocho escenarios de inyección para analizar la respuesta del sistema en términos de flujo de potencia y su impacto en las pérdidas de energía; en todos los casos se considera la presencia de una central hidroeléctrica de 1 MW ubicada al final del alimentador El Chota I, la cual se mantiene como generación base durante la evaluación.

Tabla V

Nivel de penetración de generación hidroeléctrica, fotovoltaica y porcentaje de pérdidas de energía activa y reactiva

Nivel de penetración de generación fotovoltaica [MW]	Pérdidas de energía	Pérdidas GWh/año	Pérdidas de energía reactiva	Factor de potencia
---	---------------------	------------------	------------------------------	--------------------



	activa en porcentaje		en porcentaje	
0	15,0%	0,8365	3,6%	99,75
0,5	11,5%	1,8953	39,6%	91,48
1	10,0%	2,0797	52,2%	90,26
1,5	9,2%	2,3164	76,1%	87,24
2	8,9%	2,6245	115,7%	85,39
3	8,8%	3,4399	158,7%	81,04
4	9,2%	4,3603	202,0%	78,11
5	10,2%	5,7198	-772,9%	74,56
6	11,8%	7,4559	-155,5%	70,39

El comportamiento del sistema ante la penetración de energía fotovoltaica revela una dinámica compleja entre la reducción de pérdidas de energía activa y la degradación de la estabilidad reactiva; inicialmente, se observa una mejora en la reducción de pérdidas de energía del alimentador al incrementar la potencia de inyección de generación solar, alcanzando un punto de máximo beneficio con una inyección de 3 MW donde las pérdidas porcentuales se reducen al 8,8%. Este fenómeno responde a que la generación intermedia logra cubrir la demanda local de manera balanceada con la central hidroeléctrica del final; sin embargo, a medida que la inyección supera este umbral, el sistema comienza a experimentar un incremento en las pérdidas de energía.

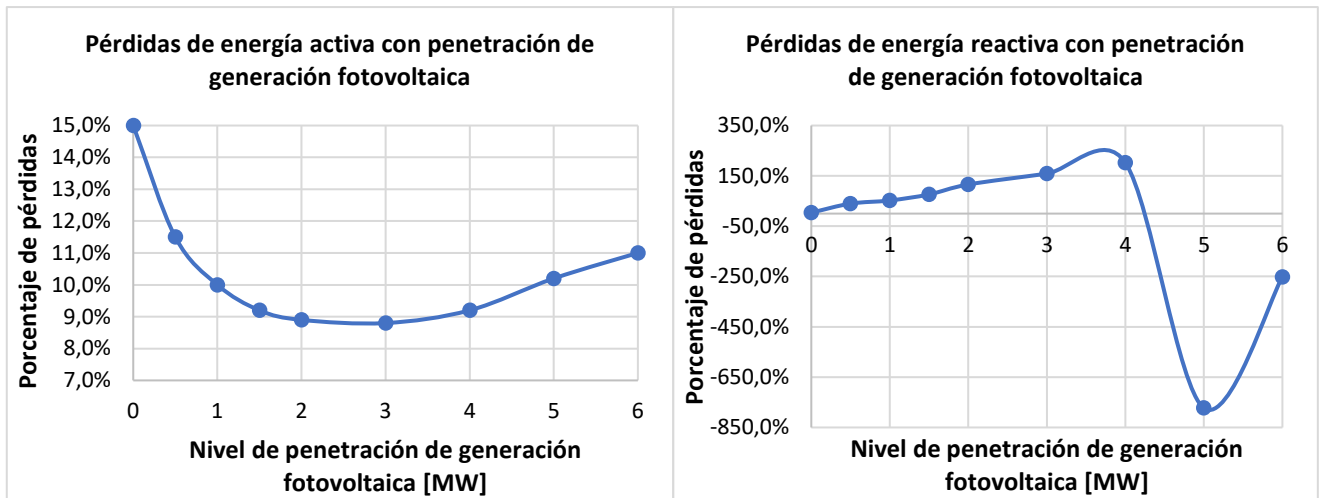


Fig. 12. Curvas de pérdidas de energía activa y reactiva en porcentaje y penetración de generación hidroeléctrica y fotovoltaica

Simultáneamente, el factor de potencia presenta un deterioro crítico que compromete la calidad del servicio, descendiendo de un valor cercano a la unidad de 99,75 hasta niveles deficientes de 70,39 en el escenario de máxima penetración 6 MW; esta caída evidencia una incapacidad del alimentador para gestionar el flujo de potencia reactiva frente al desplazamiento masivo de potencia activa proveniente de las fuentes renovables. La situación alcanza un estado de inestabilidad técnica absoluta al llegar a los 5 y 6 MW, donde los valores de pérdidas reactivas muestran comportamientos anómalos y negativos, como el registro de -772,9%; estos datos no representan una operación real, sino que simbolizan el colapso del flujo de potencia y la pérdida de convergencia del sistema eléctrico, marcando el de inyección para la infraestructura actual del alimentador El Chota I.

4.5 Análisis de respuesta bajo inyección de potencia instantánea

Al evaluar el comportamiento del sistema bajo el aporte de la central de generación hidroeléctrica, se observa que la ubicación al final del alimentador juega un papel determinante en el comportamiento del perfil de voltajes; en las condiciones reales de operación de 1 MW, el sistema presenta un desempeño equilibrado donde el factor de



potencia alcanza su punto más alto con un valor de 99,75. Bajo esta configuración de potencia nominal, las pérdidas registradas son del 15,16%, lo que representa el estado técnico base para el funcionamiento habitual del alimentador El Chota I; sin embargo, al intentar elevar la potencia inyectada hacia los 4 MW, la red experimenta un incremento de las pérdidas de potencia hasta un 55,26% y reduciendo el factor de potencia a 79,17, lo que evidencia una incapacidad de la infraestructura para transportar flujos elevados desde el extremo final de la línea.

Tabla VI

Nivel de penetración de generación hidroeléctrica y porcentaje de pérdidas de potencia activa y factor de potencia

Nivel de penetración de generación hidroeléctrica [MW]	Energía entregada por la cabecera en kW	Energía entregada por la generación distribuida en kW	Producción total en kW	Pérdidas totales	Porcentaje	Factor de potencia
0	1153,20	0	1153,20	99,52	8,62%	93,16
0,5	633,91	535,5	1169,41	107,73	9,21%	94,57
1	199,03	1050	1249,03	189,38	15,16%	99,75
1,5	-170,24	1530	1359,76	298,08	21,92%	90,12
2	-657,69	2125	1467,31	405,63	27,64%	87,71
3	-1349,75	3230	1880,25	818,57	43,54%	82,45
4	-1743,25	4207,5	2464,25	1361,83	55,26%	79,17

Por otro lado, la inyección de potencia proveniente de la fuente fotovoltaica en un punto intermedio introduce un comportamiento distinto en la gestión de reactivos de la red; el incremento gradual de la potencia activa provoca un aumento en las pérdidas totales de potencia, las cuales escalan desde un 16,19% con 0,5 MW hasta un nivel de 60,26% al alcanzar los 6 MW. Este comportamiento demuestra que, a pesar de la



ubicación geográfica de la central, la red carece de la robustez necesaria para evacuar grandes excedentes de potencia activa sin generar caídas de voltaje.

Tabla VII

Nivel de penetración de generación hidroeléctrica, fotovoltaica y porcentaje de pérdidas de potencia activa y factor de potencia

Nivel de penetración de generación fotovoltaica [MW]	Energía entregada por la cabecera	Energía entregada por la generación distribuida	Producción total	Pérdidas totales	Porcentaje	Factor de potencia
0	199,03	1050	1249,03	189,38	15,16%	99,75
0,5	-288,78	1555,5	1266,72	205,04	16,19%	91,48
1	-597,71	1887,3	1289,59	227,91	17,67%	90,26
1,5	-1180,84	2550	1369,16	307,48	22,46%	87,24
2	-1612,48	3020	1407,52	345,84	24,57%	85,39
3	-2398,11	3952,5	1554,39	492,72	31,70%	81,04
4	-3084,37	4820	1735,63	673,95	38,83%	78,11
5	-3840,99	5820	1979,01	917,33	46,35%	74,56
6	-4148,67	6820	2671,33	1609,65	60,26%	70,39

La interacción entre la potencia activa inyectada y el factor de potencia revela el límite operativo para el sistema; se identifica una correlación inversa donde, a mayor inyección de potencia desde fuentes renovables, el factor de potencia sufre un deterioro que compromete la calidad del suministro; esta situación indica que la demanda de potencia reactiva aumenta de forma desmedida para compensar el flujo masivo de potencia activa, lo que eventualmente conduce a la inestabilidad técnica observada en los niveles de inyección más elevados.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



Es fundamental precisar que este estudio de potencia instantánea posee una relevancia limitada al momento de definir la capacidad de alojamiento final del alimentador; este análisis se limita a describir un estado estacionario del sistema bajo condiciones de carga y generación fijas, por lo que no considera el comportamiento completo ni las curvas de generación características de cada fuente a lo largo del día.

Dado que la producción hidroeléctrica y fotovoltaica presentan variabilidades estacionales y horarias distintas, la capacidad de alojamiento debe fundamentarse en un análisis dinámico que integre estas fluctuaciones; por consiguiente, los resultados obtenidos en este apartado sirven como una referencia de los límites físicos de la infraestructura, pero no sustituyen la evaluación integral de la energía y la demanda en el tiempo.

4.6 Determinación de la capacidad de Alojamiento (Hosting Capacity) del Alimentador El Chota I

Para determinar la capacidad de alojamiento del alimentador El Chota I, es fundamental contrastar el comportamiento del sistema bajo la influencia exclusiva de la central hidroeléctrica frente a la complejidad que introduce la generación híbrida; este análisis permite identificar cómo la naturaleza de cada recurso y su ubicación geográfica alteran los límites operativos de la red eléctrica sin comprometer su estabilidad.

Bajo la configuración actual del sistema, la central hidroeléctrica de 1 MW, ubicada al final del alimentador, contribuye favorablemente al sostenimiento del perfil de voltaje en los nodos más alejados de la subestación; en estas condiciones, el sistema presenta un factor de potencia de 0,9975, lo que evidencia una adecuada gestión de la potencia reactiva por parte de las cargas.

No obstante, al integrar la generación fotovoltaica en un punto intermedio, el flujo de potencia presenta variaciones que modifican el comportamiento técnico del sistema; si bien se registra una disminución en las pérdidas de energía hasta un valor de 8,8% con una inyección solar de 3 MW, este fenómeno se manifiesta de forma simultánea con un



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



deterioro pronunciado de la calidad del perfil de reactivos. A medida que la potencia fotovoltaica aumenta, el factor de potencia desciende; esta situación evidencia que la red pierde su capacidad de administración su perfil de voltajes frente al desplazamiento masivo de potencia activa, provocando que las pérdidas reactivas se incrementen de forma desmedida hasta superar los límites de diseño operativo del alimentador.

La capacidad de alojamiento se establece finalmente bajo el criterio de mantener condiciones normales de operación, priorizando la estabilidad del factor de potencia sobre la reducción porcentual de pérdidas; mientras que el sistema gestiona adecuadamente el 1 MW de la base hidroeléctrica, la adición de potencia solar encuentra su límite técnico en el rango de los 0,5 a 1 MW. Superar este umbral implica que el factor de potencia caiga por debajo de 0,90, aproximando al sistema a una zona de vulnerabilidad donde el flujo de potencia deja de ser estable; por consiguiente, se define que la capacidad de alojamiento total para el alimentador no debe exceder los 2 MW combinados, puesto que valores superiores derivan en la pérdida de convergencia y el incumplimiento técnico registrado en los niveles de máxima penetración de potencia activa.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



Conclusiones

- Se identificó que la generación distribuida en el alimentador El Chota 1, específicamente la central hidroeléctrica de 1 MW ubicada al final de la línea, reduce las pérdidas de potencia y energía; esto favorece la estabilidad del perfil de voltaje en condiciones normales de operación.
- El modelado del alimentador mediante simulaciones de flujo de carga con perfiles reales anuales permitió evidenciar el impacto de la variabilidad fotovoltaica en el alimentador. Los resultados identifican al factor de potencia como el indicador principal de desempeño técnico frente al incremento en los niveles de inyección de potencia.
- El análisis de integración de generación distribuida en el alimentador El Chota 1 establece una capacidad de alojamiento de 1 MW fotovoltaico adicional; esta se integra de forma complementaria a la generación hidroeléctrica actual. Dicho nivel asegura que el voltaje se mantenga dentro de los límites técnicos permitidos, preservando la estabilidad operativa sin exceder las restricciones del sistema.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



Recomendaciones

- Se sugiere profundizar en el estudio de tecnologías para el control de la inyección de potencia reactiva en el alimentador el Chota I para integrar mayores cantidades de generación distribuida; esto permitiría gestionar el incremento de la demanda de reactivos identificado en esta investigación y favorecer una mayor capacidad de alojamiento en el futuro sin la necesidad de reemplazar conductores.
- Se recomienda la aplicación de modelos de simulación basados en perfiles anuales de carga y generación para investigar la capacidad de alojamiento en la totalidad de los nodos del alimentador; este enfoque permitirá determinar con precisión la respuesta de la red ante diversos escenarios de penetración.



Referencias bibliográficas.

- [1] IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces, IEEE Std 1547-2018, 2018.
- [2] Z. M. Zenhom, S. H. E. Abdel Aleem, E. Aboul Zahab, y T. A. Boghdady, "Simultaneous distributed generation and electric vehicles hosting capacity enhancement through a synergetic hierarchical bilevel optimization approach based on demand response and Volt/VAR control," *Scientific Reports*, vol. 15, no. 1, p. 5443, 2025, doi: 10.1038/s41598-025-88635-8.
- [3] K. Loji, S. Sharma, G. Sharma, y T. Rawat, "Multiobjective distribution system operation with demand response to optimize solar hosting capacity, voltage deviation index and network loss," *Scientific Reports*, vol. 15, no. 1, p. 300, 2025, doi: 10.1038/s41598-024-82379-7.
- [4] L. Chen, Y. Wang, H. Zhang, y X. Li, "Synergistic integration of electric vehicles and renewable energy in smart grids: A techno-economic analysis," *Applied Energy*, vol. 358, p. 125281, 2025, doi: 10.1016/j.apenergy.2025.125281.
- [5] ARCONEL, Normativa Técnica para la Conexión de Generación Distribuida a las Redes de Distribución Eléctrica, Regulación 009-24, 2024.
- [6] K. Li et al., "Machine Learning-Based Coordinated Control for Loss Reduction in High-PV-Penetration Distribution Networks," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 15, no. 1, pp. 512–525, 2024.
- [7] A. Gupta y R. Fernández, "Dynamic Hosting Capacity Assessment via Hybrid Stochastic-Sensitivity Analysis in Unbalanced Distribution Grids," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 23456–23471, 2024.
- [8] M. Torres et al., "Reactive Power Compensation in Rural Feeders: A Case Study for Hosting Capacity Enhancement," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 22, no. 3, pp. 401–410, 2024.
- [9] S. Yamamoto y T. Nakano, "EMT Simulation Frameworks for Transient Stability Analysis in Renewable-Rich Microgrids," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 39, no. 2, pp. 987–1001, 2024.
- [10] Wang, X. Xing, Z. Fu, C. Hai, H. Liu, y Q. Wang, "Feasible region analysis of PV hosting capacity in active distribution networks via a two-stage



optimization approach," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 242, art. no. 111446, ene. 2025, doi: [10.1016/j.epsr.2025.111446](https://doi.org/10.1016/j.epsr.2025.111446).

- [11] H. M. A. Antunes, H. R. Torquato, J. M. S. Callegari, L. S. Araujo, y D. I. Brandao, "Hosting-Capacity Improvement Using Rooftop Photovoltaics and Decentralized BESS in Low Voltage Grids," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 67288–67300, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3560484.
- [12] T. Tavares de Oliveira, M. H. J. Bollen, y N. Etherden, "A hosting capacity based approach toward distribution system planning for high PV penetration," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 238, art. no. 111138, 2025, doi: 10.1016/j.epsr.2024.111138.
- [13] A. Benzerga, A. Bahmanyar, G. Derval, y D. Ernst, "A Unified Definition of Hosting Capacity, Applications, and Review," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 7819–7836, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3521223.
- [14] N. Shabbir et al., "Enhancing PV hosting capacity and mitigating congestion in distribution networks with deep learning based PV forecasting and battery management," *Applied Energy*, vol. 372, p. 123770, 2024, doi: [10.1016/j.apenergy.2024.123770](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123770).
- [15] C. D. W. Wanninayaka Mudiyansele et al., "Probabilistic Coupled EV-PV Hosting Capacity Analysis in LV Networks with Spatio-temporal Modelling and Copula Theory," *IET Smart Grid*, vol. 7, no. 6, pp. 917–928, 2024, doi: 10.1049/stg2.12189.
- [16] H. H. H. Mousa et al., "Comprehensive Review on Recent Developments of HC Estimation and Optimization," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 18559-18570, 2024.
- [17] V. H. Cholota Hurtado, *Impacto de la Generación Distribuida en Redes de Distribución, Aplicación Central Hidroeléctrica Mira*. Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2014.
- [18] ARCONEL. (2024). Normativa para la Calidad del Servicio de Energía Eléctrica (Regulación 010-24).
- [19] ARCONEL. (2024). Normativa para la Planificación de los Sistemas de Distribución Eléctrica (Regulación 006-24).
- [20] Eaton - CYME International, *CYME Power Engineering Software: Reference Manual*, Montreal, Canada: Eaton, 2023.



- [21] S. M. Ismael, S. H. A. Aleem, A. Y. Abdelaziz, and A. F. Zobaa, "State-of-the-art of hosting capacity in modern power systems with distributed generation," *Renewable Energy Focus*, vol. 30, pp. 100-110, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.ref.2019.03.004.
- [22] E. Mulenga, M. H. Bollen, and N. Etherden, "A review of hosting capacity quantification methods for photovoltaics in low-voltage networks," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 153510-153534, Aug. 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3018621.
- [23] R. Bansal and G. Saini, "Hosting capacity of distribution networks: A review," *International Journal of Renewable Energy Research*, vol. 10, no. 1, pp. 320-330, Mar. 2020.
- [24] Asamblea Nacional de la República del Ecuador, *Ley Orgánica del Servicio Público de Energía Eléctrica (LOSPEE)*, Registro Oficial 418, última reforma 2024.
- [25] M. D. Castellanos-Campana, W. A. Hidalgo-Osorio, and P. J. Vasquez-Carrera, "Impacto de la sobrecarga de Energía Reactiva en Sistemas Fotovoltaicos conectados a la Red," *Polo del Conocimiento*, vol. 9, no. 7, pp. 804-817, Jul. 2024.