



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

## DIRECCIÓN DE POSGRADO

### MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD

#### MODALIDAD: INFORME DE INVESTIGACIÓN

**Título:**

**Evaluación de la capacidad de alojamiento de paneles fotovoltaicos en la red de distribución de líneas primarias usando OpenDSS en el alimentador Chimbo de la subestación Guaranda de la Unidad de Negocio Bolívar CNEL EP**

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de magister en Electricidad mención Sistemas Eléctricos de Potencia

**Autor:**

Ing. Edwin David Pazmiño Gavilanes

**Tutor**

Ing. Jefferson Alberto Porras Reyes MSc

**LATACUNGA - ECUADOR**

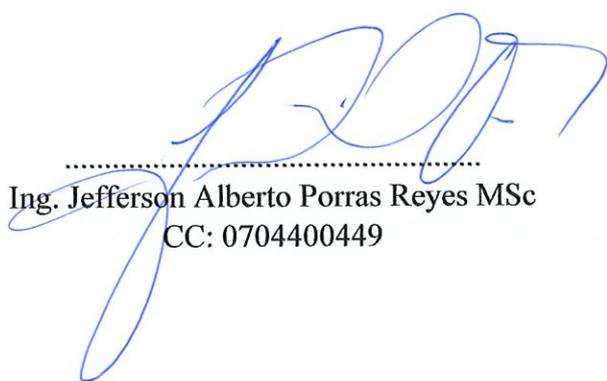
## **APROBACIÓN DEL TUTOR**

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Titulación “Evaluación de la capacidad de alojamiento de paneles fotovoltaicos en la red de distribución de líneas primarias usando OpenDSS en el alimentador Chimbo de la subestación Guaranda de la unidad de negocio Bolívar CNEL EP.” presentado por Ing. Edwin David Pazmiño Gavilanes, para optar por el título magister en Electricidad mención Sistemas Eléctricos de Potencia.

### **CERTIFICO**

Que dicho trabajo de investigación ha sido revisado en todas sus partes y se considera que reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación para la valoración por parte del Tribunal de Lectores que se designe y su exposición y defensa pública.

Latacunga, julio, 17, 2023



.....  
Ing. Jefferson Alberto Porras Reyes MSc  
CC: 0704400449

## APROBACION DEL TRIBUNAL

El trabajo de Titulación: **Evaluación de la capacidad de alojamiento de paneles fotovoltaicos en la red de distribución de líneas primarias usando OpenDSS en el alimentador Chimbo de la subestación Guaranda de la unidad de negocio Bolívar CNEL EP**, ha sido revisado, aprobado y autorizada su impresión y empastado, previo a la obtención del título de Magíster en Electricidad mención Sistemas Eléctricos de Potencia; el presente trabajo reúne los requisitos de fondo y forma para que el estudiante pueda presentarse a la exposición y defensa.

Latacunga, julio, 17, 2023



.....  
Ing. Marco Aníbal León Segovia MSc  
CC: 0502305402  
Presidente del tribunal



.....  
Ing. Jimmy Xavier Toaza Iza MSc  
CC: 1717621062  
Lector 2



.....  
Ing. Carlos Francisco Pacheco Mena MSc  
CC: 0503072902  
Lector 3

## DEDICATORIA

Dedicado a mis hijos y esposa  
de manera incondicional por todo  
el apoyo brindado para  
poder concluir con mi trabajo de  
investigación  
Ing. Edwin David Pazmiño Gavilanes

## AGRADECIMIENTO

Gracias a Dios y a mi familia su ayuda  
de manera incondicional por todo  
la motivación para poder  
concluir con mi trabajo de  
investigación  
Ing. Edwin David Pazmiño Gavilanes

## RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Quien suscribe, declara que asume la autoría de los contenidos y los resultados obtenidos en el presente Trabajo de Titulación.

Latacunga, julio, 17, 2023



.....  
Ing. Edwin David Pazmiño Gavilanes  
CC: 0502670821

## RENUNCIA DE DERECHOS

Quien suscribe, cede los derechos de autoría intelectual total y/o parcial del presente trabajo de titulación a la Universidad Técnica de Cotopaxi.

Latacunga, julio, 17, 2023



.....  
Ing. Edwin David Pazmiño Gavilanes  
CC: 0502670821

## **AVAL DEL PRESIDENTE**

Quien suscribe, declara que el presente Trabajo de Titulación: **Evaluación de la capacidad de alojamiento de paneles fotovoltaicos en la red de distribución de líneas primarias usando OpenDSS en el alimentador Chimbo de la subestación Guaranda de la unidad de negocio Bolívar CNEL EP**, contiene las correcciones a las observaciones realizadas por los miembros del tribunal en la predefensa.

Latacunga, julio, 17, 2023



.....  
Ing. Marco Aníbal León Segovia MSc

CC: 0502305402

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI  
DIRECCIÓN DE POSGRADO**

**MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD MENCIÓN SISTEMAS  
ELÉCTRICOS DE POTENCIA**

**Título: Evaluación de la capacidad de alojamiento de paneles fotovoltaicos en la red de distribución de líneas primarias usando OpenDSS en el alimentador Chimbo de la subestación Guaranda de la Unidad de Negocio Bolívar CNEL EP**

**Autor: Ing. Edwin David Pazmiño Gavilanes  
Tutor: Ing. Jefferson Alberto Porras Reyes MSc**

**RESUMEN**

La reducción del efecto invernadero como es el CO<sub>2</sub>, ha hecho que muchos países tomen alternativas para reducir el impacto ambiental guiado por los objetivos de la agenda 2030, debido a esto, las redes eléctricas de potencia y de distribución están cambiando el modo de operación y planificación, donde estas, deben considerar el ingreso masivo de energías renovables como paneles fotovoltaicos, generadores eólicos y vehículo eléctricos. El ingreso de este tipos de tecnologías puede ocasionar, voltajes fuera de limite permitido, fluctuaciones, cargabilidad, flujos inversos, disparo simpático, aumento de las corrientes de fallas, entre otras. Por lo tanto, se debe realizar una evaluación de porcentaje de ingreso de fuentes renovables. De esta manera, en nuestra investigación se realiza una evaluación de la capacidad de alojamiento de paneles fotovoltaicos en la red de distribución de líneas primarias y secundarias usando OpenDSS en el alimentador Chimbo de la subestación Guaranda de la unidad de negocio Bolívar CNEL EP. Para ello se presenta dos metodologías la primera evalua la capacidad máxima de ingreso de paneles fotovoltaicos en porcentaje y la segunda metodología es para realizar un control de potencia reactiva-voltaje mediante un modelo de optimización que permita ingresar hasta el 100% de paneles fotovoltaicos en la red sin exceder los limites de calidad de energía permitidos en la normativa nacional. Los resultados con la primera metodología

arrojan que el 48 % (3305 paneles) es límite de ingreso máximo de paneles fotovoltaicos en el alimentador Guaranda Chimbo y aplicando la segunda metodología se puede ingresar el 100 % (6887 paneles).

**PALABRAS CLAVE:** Capacidad de alojamiento, paneles fotovoltaicos, perfil de voltaje, red eléctrica de distribución, demanda eléctrica e irradiación solar.

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI  
DIRECCIÓN DE POSGRADO**

**MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD MENCIÓN SISTEMAS  
ELÉCTRICOS DE POTENCIA**

**Title: Evaluation of the accommodation capacity of photovoltaic panels in the distribution network of primary lines using OpenDSS in the chimbo feeder of the Guaranda substation of the Bolívar CNEL EP business unit.**

**Autor:** Ing. Edwin David Pazmiño Gavilanes

**Tutor:** Ing. Jefferson Alberto Porras Reyes MSc

**ABSTRACT**

The reduction of the greenhouse effect such as CO<sub>2</sub>, has made many countries take alternatives to reduce the environmental impact guided by the objectives of the 2030 diary. Due to this, the electrical power system and mostly distribution networks are changing the mode of operation and planning, where these must consider the massive income of renewable energy such as photovoltaic panels, wind generators and electric vehicles. The entry of this type of technology can cause voltages outside the permitted limit, fluctuations, chargeability, reverse flows, sympathetic firing, increased fault currents, etc. Therefore, an assessment of the percentage of income from renewable sources must be carried out. In this way, in our investigation an evaluation of the accommodation capacity of photovoltaic panels in the distribution network of primary and secondary lines is carried out using OpenDSS in the Chimbo feeder of the Guaranda substation of the Bolívar CNEL EP business unit. For this, two methodologies are presented, the first one evaluates the maximum input capacity of photovoltaic panels in percentage and the second methodology is to carry out a reactive power-voltage control through an optimization model that allows up to 100 % of photovoltaic panels to enter the network without exceeding the limits of energy quality allowed in national regulations. The results with the first methodology show that 48 % (3305 photovoltaic panels) is the maximum

income limit for the Guaranda Chimbo feeder and applying the second methodology, 100 % (6887 photovoltaic panels ) can be entered.

**KEYWORD:** Hosting capacity, photovoltaic panels, voltage profile, electrical distribution network, electrical demand and solar irradiation.

Yo **Lcda. Mirella Magaly Pazmiño Gavilanez** con cédula de identidad número **0503150088**, licenciada en Ciencia de la Educación mención Inglés con número de registro de la SENESCYT **1020-08-868155**; CERTIFICO haber revisado y aprobado la traducción al idioma inglés del resumen del trabajo de investigación con el título: **Evaluación de la capacidad de alojamiento de paneles fotovoltaicos en la red de distribución de líneas primarias usando OpenDSS en el alimentador Chimbo de la subestación Guaranda de la Unidad de Negocio Bolívar CNEL EP de Ing. Edwin David Pazmiño Gavilanes** aspirante a magister en Electricidad mención Sistemas Eléctricos de Potencia.

Latacunga, julio, 17, 2023



Lcda. Mirella Magaly Pazmiño Gavilanez  
CC: 0503150088

# Índice

---

<b>1. INFORMACIÓN GENERAL</b>	<b>2</b>
<b>2. INTRODUCCIÓN</b>	<b>2</b>
<b>3. MATERIALES Y MÉTODOS</b>	<b>5</b>
3.1. Descripción General . . . . .	5
3.2. Descripción del alimentador Guaranda - Chimbo . . . . .	5
3.3. Red equivalente o fuente thevenin . . . . .	5
3.4. Líneas de distribución . . . . .	6
3.5. Demanda Eléctrica . . . . .	7
3.6. Datos irradiación solar . . . . .	8
<b>4. METODOLOGÍA</b>	<b>8</b>
4.1. Metodología 1 . . . . .	9
4.2. Metodología 2 . . . . .	10
<b>5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>13</b>
5.1. Resultados y discusión de la metodología 1 . . . . .	13
5.2. Resultados y discusión de la metodología 2 . . . . .	15
5.3. Metodología 1 alimentador Guaranda Chimbo . . . . .	15
5.4. Metodología 2 alimentador Guaranda Chimbo . . . . .	16
<b>6. CONCLUSIONES</b>	<b>19</b>
<b>7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>20</b>

# 1. INFORMACIÓN GENERAL

Título del Proyecto:	Evaluación de la capacidad de alojamiento de paneles fotovoltaicos en la red de distribución de líneas primarias usando OpenDSS en el alimentador Chimbo de la subestación Guaranda de la Unidad de Negocio Bolívar CNEL EP
Línea de investigación:	Energías alternativas y renovables, eficiencia energética y protección ambiental
Proyecto de investigación asociado:	Desarrollo de sistemas eficientes para el abastecimiento y uso de energía eléctrica a nivel local, regional o nacional
Grupo de Investigación:	Sistemas Eléctricos de Potencia
Red nacional o internacional:	Intituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos IEEE

# 2. INTRODUCCIÓN

El constante cambio de la tecnología y el compromiso para reducción de la emisiones de efecto invernadero con el fin de cumplir la agenda 2030 [1], han hecho que los paneles fotovoltaicos y generadores eólicos sean mas eficiente y económicos. Por consiguiente, la Agencia de Regulación y Control de Energías y Recursos Naturales no Renovables ARCERNNR aprueba la resolución Nro. ARCERNNR-001/2021 correspondiente al Marco normativo de la Generación Distribuida para autoabastecimiento de consumidores regulados de energía eléctrica [2]. Por lo tanto, existe una alta probabilidad que los usuarios regulados y no regulados instalen paneles fotovoltaicos a lo largo del alimentador y aparezcan los problemas tales como: sobrevoltajes, desbalances, armónicos, flujos en dos direcciones, disparo simpático, aumento de niveles de cortocircuito, entre otros. Por lo que, en este documento se realiza la evaluación del ingreso de capacidad de potencia de paneles fotovoltaicos mediante dos metodologías que ayuden al análisis de voltajes en los nodos, potencia por las líneas y corrientes en red eléctrica de distribución del alimentador Guaranda-Chimbo de la subestación Guaranda perteneciente a la CNEL EP BOLIVAR con el fin de controlar el ingreso masivo de paneles fotovoltaicos cumpliendo con la normativa de calidad de energía Nro. ARCERNNR-002/20.

A través de este estudio, se pretende analizar en profundidad los problemas que tiene la red eléctrica cuando exista el ingreso masivo de paneles fotovoltaicos en el alimentador Chimbo, al ser energías renovables estas ayuda a proteger el medio ambiente y su ecosistema, ya que, si aumenta la generación distribuida fotovoltaica o eólica la generación convencional principalmente las centrales eléctricas térmicas disminuirá y reduciría las emisiones de efecto invernadero o CO<sub>2</sub> , salvo la introducción de células solares, así como también ayuda a reducir pérdidas técnicas en la red eléctrica de distribución [3].

Para abordar el problema de ingreso masivo de generadores fotovoltaicos en la red eléctrica realizan un teorema de la capacidad de alojamiento para determinar la cantidad de capacidad de generación fotovoltaica distribuida para cada cliente con seguridad y protección [4], esta Metodología de Capacidad de Alojamiento consiste en instalar Fotovoltaica en cliente a cliente con la máxima capacidad sin sobrepasar el límite del sistema. No obstante, como los paneles fotovoltaicos depende de la irradiación solar que es variable durante el día y condiciones del clima en [5] propone un enfoque probabilístico para determinar el impacto de la reducción de energía fotovoltaica en la mejora de la capacidad de alojamiento de un circuito de distribución en diferentes ubicaciones de integración. Por consiguiente, existen esfuerzos por parte de las empresas eléctricas de distribución para determinar la capacidad de alojamiento en sus redes en [6] realizan un enfoque de planificación probabilística que aumenta la capacidad de alojamiento de la energía fotovoltaica mientras se acepta una reducción de energía activa, realizada con el control  $P(U)$  del inversor fotovoltaico, por períodos cortos de tiempo. En [7] compara diferentes métodos para asignar la capacidad fotovoltaica futura en función del análisis del potencial solar a nivel del sistema de distribución. Se desarrollan métodos basados en reglas y se comparan con un método probabilístico, que se repite varias veces como un análisis de Monte Carlo. A si mismo, para definir la asignación de energía fotovoltaica a los nodos de la red, en [8] propone un método estocástico para calcular la capacidad de alojamiento de generación distribuido para paneles fotovoltaicos al mismo tiempo que garantiza que no se violen los requisitos de voltaje, el método propuesto toma en cuenta las cargas de vehículos eléctricos. Como los paneles fotovoltaicos la electrónica de potencia como interfaz para conectarse a la red eléctrica en [9] propone un nuevo enfoque para estimar una capacidad de alojamiento seguro en términos de distorsión armónica, considerando límites estándar para tensiones y corrientes armónicas. Se muestra que los armónicos triples y los armónicos pares son los órdenes armónicos que determinan la capacidad total de alojamiento. Así mismo, las redes eléctricas de distribución están compuesta por redes primaria y secundarias y en [10] desarrolla una metodología que determina la capacidad de alojamiento de energía solar fotovoltaica de una red de distribución considerando el efecto entre las interacciones de la red de MT y BT a diferentes niveles de

voltaje utilizando un enfoque integral que incluía características completas de modelado de redes de BT. En [11] describe una solución novedosa para calcular el capacidad de alojamiento sobre la base del riesgo de congestión de la red. Además de las restricciones clásicas de voltaje y corriente, el enfoque propuesto también integra la asignación estocástica de la generación distribuida y evalúa por separado su impacto en el valor de capacidad de alojamiento. En [12] propone un método de estimación agnóstico de topología para la capacidad de alojamiento fotovoltaico de las redes de distribución, este método utiliza la resistencia de la ruta directa desde el bus de slack hasta el cliente y una topología supuesta para evitar un conocimiento completo sobre la topología de la red. Usando una topología supuesta, se obtiene una estimación de la capacidad de alojamiento de sobretensión mínima para cada nivel de penetración y la capacidad de alojamiento de sobrecarga del transformador para cualquier combinación de clientes que tengan paneles fotovoltaicos. La inclusión de paneles solares requiere de modelos matemáticos de optimización en este sentido en [13] propone un método de asignación de PV basado en la capacidad óptima para evaluar la capacidad de alojamiento de PV, primero usamos el método de asignación de carga para asignar perfiles de carga realistas a cada nodo de carga hasta cada hogar, en lugar de asignar aleatoriamente la capacidad instalada de energía fotovoltaica a cada hogar, segundo se calcula el tamaño óptimo de energía fotovoltaica para cada casa en función de los perfiles de carga anuales. En [14] propone un método de evaluación de máxima capacidad de alojamiento teniendo en cuenta el funcionamiento óptimo y sólido de los cambiadores de tomas bajo carga (OLTC) y los compensadores de var estáticos en el contexto incierto de las salidas de potencia de la generación distribuida y los consumos de carga. En [15] se desarrolla un nuevo algoritmo multietapa basado en un enfoque analítico y un flujo de potencia óptimo para la evaluación de la capacidad de alojamiento de los generación distribuida renovable. En la primera etapa, las ubicaciones óptimas de los generación distribuida renovable se determinan analíticamente, y la segunda etapa involucra el cálculo de los tamaños óptimos de los generación distribuida renovable para la evaluación de la capacidad de alojamiento óptimo. Dentro de las investigaciones vista previamente no se abarca las estrategias de control de inversor y reguladores de voltaje para el ingreso masivo de fuentes de energía renovables en la redes eléctricas de distribución.

El ingreso de los paneles fotovoltaico a la red eléctrica de distribución es de naturaleza aleatoria debido a la variabilidad de la energía primaria y al conocimiento incierto de instalación de los usuarios. Esto hace que el análisis se realice utilizando métodos estocásticos. Por lo tanto, en nuestra investigación se propone evaluar las variables de estado del sistema con el ingreso de paneles fotovoltaicos utilizando el método aleatorios de perfiles de carga e irradiación solar y posterior a ello se realiza una estrategia de control

en el inversor de potencia voltaje con un método de optimización matemática. Para ello se utiliza, el software OpenDSS que permite modelar la red eléctrica de distribución [16] y la plataforma de python para la interfaz y manejo de datos [17] conjuntamente con pyomo y el solver knitro.

El resto de este documento es organizado de la siguiente manera. En primer lugar, se presentan los datos generales del alimentador Guaranda-Chimbo de la empresa CNEL-BOLIVAR. Posteriormente se explican la metodología utilizada. Luego se presentan los resultados y discusión. Finalmente se detalla información adicional a ser considerada, luego de lo cual se presentan las conclusiones y recomendaciones.

### **3. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1. Descripción General**

La empresa CNEL - EP Bolívar cuenta con 6 subestaciones para cubrir toda la provincia de Bolívar, subestación Guaranda con capacidad de 15 MVA, Guanujo con capacidad 12,5 MVA, Echandia con capacidad de 12,5 MVA, Cochapamba con capacidad de 12,5 MVA, Sicoto con capacidad 12,5 MVA, y Caluma con capacidad de 6,25 MVA. El centro de control se encuentra en a la subestación Guaranda donde se realiza las operaciones de control monitoreo y supervisión mediante el sistema SCADA a las subestaciones restantes, esta subestación de 69/13.8 kV y 15 MVA, tiene tres alimentadores Guaranda-Vinchoa, Guaranda - Cdla 1 de mayo y Guaranda - Chimbo. Por consiguiente, el alimentador Guaranda - Chimbo tiene mayor densidad de población, por lo que nuestro estudio se enfoca directamente al modelado en openDSS de este alimentador.

#### **3.2. Descripción del alimentador Guaranda - Chimbo**

El alimentador Guaranda - Chimbo tiene una densidad de población grande, que hace factible el estudio para el análisis de las variables de estado de la red cuando ingresan generadores distribuidos tipo paneles fotovoltaicos a lo largo de la red, en la tabla 1 se muestra el resumen de los elementos principales tanto monofásico y trifásico.

#### **3.3. Red equivalente o fuente thevenin**

La fuente de thevenin o red equivalente puede sustituir toda red aguas arribas, mediante una fuente de tensión en serie con una impedancia, para obtener el equivalente de red en la subestación Guaranda se realiza lo siguiente.

Cuadro 1: Datos del alimentador

Objeto	Número
Clientes	6887
Transformadores trifásicos	72
Transformadores monofásicos	496
Luminarias	3381
Seccionadores	14
Seccionador fusible	519
Nodos	6641

- Cortocircuito trifásico. - Para obtener la potencia aparente de cortocircuito, resistencia y reactancia de secuencia positiva.
- Cortocircuito monofásico. - Para obtener la resistencia y reactancia de secuencia cero y reactancia de secuencia positiva.
- Voltaje y ángulo. - Para obtener el voltaje y ángulo en la barra de la subestación.

La red equivalente debe proporcionar el mismo nivel de potencia y voltaje en el punto de conexión en la tabla 2 se muestra los datos obtenidos.

Cuadro 2: Equivalente de red

Trifásico		Monofásico	
$S_k''$	235,3606	X1	20,57807
$I_k''$	1,969355	R0	13,89536
R	0,1778129	X0	57,53029
X	0,4322215	X0/X1	4,14025185
X/R	2,43076571	R0/X1	0,67525089

### 3.4. Líneas de distribución

Las líneas son las encargadas de transportar la energía eléctrica entre dos puntos, el modelo de la línea depende de la distancia para efectos de líneas de distribución se realiza con el modelo de línea corta donde se determina la impedancia serie. El cálculo de la reactancia de la línea de distribución es un paso crítico, debido a que existen diferentes estructuras, diferentes calibres

de conductores que son tendidos de manera alternada entre trifásica a tres o cuatro conductores, bifásica y monofásica con dos, tres y cuatro hilos. En el alimentador Guaranda – Chimbo se utiliza varios tipos de conductores y estructuras tanto para monofásico y trifásico que se resume a continuación en las siguientes tablas.

Cuadro 3: Característica de conductores utilizados en red primaria

Conductores de red de medio voltaje			
Trifásica	Longitud (km)	Monofásica	Longitud (km)
ACSR.1/0	5,019	ASCR.1/0	10,111
ACSR.2	0,970	ASCR.2	50,920
ACSR.2/0	6,030	ASCR.4	35,403
ACSR.3/0	0,240		
ACSR.4	3,750		
ACSR.4/0	12,735		

Cuadro 4: Característica de conductores utilizados en red secundaria

Conductores de red de bajo voltaje			
Monofásico	Longitud (km)	Monofásico	Longitud (km)
ASCR.1/0	10,089	Pre.Al.2x50(50)	75,720
ASCR.2	113,16	Pre.Al.2x35(50)	78,639
ASCR.4	51,820	Pre.Al.3x50(50)	1,15
		Pre.Al.1x35(50)	1,049
		Pre.Al.1x35(10)	1,682

### 3.5. Demanda Eléctrica

La demanda del alimentador es 6887 usuarios, por lo tanto se determinó el tamaño de la muestra para extraer los datos de consumo aplicando la siguiente ecuación:

$$n = \frac{Z^2 * p * q * N}{e^2(N - 1) + Z^2 * p * q} \quad (1)$$

Donde:

$n$  es el tamaño de la muestra

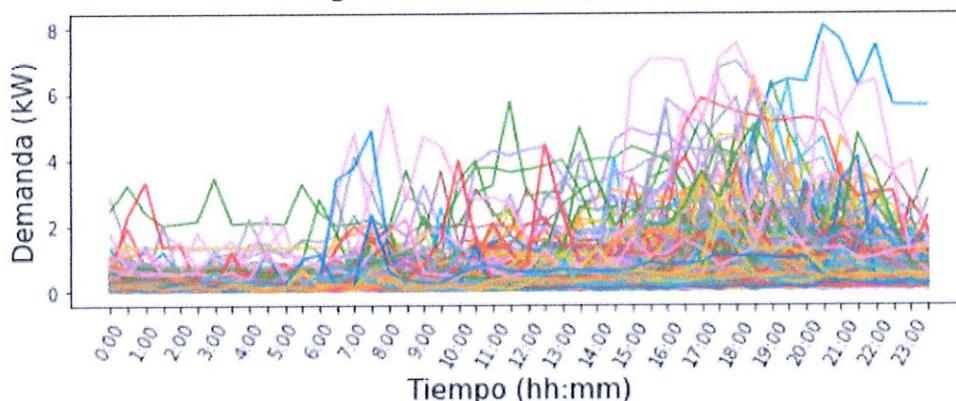
$Z$  es el nivel de confianza

$p$  es la probabilidad a favor

$q$  es la probabilidad en contra  
 $e$  es el error de muestra

Para el análisis se tomó el 95% de confianza dando un valor de  $Z = 1,96$ , el tamaño de la población  $N = 6887$ , la probabilidad a favor  $p = 0,60$ , la probabilidad en contra  $q = 0,40$  y finalmente un error de muestra de  $e = 0,40$ . Por consiguiente, con estos valores el tamaño de la muestra da un valor de  $n = 342$  usuarios, en la figura 2 se muestra los perfiles de carga.

Figura 1: Perfil de carga diaria



Para cada usuario se tomo los datos a intervalos de 15 minutos según la norma internacional IEEE 1159 [18] por un lapso tiempo de un año.

### 3.6. Datos irradiación solar

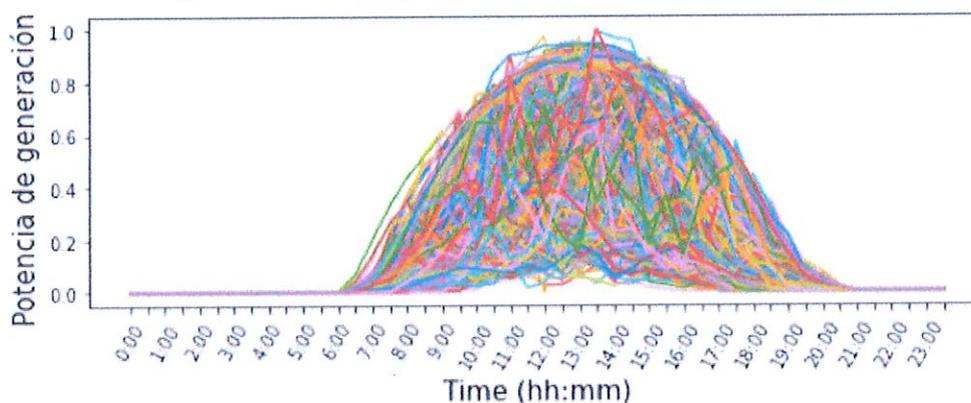
La irradiación solar es la cantidad de energía solar que llega a la superficie terrestre en un momento dado. Esta energía puede ser aprovechada mediante paneles solares para generar electricidad y contribuir a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero Esta potencia se mide en watts por metro cuadrado ( $W/m^2$ ) y puede variar dependiendo de factores como la ubicación geográfica, la hora del día y las condiciones climáticas.

El perfil de potencia de generación se normalizó con el fin de adaptar a cualquier potencia de los paneles fotovoltaicos existen en el mercado, los datos se tomaron a intervalos de 15 minutos por un lapso de un año.

## 4. METODOLOGÍA

La investigación es cuantitativa con enfoque explicativa con el fin de analizar las variables de estado del la red eléctrica de distribución ante el ingreso de

Figura 2: Perfil de potencia de generación normalizada



paneles fotovoltaicos. Par ello, se tomó el método deductivo que ayuda a la obtención de conocimiento al desarrollar aplicaciones o consecuencias concretas a partir de principios generales.

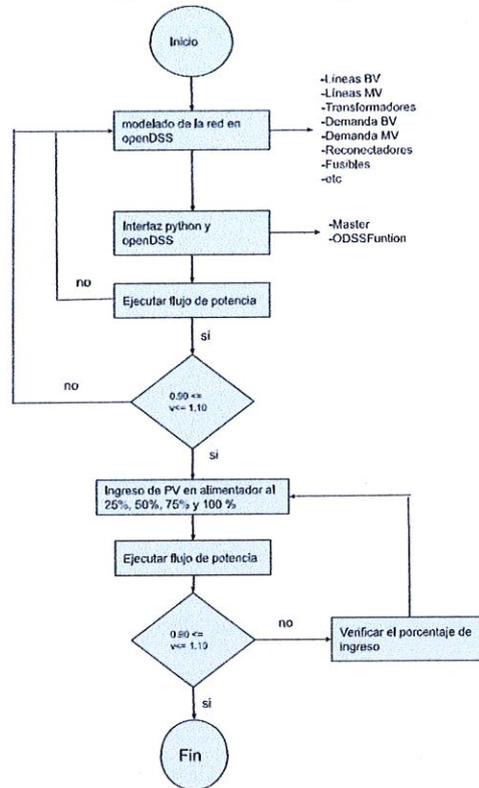
#### 4.1. Metodología 1

Para la evaluación de ingreso de paneles fotovoltaicos en cada uno de los usuarios se realiza de manera estocástica utilizando el método de montecarlo con el fin de evaluar la capacidad máxima de potencia inyectada en red, la metodología implementada se observa en la figura 3.

En la figura previa se explica la metodología para el ingreso de paneles fotovoltaicos en la red eléctrica de distribución, como primer paso se realiza la modelación de las líneas primaria, secundarias, transformadores, demanda, fusibles, entre otros. Esto se realiza en el formato openDSS, para ello se cuenta con el argis del alimentador Guaranda- Chimbo.

Previamente se realiza la interfaz python vs openDSS, para ellos se crea un archivo master.dss que contiene todo el modelado de la red y el archivo ODSSfunction que contiene todas las funciones para la interfaz y ejecución desde jupyter. Una vez realizado los dos pasos anteriores, se procede a ejecutar el flujo de potencia para observar si el programa esta modelado de manera correcta si esto es así se procede a verificar los voltajes, si no lo es se procede a verificar el modelado en openDSS. Este paso es importante ya que los voltajes deben ser iguales al sistema real. Una vez verificado que el sistema implementado es igual a real y que los voltajes estén dentro del rango de  $\pm 10\%$ , se procede a ingresar el 25% de paneles fotovoltaicos en el alimentador esto es instalar aleatoriamente a 1721 usuarios del total de 6887, sucesivamente con cada porcentaje . Una vez mas, se ejecuta el flujo de potencia y se verifica

Figura 3: Metodología 1



si cumple con los límites inferior y superior de voltaje, si cumple se finaliza el proceso, caso contrario se verifica las variables de estado, es decir, voltaje en los nodos, corrientes en las líneas, sobrevoltajes en los transformadores. Este proceso se repite para cada porcentaje de ingreso tal como se puede observar en la figura 3.

Con esta metodología propuesta se determina la cantidad de recursos de energía distribuida de paneles fotovoltaicos que se pueden conectar a la red sin causar inestabilidad en el sistema o violar las normas de seguridad.

## 4.2. Metodología 2

Los fuentes de energía renovables como generación fotovoltaica, generadores eólicos, pequeñas centrales hidroeléctricas de pasada, etc. utilizan convertidores de potencia para la conexión a la red y extraer la máxima potencia. No obstante, existe tres tipos de modos de control para la gestión de la energía generada por el panel fotovoltaico, estos modos depende de la características

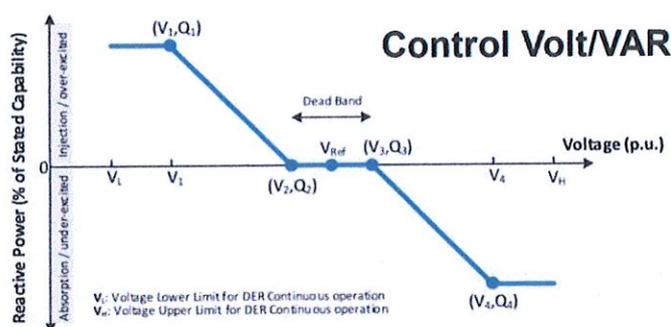
de la red eléctrica de distribución.

- Control centralizado
- Control cooperativo distribuido
- Control descentralizado

El control centralizado y el cooperativo distribuido utiliza redes de comunicación un ancho de banda grande para poder controlar desde una sala de control que hace inviable en aplicaciones prácticas debido a costo. Por otro lado, el control descentralizado es local y despacha potencia en cada inversor fotovoltaico basado en mediciones locales instantáneas [19]. Por los tanto, por su costo y beneficios utilizaremos el control descentralizado.

Se puede controlar potencia reactiva con factor de potencia constante o con un factor de potencia variable, sin embargo en [19] llegan a la conclusión de que el método característica de potencia reactiva / voltaje es más eficiente que el método característico del factor de potencia figura 4. Debido a que limita el flujo de potencia reactiva adicional y pérdidas de potencia activa en la red en la figura se muestra la zona de operación de este tipo de control.

Figura 4: Función Voltaje/ potencia reactiva [20]



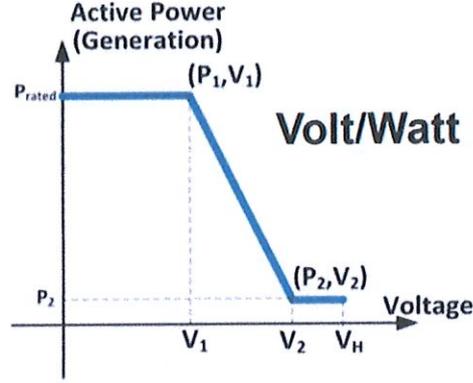
El control de voltaje/ potencia es usado para mitigar aumentos de voltaje por medio del recorte de potencia activa figura 5.

Para nuestra propuesta metodología 2 se realiza un control de potencia activa y potencia reactiva en el inversor de cada panel fotovoltaico mediante un modelo de optimización no lineal por las características propias de la red.

$$\min z: \sum_{t \in T} \sum_{pv \in pvs} -P_{conput} + \frac{1}{\alpha} \tan(\phi)_{conput} \quad (2)$$

Sujeto a:

Figura 5: Función Voltaje/ potencia activa [20]



$$p_i^s = g_{ii}v_i^2 + \sum_{i \neq j} g_{ij}v_i v_j \cos(\delta_{ij}) + \sum_{i \neq j} b_{ij}v_i v_j \sin(\delta_{ij}) \quad (3)$$

$$q_i^s = -b_{ii}v_i^2 + \sum_{i \neq j} g_{ij}v_i v_j \sin(\delta_{ij}) - \sum_{i \neq j} b_{ij}v_i v_j \cos(\delta_{ij}) \quad (4)$$

$$p_i^s = P_{gpv}^s - \left[ p_{zj}^s \left( \frac{v_i^s}{v_{nomi}} \right)^2 + p_{Ii}^s \left( \frac{v_i^s}{v_{nomi}} \right) + p_{pi}^s \right] \quad (5)$$

$$q_i^s = Q_{gpv}^s - \left[ q_{zj}^s \left( \frac{v_i^s}{v_{nomi}} \right)^2 + q_{Ii}^s \left( \frac{v_i^s}{v_{nomi}} \right) + q_{pi}^s \right] \quad (6)$$

$$P_{gpv}^s = P_{sppv} P_{conpv} \quad (7)$$

$$Q_{gpv}^s = P_{gpv}^s \tan(\phi)_{conpv} \quad (8)$$

$$-\tan(\arccos(\phi_{min})) \leq \tan(\phi)_{conpv} \leq 0 \quad (9)$$

$$\sqrt{P_{gpv}^2 + Q_{gpv}^2} \leq S_{invpv} \quad (10)$$

$$v_{mini} \leq v_i^s \leq v_{maxi} \quad (11)$$

Donde:

$s \in \Omega$  pertenece al conjunto de la fase ( $a, b, c$ )

$i, j \in \sigma$  pertenece al conjunto de los nodos.

$t \in T$  pertenece al tiempo de simulación.

$p_i^s$  es la potencia activa inyectada para cada una de las fases.

$q_i^s$  es la potencia reactiva inyectada para cada una de las fases.

$P_{gpv}^s$  es la potencia activa del panel fotovoltaico para cada una de las fases.

$Q_{gpv}^s$  es la potencia reactiva del panel fotovoltaico para cada una de las fases.

$p_{zi}^s$  es la demanda activa de impedancia constante para cada una de las fases.

$q_{zi}^s$  es la demanda reactiva de impedancia constante para cada una de las fases.

$p_{Ii}^s$  es la demanda activa de corriente constante para cada una de las fases.

$q_{Ii}^s$  es la demanda reactiva de corriente constante para cada una de las fases.

$p_{pi}^s$  es la demanda activa de potencia constante para cada una de las fases.  
 $q_{qi}^s$  es la demanda reactiva de potencia constante para cada una de las fases.  
 $P_{sppv}$  es el perfil de potencia solar obtenida mediante la irradiación solar.  
 $P_{compv}$  variable de control de potencia activa del panel fotovoltaico.  
 $\tan(\phi)_{compvt}$  variable de control de potencia reactiva del panel fotovoltaico.  
 $\alpha$  factor para el control de potencia reactiva que debe ser mayor a 1.

La ecuación 2 es la función objetivo donde se maximiza la potencia activa inyecta a la red y se minimiza la potencia reactiva de cada uno de los paneles fotovoltaicos durante el periodo de simulación  $T$ , las ecuaciones 3 y 4 corresponde a la potencia de inyección nodal para cada una de las fases del sistema, la ecuaciones 5 y 6 son el balance de inyección nodal donde la demanda esta modelada como un modelo polinomial de impedancia constante, corriente constante y potencia constante, las ecuaciones 7, 8 ,9 y 10 corresponden al inversor y finalmente la ecuación 11 es el limite de voltaje en cada uno de los nodos para cada uno de las fases.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la evaluación de la propuesta metodología detallada en la sección 3 se realiza primeramente en un circuito de 13 nodos del IEEE y posterior se aplica al alimentador Guaranda - Chimbo perteneciente a CNEL-BOLIVAR.

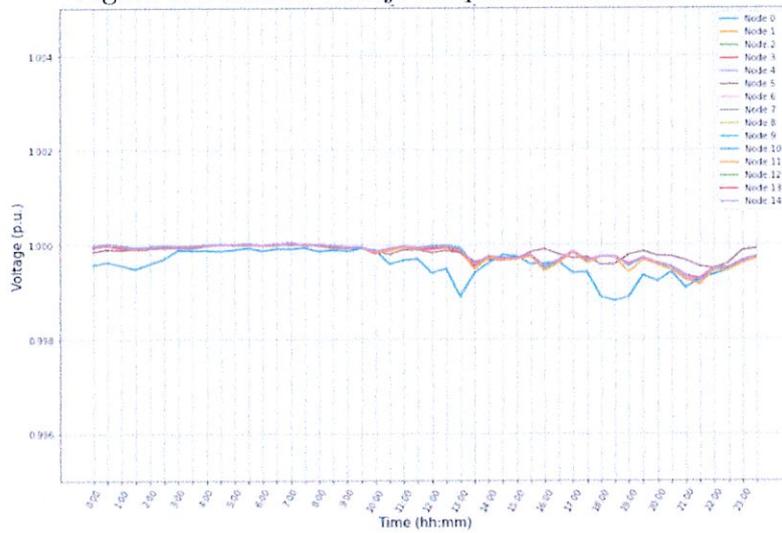
### 5.1. Resultados y discusión de la metodología 1

La topología y los datos necesarios para realizar la simulación del test feeder IEEE 13 nodos, se encuentran detallados en [21]. El sistema se caracteriza por ser radial y desbalanceado que es ideal para aplicaciones en las redes eléctricas de distribución que actualmente se operan en el Ecuador. La potencia de cada panel fotovoltaico es 500 Wp con una área de  $2.40 m^2$  y asumiendo una vivienda de  $100 m^2$ , cada usuario puede instalar 40 paneles aproximadamente, dando un valor de 20 kW de potencia por usuario. Los datos de la demanda y de irradiación se tomaron durante 365 días de año. Por lo tanto, la simulación se puede realizar para cada día, semana o año.

Los voltajes en las redes eléctricas de distribución según normativas pueden variar +- 10 % de la nominal, en la figura 6 se muestra los voltajes en condiciones normales de operación es decir, sin incluir ningún panel fotovoltaico.

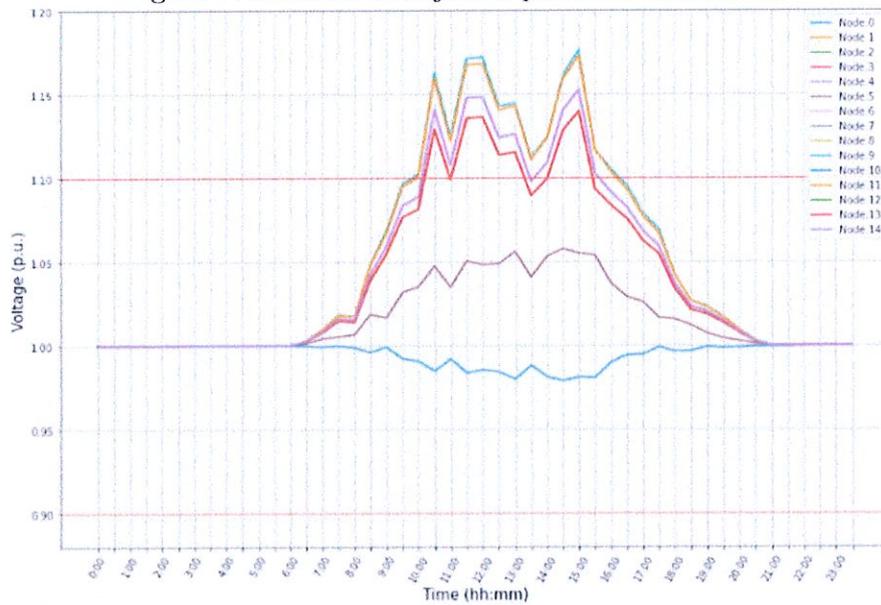
La simulación se realizó para 30 días, sin embargo, en la figura 7 se presenta para el día 1 donde muestra que los voltajes en los nodos cumplen con la normativa para cada hora del día a periodo de 30 minutos de simulación. Así como también, los restantes días. Seguidamente, se muestra el ingreso de los

Figura 6: Perfil de voltaje sin paneles fotovoltaicos



paneles fotovoltaicos en cada usuario con una capacidad de 20 kW por usuario de la red.

Figura 7: Perfil de voltaje con paneles fotovoltaicos



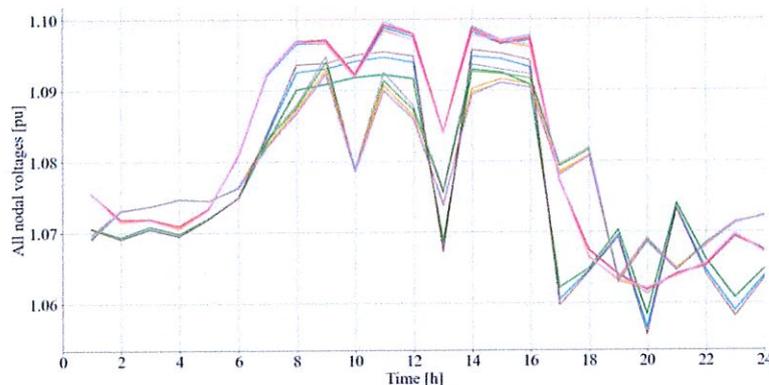
Según el flujo grama presentado previamente se tiene que realizar el ingreso de panel fotovoltaico por pasos hasta cumplir con el voltaje permitido es decir  $\pm 10\%$  de variación de 1 por unidad. En el sistema de prueba el ingreso de

20 % de paneles fotovoltaicos a la red supera el límite de la norma, se puede observar en la figura 7 para el día, el perfil de voltaje exceden los límites de la normativa superando el 10 %, esto provoca, fluctuaciones, cargabilidad, flujos inversos, disparo simpático, aumento de las corrientes de fallas, etc. De la misma manera, los otros días restantes exceden también los límites de voltaje.

## 5.2. Resultados y discusión de la metodología 2

La metodología 2 ayuda a realizar un control en el inversor, limitando el voltaje como máximo a 1.10 en por unidad. Esto es logrado gracias al inversor, ya que puede trabajar en los cuatro cuadrantes según la lógica de control para los disparos de los igbts. Para nuestro caso se realizó una función de optimización que ayuda a minimizar la potencia reactiva consumida con por los usuarios y máxima la entrega de potencia activa sujeto a las restricciones de balance de potencia y las demás restricciones de mínimo y máximo técnico. En la figura 7 se puede ver que los voltajes en los nodos violan las restricciones. A este sistema del prueba del IEEE 13 nodos que esta tiene 20 % de paneles fotovoltaicos se aplica la metodología 2.

Figura 8: Perfil de voltaje con paneles fotovoltaicos



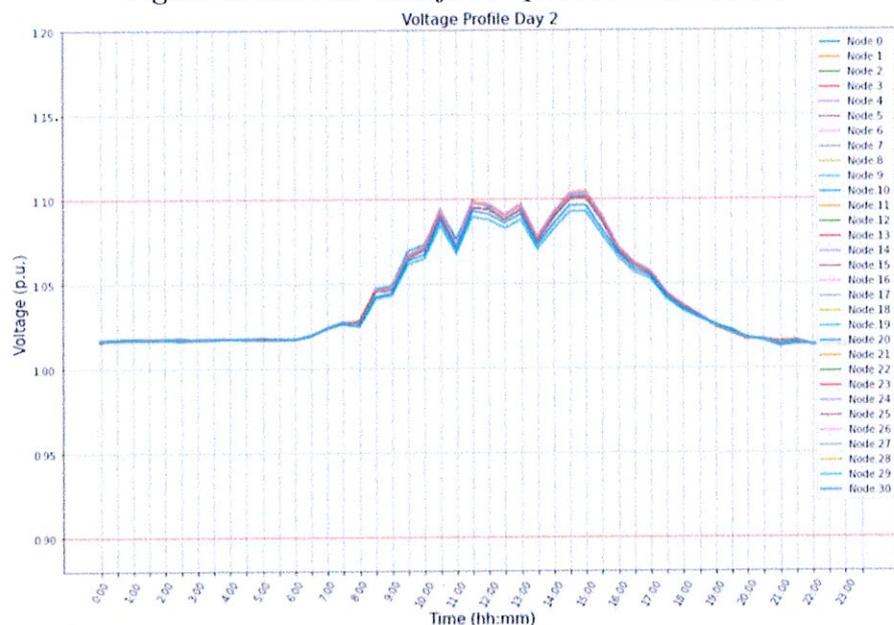
En la figura 8 se puede observar los perfiles de voltajes con el 20% de paneles fotovoltaicos dentro de los límites permitidos por la normativa.

## 5.3. Metodología 1 alimentador Guaranda Chimbo

La metodología 1 es ideal para realizar estudios de ingresos de paneles fotovoltaicos a la red eléctrica de distribución, en esta no se considera ningún control de regulación de voltaje con el objetivo de observar hasta que porcentaje

la red permite el ingreso sin violar lo límites superior. Por consiguiente, se procede a realizar en el alimentador Guaranda Chimbo, que consta de 6887 usuarios, las cargas de cada usuario se toma como un modelo polinomial ZIP, y se modelaron de manera monofásica por ser cargas desbalanceadas. Sin embargo el perfil de demanda e irradiación solar ingresa aleatoriamente en la cargas declaradas. Por consiguiente al ser un sistema grande no se puede graficar todos los nodos por lo que solo se encojen 30 nodos aleatorios. La simulación se realiza para 30 días.

Figura 9: Perfil de voltaje con paneles fotovoltaicos



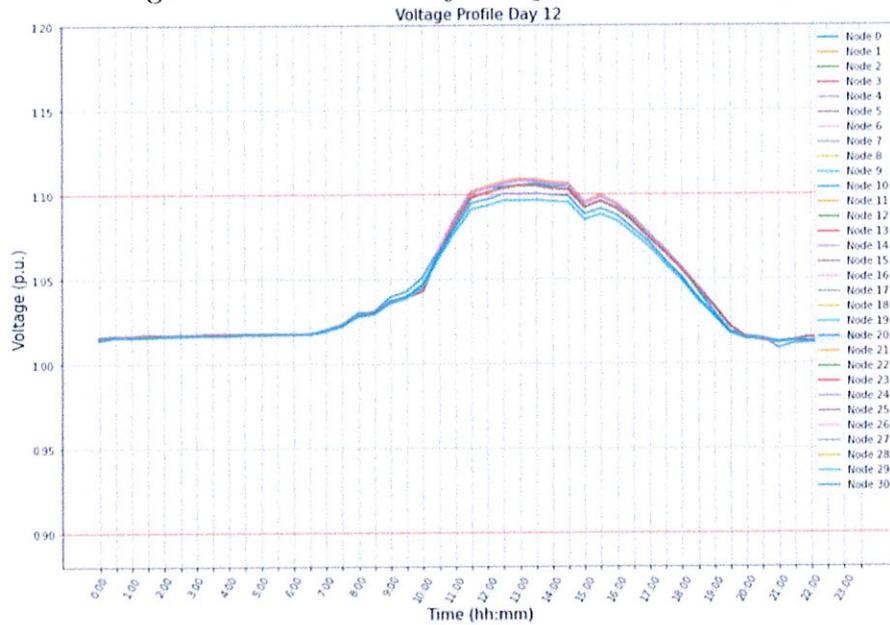
En la 9 presenta el perfil de voltaje con el 48% de ingreso de paneles fotovoltaicos, para el día 2 y se puede observar para algunos nodos supera el límite superior. Esto significa que en esos nodos que superan los límites de voltaje no se puede ingresar ningún panel fotovoltaicos.

De la misma manera la figura 10 del día 12 presenta voltajes superiores en alguno nodos para ese perfil de carga e irradiación. No obstante, para los restantes días presentan características similares.

#### 5.4. Metodología 2 alimentador Guaranda Chimbo

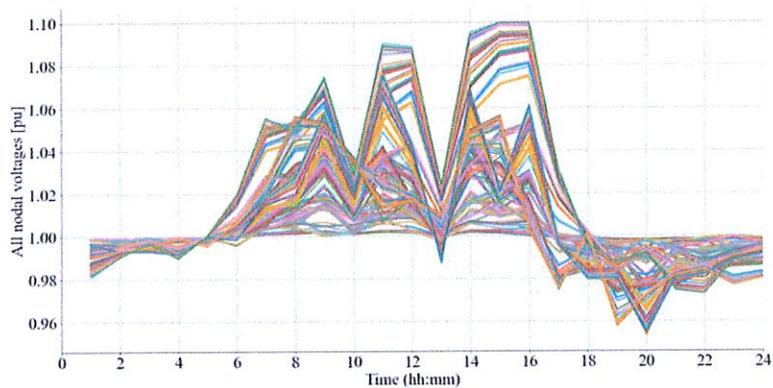
Con la metodología 2 se puede ingresar el 100% de paneles solares fotovoltaicos y controlar el voltaje como máximo a 1.10 en por unidad mediante el modelo matemático de optimización presentando previamente. En este modelo matemático

Figura 10: Perfil de voltaje con paneles fotovoltaicos



contiene 77232 variables y 104352 restricciones. Se resuelve con el solver knitro que sirve para resolver problemas no lineales como es el flujo de potencia desbalanceado en las redes eléctricas de distribución.

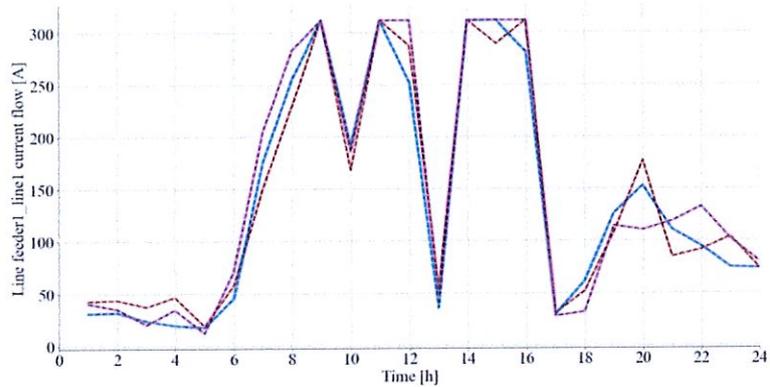
Figura 11: Perfil de voltaje con paneles fotovoltaicos



En la figura 11 se puede observar el ingreso de paneles fotovoltaicos al 100 % y los voltajes permanecen dentro de límite permitido por la normativa.

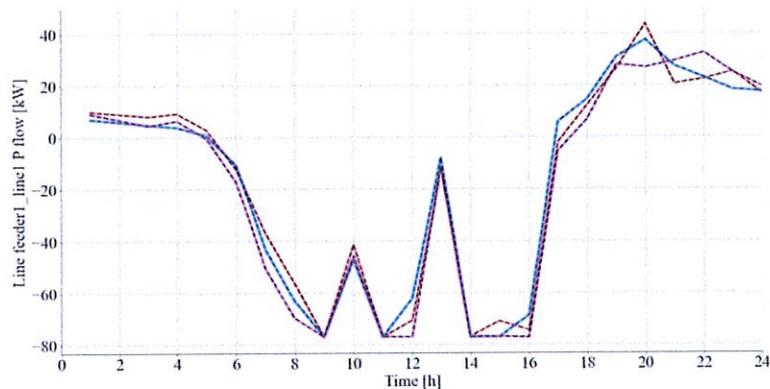
En la figura 12 se puede observar la corriente de las tres fases al inicio de

Figura 12: Corriente de las líneas al inicio del alimentador



la subestación, donde nos muestra que la corriente también se limita cuando se realiza el control de potencia reactiva-voltaje.

Figura 13: Flujo de potencia en las líneas al inicio del alimentador



En la figura 13 se puede observar el flujo de potencia por la línea cerca de la subestación Guaranda, en las horas de mayor incidencia solar el flujo se vuelve negativo es decir que el flujo viaja desde los paneles fotovoltaicos hacia la subestación y en las horas con menor incidencia solar el flujo va desde la subestación hacia las cargas.

En la figura 14 se puede observar el control de potencia que realiza el optimizador y esta comienza desde las 9 de la mañana hasta las 16 horas que existe incidencia solar limitando la entrega de mas potencia a la red con el objetivo de cumplir el perfil de voltaje dentro de la normativa.

Figura 14: Variable de control de potencia activa

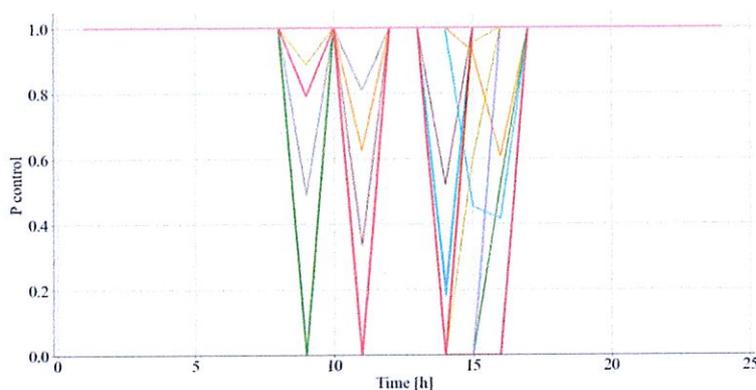
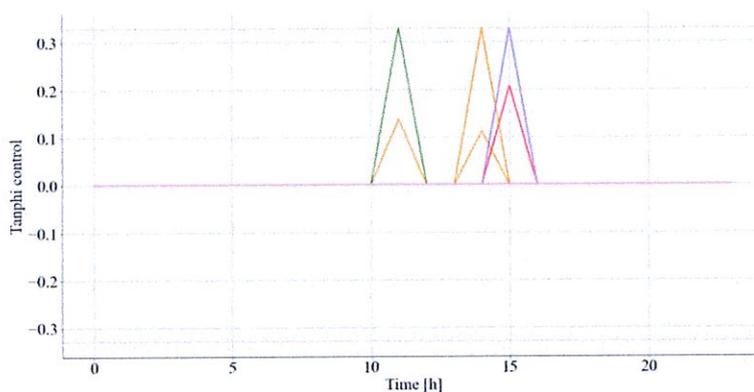


Figura 15: Variable de control potencia reactiva



Finalmente en la figura 15 se puede observar la variable de control de potencia reactiva del panel fotovoltaico  $\tan(\phi)$  esta ayuda a mantener el voltaje dentro de límite permitido  $\pm 10\%$ .

## 6. CONCLUSIONES

La metodología 1 resulta satisfactorio para evaluar el ingreso de paneles fotovoltaicos en la red eléctrica de distribución desbalanceado permitiendo conocer hasta que porcentaje de penetración se puede incluir en dicha red cumpliendo con la normativa de calidad de energía. Por consiguiente, en el sistema IEEE 13 nodos el máximo porcentaje de ingreso es 20% y en alimentador Guaranda

Chimbo el máximo porcentaje de ingreso es de 48 %. Para ingresar, porcentajes mas altos se tiene la metodología 2 que minimiza potencia reactiva y maximiza la potencia activa de cada panel fotovoltaico sujeto a las restricciones de balance de potencia, mínimo y máximo técnico del sistema eléctrico y paneles fotovoltaicos con su inversor

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### Referencias

- [1] N. Cepal, “Agenda 2030 y los objetivos de desarrollo sostenible: una oportunidad para américa latina y el caribe,” 2018.
- [2] ARCERNNR, “Marco normativo de la generación distribuida para autoabastecimiento de consumidores regulados de energía eléctrica,” pp. 1–39, 2021.
- [3] M. B. Cain, R. P. O’neill, A. Castillo, *et al.*, “History of optimal power flow and formulations,” *Federal Energy Regulatory Commission*, vol. 1, pp. 1–36, 2012.
- [4] R. Khomarudin, K. M. Banjar-Nahor, and N. Hariyanto, “Mathematical hosting capacity calculation due to arise voltage using the equation of line approach,” in *2022 5th International Conference on Power Engineering and Renewable Energy (ICPERE)*, vol. 1, pp. 1–6, 2022.
- [5] S. Kahrobaee and V. Mehr, “Probabilistic analysis of pv curtailment impact on distribution circuit hosting capacity,” in *2020 47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, pp. 2210–2213, 2020.
- [6] W. Niederhuemer and R. Schwalbe, “Increasing pv hosting capacity in lv grids with a probabilistic planning approach,” in *2015 International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies (EDST)*, pp. 537–540, 2015.
- [7] F. Ebe, B. Idlbi, J. Morris, G. Heilscher, and F. Meier, “Evaluation of pv hosting capacity of distribuion grids considering a solar roof potential analysis — comparison of different algorithms,” in *2017 IEEE Manchester PowerTech*, pp. 1–6, 2017.
- [8] N. Bhusal, M. Kamruzzaman, and M. Benidris, “Photovoltaic hosting capacity estimation considering the impact of electric vehicles,” in *2019 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, pp. 1–6, 2019.

- [9] N. Nakhodchi and M. H. J. Bollen, "Estimation of safe harmonic hosting capacity," in *CIREC 2021 - The 26th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution*, vol. 2021, pp. 693–697, 2021.
- [10] B. B. Navarro and M. M. Navarro, "A comprehensive solar pv hosting capacity in mv and lv radial distribution networks," in *2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)*, pp. 1–6, 2017.
- [11] M. Rossi, G. Viganò, and D. Moneta, "Hosting capacity of distribution networks: Evaluation of the network congestion risk due to distributed generation," in *2015 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)*, pp. 716–722, 2015.
- [12] K. Ezzeddine and N. Etherden, "A topology agnostic estimation method for pv hosting capacity of distribution grids," in *2021 IEEE Madrid PowerTech*, pp. 1–6, 2021.
- [13] A. Alrushoud and N. Lu, "Impacts of pv capacity allocation methods on distribution planning studies," in *2020 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T y D)*, pp. 1–5, 2020.
- [14] S. Wang, S. Chen, L. Ge, and L. Wu, "Distributed generation hosting capacity evaluation for distribution systems considering the robust optimal operation of oltc and svc," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 7, no. 3, pp. 1111–1123, 2016.
- [15] S. J. U. Hassan, T. Gush, and C.-H. Kim, "Maximum hosting capacity assessment of distribution systems with multitype ders using analytical opf method," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 100665–100674, 2022.
- [16] L. N. Ochoa and J. Quiros-Tortos, "Advanced modelling of smart distribution networks using openss," *Tutorial material, IEEE ISGT Asia*, 2015.
- [17] A. Hariri, A. Newaz, and M. O. Faruque, "Open-source python-openss interface for hybrid simulation of pv impact studies," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 11, no. 12, pp. 3125–3133, 2017.
- [18] "Ieee recommended practice for power quality data interchange format (pqdif)," *IEEE Std 1159.3-2019 (Revision of IEEE Std 1159.3-2003)*, pp. 1–185, 2019.
- [19] I. J. A. A. CHAVARRÍA, *CONTROL DE INVERSOR FOTOVOLTAICO PARA REDES ELÉCTRICAS INTELIGENTES*. PhD thesis, UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE YUCATÁN, 2015.

- [20] M. Parajeles, J. Quirós-Tortós, and G. Valverde, “Assessing the performance of smart inverters in large-scale distribution networks with pv systems,” in *2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America)*, pp. 1–6, 2017.
- [21] M. Matthias, Paudyal and W. Kersting, “Analytic considerations and design basis for the iec distribution test feeders,” 2017.