

# **Determinación del margen de estabilidad de voltaje en sistemas de distribución empleando optimización matemática**

**Brayan Enrique Aguirre Angulo**  
**Lady Carolina Giraldo Bello**

Proyecto sometido como requisito parcial  
para optar por el título de  
**Ingenieros Eléctricos**

**Oscar Danilo Montoya Giraldo, PhD**

15 de octubre de 2021  
Área de Sistemas Eléctricos de Potencia  
Proyecto Curricular de Ingeniería Eléctrica  
Facultad de Ingeniería



**UNIVERSIDAD DISTRITAL**  
**FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS**

# **Documento final**

*Monografía presentada como requisito parcial de grado a la dirección del proyecto curricular  
de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas*

**Brayan Enrique Aguirre Angulo**  
**Lady Carolina Giraldo Bello.**  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Estudiantes

Aprobado por:

**Oscar Danilo Montoya Giraldo, PhD.**  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Director

Bogotá D.C., 15 de octubre de 2021

# Dedicatoria

*Quiero dedicar este trabajo de grado: A mi madre Doris, que con su amor, paciencia y años de esfuerzo trabajando me permitió superar una meta más en mi vida. A mi hermano Julián que me ha apoyado incondicionalmente durante todo este proceso, por estar conmigo y escucharme en todo momento ¡Gracias!. A mi primo Rominger que me ha acompañado toda la vida y me inspiro a estudiar esta carrera y ha sido el mas valioso amigo que he tenido durante mi paso por la universidad. A mis abuelos Gladys y Nelson que siempre han creído en sus nietos.*

*Brayan Aguirre*

*Quiero dedicar este trabajo de grado: A mi madre Marina Bello, mujer trabajadora, luchadora y valiente quien me apoyo indispensablemente para culminar esta carrera. A mi padre Leonardo Giraldo, mi compañero, consejero y gran amor. A mis hermanos Oscar, John y Laura por su compañía y motivación. A mis sobrinos Jacobo y Silvana que son mi más grande inspiración.*

*Carolina Giraldo*

# Agradecimientos

*En primer lugar, queremos agradecer al profesor Oscar Danilo Montoya Giraldo, quien dedicó sus conocimientos y tiempo para guiarnos y corregirnos en cada una de las etapas de este trabajo.*

*A nuestros amigos Gabriel, Carol, Ivan, Daniel, Karen, Leo, Andrés, Camilo, Jhan Carlos, Nicolás, Wilmer, Andres Camilo y el resto de nuestros compañeros que nos han acompañado en este arduo proceso donde su amistad ha sido nuestra más valiosa de experiencia. También a Brandon que estuvo dispuesto a brindarnos su valiosa ayuda cuando la necesitamos.*

*En lo personal yo Brayan, le agradezco a mi familia en especial a mis tías Martha y Lida quienes me han dado su apoyo incondicional. A mi primo Rominger que siempre me ha acompañado y escuchado a quien considero como mi hermano y eterno amigo. A mi suegra, quien me brindó un espacio de tranquilidad durante la pandemia. A mi pareja Carolina que durante estos 6 años me ha alentado a cumplir este sueño juntos.*

*Finalmente, yo Carolina, aunque dedico este trabajo a ellos, agradezco infinitamente a mi mamá Marina, a mi papá Leonardo, a mis hermanos y mi pareja por acompañarme, soportarme y alentarme a lograr este objetivo de ser Ingeniera cuando mis ánimos decaían. Los amo familia.*

# Resumen

En este documento se describe el problema de la determinación del margen de estabilidad de tensión en sistemas de distribución y ubicación óptima de generación distribuida (GD) empleando optimización matemática mediante la presentación de un modelo de programación no lineal de enteros mixtos (MINLP). Para resolver dicho modelo, se emplea el Sistema de Modelado Algebraico General (GAMS) en conjunto con el solucionador BONMIN, presentando la implementación del modelo en un pequeño sistema de distribución radial de 7 nodos, adicional se presenta una descripción acerca de las funcionalidades del software GAMS, todo lo anterior a manera de ejemplo. Además, se realiza una explicación del proceso para obtener el margen de estabilidad en tensión y su curva  $PV$  o  $\lambda V$  de un sistema radial simple fuente-línea-carga y como se traslada esta lógica a la obtención de dicho margen y curva en un sistema radial  $N$  nodos. Se emplean los sistemas de prueba IEEE 33 y 69 nodos para validar la metodología de solución propuesta; los resultados obtenidos son verificados mediante la implementación de la metodología para obtención de curva de estabilidad de tensión a través de una implementación recursiva en el software MATLAB del método de flujo de potencia conocido como de aproximaciones sucesivas; se ilustra de manera gráfica el comportamiento de la tensión del nodo débil de los sistemas de prueba y su respectivo coeficiente de margen de estabilidad  $\lambda$  para tres casos de estudio con diferentes porcentajes de penetración de Generación distribuida. Luego se lleva a cabo la simulación de los sistemas de prueba en DIGSILENT con el fin de obtener un acercamiento del comportamiento en la vida real del sistema ante aumentos de carga, esto con la ayuda de un comando DPL (DigSILENT programming language). Finalmente se realiza un análisis de los resultados obtenidos en donde se evidencia la importancia del desarrollo de esta metodología, en donde la ubicación de fuentes de generación distribuida en la red tiene un gran beneficio sobre aspectos que afectan la calidad del servicio.

# Abstract

This document describes the problem of determining the voltage stability margin in distribution systems and optimal location of distributed generation (GD) using mathematical optimization through the presentation of a mixed integer non-linear programming model (MINLP). To solve this model, the General Algebraic Modeling System (GAMS) is used in conjunction with the BONMIN solver, presenting the implementation of the model in a small radial distribution system of 7 nodes, additionally a description about the software functionalities is presented GAMS, all of the above as an example. In addition, an explanation is made of the process to obtain the voltage stability margin and its curve  $PV$  or  $\lambda V$  of a simple radial source-line-load system and how this logic is transferred to obtaining said margin and curve in a radial system  $N$  nodes. IEEE 33 and 69 node test systems are used to validate the proposed solution methodology; The results obtained are verified by implementing the methodology for obtaining the voltage stability curve through a recursive implementation in MATLAB software of the power flow method known as successive approximations; The behavior of the weak node stress of the test systems and its respective stability margin coefficient  $\lambda$  are graphically illustrated for three case studies with different penetration percentages of Distributed Generation. Then the simulation of the test systems is carried out in DIgSILENT in order to obtain an approximation of the real-life behavior of the system in the event of load increases, this with the help of a DPL command (DigSILENT programming language). An analysis of the results obtained is carried out where the importance of the development of this methodology is evidenced, where the location of distributed generation sources in the network has a great benefit on aspects that affect the quality of the service.

# Índice general

<b>Resumen</b>	<b>IV</b>
<b>Abstract</b>	<b>V</b>
<b>Índice general</b>	<b>VIII</b>
<b>Lista de tablas</b>	<b>IX</b>
<b>Lista de figuras</b>	<b>XI</b>
<b>Lista de códigos de programación</b>	<b>XII</b>
<b>Nomenclatura y Notaciones</b>	<b>XIII</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Planteamiento del problema . . . . .	2
1.2. Estado del Arte . . . . .	3
1.2.1. Conceptos básicos de sistemas de distribución . . . . .	3
1.2.1.1. Sistema eléctrico de distribución . . . . .	3
1.2.1.2. Sistemas de prueba IEEE . . . . .	3
1.2.1.3. Flujo de potencia . . . . .	3
1.2.1.4. Pérdidas de potencia . . . . .	4
1.2.1.5. GAMS (General Algebraic Modeling System) . . . . .	4
1.2.1.6. MATLAB® . . . . .	4
1.2.1.7. Estabilidad en tensión . . . . .	4
1.2.2. Revisión de la literatura . . . . .	5
1.3. Justificación . . . . .	7
1.4. Objetivos . . . . .	8
1.4.1. Objetivo General . . . . .	8
1.4.2. Objetivos específicos . . . . .	8
1.5. Contribuciones del proyecto de grado . . . . .	8
1.6. Organización del documento . . . . .	9

<b>2. Curvas de estabilidad de tensión <math>P</math>- <math>V</math> o <math>\lambda</math>- <math>V</math></b>	<b>10</b>
2.1. Límite de estabilidad para un sistema fuente-línea-carga . . . . .	10
2.2. Representación curva $\lambda$ - $V$ en MATLAB® . . . . .	12
2.3. Obtención del coeficiente de estabilidad en MATLAB para sistemas radiales . .	15
2.3.1. Ejemplo de Aplicación . . . . .	16
<b>3. Modelo de optimización generalizado</b>	<b>18</b>
3.1. Formulación matemática . . . . .	18
3.1.1. Función objetivo . . . . .	18
3.1.2. Conjunto de restricciones . . . . .	18
3.1.3. Observaciones Generales . . . . .	20
3.2. Sistema general de modelado algebraico: GAMS . . . . .	20
3.2.1. Ejemplo de implementación . . . . .	24
<b>4. Sistema de prueba y escenarios</b>	<b>28</b>
4.1. Alimentador de prueba de 33 nodos . . . . .	28
4.1.1. Caso base 33 nodos para simulación DigSILENT . . . . .	30
4.2. Alimentador de prueba de 69 nodos . . . . .	31
4.2.1. Caso base 69 nodos simulación DigSILENT . . . . .	34
4.3. Escenarios de simulación . . . . .	36
<b>5. Aplicación y resultados</b>	<b>38</b>
5.1. Validación Computacional . . . . .	38
5.1.1. Sistema de prueba de 33 nodos . . . . .	39
5.1.1.1. Evaluación de los casos de simulación . . . . .	39
5.1.2. Sistema de prueba 69 nodos . . . . .	43
5.1.2.1. Evaluación de los casos de simulación . . . . .	43
5.1.3. Simulación con DigSILENT . . . . .	47
5.1.3.1. Resultados obtenidos DigSILENT caso base (C1) sistema de prueba 33 nodos . . . . .	48
5.1.3.2. Resultados obtenidos DigSILENT caso base (C1) sistema de prueba 69 nodos . . . . .	49
<b>6. Conclusiones y trabajos futuros</b>	<b>52</b>
6.1. Conclusiones . . . . .	52
6.2. Trabajos futuros . . . . .	53
<b>Bibliografía</b>	<b>56</b>
<b>Apéndices</b>	<b>57</b>
<b>A. Algoritmo obtención curva <math>\lambda</math>-<math>V</math></b>	<b>58</b>

**Anexo 1: Algoritmo obtención curva PV y margen de estabilidad para sistema de N**



<b>nodos</b>	<b>60</b>
<b>B. Comando DPL implementado en DigSILENT®</b>	<b>60</b>
<b>Anexo 2: Comando DPL implementado en DigSILENT®</b>	<b>61</b>

# Índice de tablas

2.1. Parámetros de simulación para la construcción de curvas $\lambda$ - $V$ en MATLAB (Fuente: Autores). . . . .	13
2.2. Parámetros eléctricos para el sistema de 7 nodos usado en el ejemplo de implementación de GAMS (Fuente: [1]). . . . .	17
4.1. Parámetros eléctricos para el sistema de prueba de 33 nodos (Fuente: [1]). . . . .	29
4.2. Parámetros eléctricos para el sistema de prueba de 69 nodos (Fuente: [1]). . . . .	32
5.1. Resultados del coeficiente ( $\lambda$ ) para todos los casos de simulación en el alimentador de prueba de 33 nodos (Fuente: Autores). . . . .	40
5.2. Resultados del coeficiente ( $\lambda$ ) para todos los casos de simulación en el alimentador de prueba de 69 nodos (Fuente: Autores). . . . .	43

# Índice de figuras

1.1. Curva PV (Fuente: [2]). . . . .	5
2.1. Circuito representativo de un sistema radial (Fuente: Autores). . . . .	10
2.2. Curvas $\lambda$ - $V$ y coeficiente ( $\lambda$ ) máximo de un sistema radial simple para FP = 0.7 y FP = 0.85 (Fuente: Autores). . . . .	13
2.3. Curvas $\lambda$ - $V$ y coeficiente ( $\lambda$ ) máximo de un sistema radial simple para FP = 0.95 y FP = 1.00 (Fuente: Autores). . . . .	15
2.4. Algoritmo general de implementación en MATLAB para sistemas radiales de $N$ nodos (Fuente: Autores). . . . .	16
2.5. Configuración eléctrica de los alimentadores de prueba: sistema de prueba de 7 nodos (Fuente: Autores). . . . .	17
2.6. Gráfica de estabilidad en tensión coeficiente ( $\lambda$ ) para un sistema de prueba 7 nodos (Fuente: Autores). . . . .	17
3.1. Estructura de un modelo optimización en GAMS (Fuente: Autores). . . . .	21
3.2. Interfaz de inicio de GAMS (Fuente: Autores). . . . .	22
3.3. Barra de menu en GAMS. . . . .	23
3.4. Ventana de opciones de GAMS (Fuente: Autores). . . . .	24
3.5. Pestaña de solver de la ventana opciones de GAMS (Fuente: Autores). . . . .	25
3.6. Botón para ejecutar código en GAMS (Fuente: Autores). . . . .	25
3.7. Botón de ayuda Help en GAMS (Fuente: Autores). . . . .	26
4.1. Configuración eléctrica de los alimentadores de prueba: sistema de prueba de 33 nodos (Fuente: Autores). . . . .	28
4.2. Montaje en DigSILENT del sistema de prueba de 33 nodos (Fuente: Autores). . . . .	30
4.3. Reporte de DigSILENT de magnitud y ángulo de tensiones en los nodos del sistema 33 nodos (Fuente: Autores). . . . .	31
4.4. Perfiles de tensión reportado por simulación en DigSILENT (Fuente: Autores). . . . .	31
4.5. Configuración eléctrica de los alimentadores de prueba: sistema de prueba de 69 nodos (Fuente: Autores). . . . .	32
4.6. Reporte DigSILENT magnitud y ángulo de tensiones en los nodos del sistema 33 nodos (Fuente: Autores). . . . .	34
4.7. Montaje DigSILENT sistema de prueba 33 nodos (Fuente: Autores). . . . .	35

4.8. Perfiles de tensión Reportados por simulación en DigSILENT (Fuente: Autores).	36
5.1. Diagrama entrada – salida para la validación computacional de la metodología empleada (Fuente: Autores).	39
5.2. Perfiles de tensión en el sistema de distribución para el análisis de : Caso:1 (caso base) y Caso:2-3 con 3 unidad de GD en el sistema de prueba 33 nodos (Fuente: Autores).	40
5.3. Gráfica de estabilidad en tensión coeficiente ( $\lambda$ ) para un sistema de prueba 33 Nodos para los Caso: 1 (caso base) y Casos: 2 y 3 con 1 unidad de GD (Fuente: Autores).	41
5.4. Gráfica de estabilidad en tensión coeficiente ( $\lambda$ ) para un sistema de prueba 33 Nodos para los Casos: 2 y 3 con 2 unidades de GD (Fuente: Autores).	42
5.5. Gráfica de estabilidad en tensión coeficiente ( $\lambda$ ) para un sistema de prueba 33 Nodos para los Casos: 2 y 3 con 3 unidades de GD (Fuente: Autores).	42
5.6. Perfiles de tensión en el sistema de distribución para el análisis de : Caso:1 (caso base) y Caso:2-3 con 3 unidad de GD en el sistema de prueba 69 nodos (Fuente: Autores).	44
5.7. Gráfica de estabilidad en tensión coeficiente ( $\lambda$ ) para un sistema de prueba 69 Nodos para los Caso: 1 (caso base) y Casos: 2 y 3 con 1 unidad de GD (Fuente: Autores).	45
5.8. Gráfica de estabilidad en tensión coeficiente ( $\lambda$ ) para un sistema de prueba 69 Nodos para los Casos: 2 y 3 con 2 unidades de GD (Fuente: Autores).	45
5.9. Gráfica de estabilidad en tensión coeficiente ( $\lambda$ ) para un sistema de prueba 69 Nodos para los Casos: 2 y 3 con 3 unidades de GD (Fuente: Autores).	46
5.10. Perfiles de tensión de DigSILENT - GAMS en el sistema de distribución para el análisis: Caso 1 en el sistema de prueba 33 Nodos (Fuente: Autores).	48
5.11. Perfil de tensión en el nodo débil en GAMS (MMG) - DigSILENT (DPL) - MATLAB (AMETM) para el análisis: Caso 1 en el sistema de prueba 33 Nodos (Fuente: Autores).	49
5.12. Perfiles de tensión de DigSILENT - GAMS en el sistema de distribución para el análisis: Caso 1 en el sistema de prueba 69 Nodos (Fuente: Autores).	50
5.13. Perfil de tensión en el nodo débil en GAMS (MMG) - DigSILENT (DPL) - MATLAB (AMETM) para el análisis: Caso 1 en el sistema de prueba 69 Nodos (Fuente: Autores).	50

# Índice de códigos de programación

1.	Algoritmo para realizar la gráfica de la curva $\lambda$ - $V$ teniendo en cuenta variaciones en el factor de potencia. . . . .	14
2.	Algoritmo de flujo de potencia en GAMS para el sistema de 7 nodos. . . . .	27
3.	Algoritmo para graficar curva PV en un sistema de N nodos y obtención del margen de estabilidad ( $\lambda$ ) . . . . .	59
4.	Algoritmo para realizar aumentos de carga progresivo en DigSILENT. . . . .	61

# Nomenclatura y Notaciones

En esta sección se presentan las principales abreviaturas empleadas en este documento, así como la nomenclatura utilizada en la formulación de cada uno de los métodos de flujo de potencia estudiados.

## Abreviaciones

BONMIN Programación básica de enteros mixtos no lineales de código abierto.

CA Corriente Alterna.

CREG Comisión Reguladora de Energía y Gas.

DPL DigSILENT Programming Language.

GD Generador de Distribución.

FP Factor de potencia.

MINLP Programa no lineal de enteros mixtos.

PoCV Punto de colapso en tensión.

pu Por unidad.

SD Sistema de Distribución.

## Conjuntos

$\Omega_N$  Conjunto que contiene todos los nodos del sistema.

## Variables

$\lambda$	Coficiente máximo de carga o Margen de estabilidad en Tensión.
$P_i^{GC}$	Potencia activa generada en el nodo $i$ por un generador. convencional.
$P_i^{GD}$	Potencia activa generada por un GD situado en el nodo $i$ .
$P_i^D$	Potencia activa total exigida en el nodo $i$ .
$Q_i^{GC}$	Potencia reactiva generada en el nodo $i$ por un generador convencional.
$Q_i^{GD}$	Potencia reactiva generada por un GD situado en el nodo $i$ .
$Q_i^D$	Potencia reactiva total exigida en el nodo $i$ .
$V_i$	Tensión nodo de envío.
$V_j$	Tensión nodo de recibo.
$Y_{ij}$	Admitancia de la linea entre el nodo $i$ y $j$ .
$\phi_{ij}$	Angulo de la admitancia de la linea entre el nodo $i$ y $j$ .
$\theta_i$	Angulo de tensión nodo de envío.
$\theta_j$	Angulo de tensión nodo de recibo.

# Capítulo 1

## Introducción

*En este capítulo se presenta una introducción general a los sistemas de distribución de energía denotando su importante rol en la provisión del servicio de electricidad a los usuarios finales; además, se presenta el problema bajo estudio, el cual está relacionado con la determinación del margen de estabilidad en sistemas de distribución considerando la localización óptima de generación distribuida; para esto se revisa el estado del arte, se presenta la justificación asociada a la importancia de esta temática, así como, los objetivos planteados para este proyecto de grado, seguido de las contribuciones y la organización del documento.*

Los sistemas eléctricos de potencia son el conjunto de elementos de generación, transmisión y distribución de energía que operan en forma conjunta y coordinada para proveer el servicio de energía eléctrica a todos los usuarios en los diferentes niveles de tensión [3]. En este sistema, se pueden identificar tres actividades esenciales, como sigue: (i) la generación de energía, necesaria para proveer la energía eléctrica demandada en toda una región o país; (ii) el transporte de energía, el cual es indispensable para transferir la energía eléctrica desde los grandes centros de generación hacia los centros de consumo, i.e., las subestaciones de subtransmisión y distribución; y (iii) la distribución de energía, la cual se encarga de la interfaz con el usuario final [4]. Dada la importancia que tienen las redes de distribución dentro del sistema eléctrico de potencia, ya que toda la potencia que se genere debe ser distribuida a los usuarios [3], este proyecto de grado de centra en la optimización de estos sistemas para mejorar su desempeño operativo ante posibles condiciones de inestabilidad de tensión.

En general, la distribución de energía eléctrica se define como el transporte de energía desde las subestaciones de subtransmisión y distribución hasta los puntos finales de consumo; es decir, desde los puntos donde llega la energía a cada lugar de demanda, i.e., casas, industrias y sectores comerciales [5]; con lo cual se considera que las actividades relacionadas con la distribución de energía son las de mayor crecimiento en el sector eléctrico. Esto se ve reflejado en el desarrollo tecnológico de los equipos que intervienen en el proceso de distribución de energía; además, se pueden encontrar nuevas metodologías de diseño, planeación y operación y mantenimiento de estas redes que maximizan los beneficios económicos de la actividad de distribución a través de la



aplicación de técnicas de optimización. Lo anterior, confirma el interés que existe en la literatura especializada y la industria por proveer y proponer metodologías que mejoren aspectos técnicos, operativos y ambientales de las redes de distribución, con el fin de hacerlas más eficientes y competitivas [6].

Por lo anterior, este estudio se centrará en el análisis de redes de distribución desde el punto de vista de optimización considerando como foco de interés el análisis de estabilidad de tensión en redes de distribución mediante el uso de herramientas programables. Estas permitirán mostrar el comportamiento de la estabilidad del sistema ante aumentos de carga y cómo influye en él la ubicación óptima de generación distribuida. En el desarrollo del documento se realiza el planteamiento del problema y justificación, además se abordará una estrategia para su solución y se presentaran las conclusiones extraídas de la investigación.

## 1.1. Planteamiento del problema

La calidad de la energía en los sistemas de distribución es un área de gran interés debido a, la creciente preocupación por crecientes perturbaciones que pueden afectar la prestación del servicio a los usuarios finales [7]. En Colombia la Comisión Reguladora de Energía y Gas (CREG) define los requerimientos de continuidad del servicio eléctrico para los sistemas de distribución de energía considerando dos índices:(i) IRAD (Índice de Referencia Agrupado de la Discontinuidad) el cual establece unos rangos de referencia a partir de los cuales se compara el desempeño en la calidad del servicio; (ii) ITAD (Índice Trimestral Agrupado de la Discontinuidad) el cual representa el nivel de calidad de servicio prestado durante un trimestre, este indicador tiene en cuenta la cantidad de interrupciones y la energía que en promedio el operador deja de suministrar a sus usuarios [8] [9]. Por lo tanto, es de vital importancia poder establecer criterios de confiabilidad y seguridad que permitan mantener la operación del sistema de distribución dentro de márgenes operativos estables. En este sentido, la estabilidad de tensión toma un papel importante dentro de los estudios relacionados con sistemas de distribución, en especial cuando se consideran fuentes de generación alternativa.

Por las razones antes mencionadas, en este proyecto de grado se pretende resolver la siguiente pregunta de investigación: ¿cuál es efecto de la inclusión de generación distribuida en el margen de estabilidad de tensión en los sistemas de distribución de energía eléctrica? Es importante mencionar que para resolver esta pregunta de investigación, se hace necesario la formulación de un modelo matemático que represente adecuadamente el problema de ubicación óptima de generación distribuida en redes eléctricas considerando como función objetivo la maximización del índice de estabilidad de tensión de la red. Posteriormente este modelo se resuelve mediante una herramienta de optimización no lineal disponible en el software GAMS; luego de esto se realiza su respectiva comprobación mediante MATLAB y una serie algoritmos que permitan verificar la calidad de los resultados obtenidos. Es importante mencionar que un proyecto de grado en la línea de estabilidad de sistemas de distribución considerando optimización matemática no ha sido presentado en el proyecto curricular de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, lo cual es un aporte al programa y a nuestra formación académica.

## 1.2. Estado del Arte

Las redes de distribución representan la parte más significativa del sistema de energía, ya que este se encarga de proporcionar electricidad a los usuarios finales a niveles de media y baja tensión, mediante la conexión del sistema de transmisión y subtransmisión [10]. Debido a que las redes de distribución pueden cubrir varios kilómetros para proporcionar el servicio de electricidad a zonas urbanas y rurales, sus pérdidas de potencia en comparación a los sistemas de transmisión son mayores [11]. Además, las redes de distribución eléctrica también pueden ser más sensibles a las inestabilidades de tensión, ya que normalmente se operan en una estructura radial [11]. En esta sección se presentarán los conceptos básicos relacionados con el desarrollo de este proyecto de grado, así como, una revisión detallada del estado del arte.

### 1.2.1. Conceptos básicos de sistemas de distribución

#### 1.2.1.1. Sistema eléctrico de distribución

Los sistemas eléctricos de distribución se definen según [12], como el conjunto de elementos encargados de conducir la energía desde una subestación de potencia hasta el usuario final. La red de distribución está formada por el conjunto de cables aéreos y subterráneos además de los centros de transformación [4]. La principal característica de estos sistemas es que operan en niveles de media tensión típicamente entre 4.6 kV y 25 kV. Además, los alimentadores de distribución tienden a tener topología radial y capacidades de 1 MVA a 5 MVA.

#### 1.2.1.2. Sistemas de prueba IEEE

Los sistemas de prueba IEEE han sido desarrollado desde hace 25 años por el grupo de trabajo del alimentador de pruebas del subcomité de análisis del sistema de distribución, este ha estado desarrollando redes de distribución de prueba disponibles abiertamente para su uso por investigadores. El propósito de estos sistemas de prueba es proporcionar modelos de redes de distribución que reflejen la amplia diversidad en el diseño y sus diversos desafíos analíticos. Debido a su utilidad y accesibilidad, los alimentadores de prueba se han utilizado para una amplia gama de investigaciones, algunas de las cuales ha estado fuera del alcance original de los usos previstos [13].

#### 1.2.1.3. Flujo de potencia

El flujo de potencia es la denominación que se le da a la solución de estado estacionario de un sistema de potencia bajo ciertas condiciones preestablecida de generación, carga y topología de la red [14]. El flujo de potencia se realiza con la finalidad de encontrar la magnitud y ángulo en todos los nodos del sistema, la potencia que circula a través de los elementos del sistema junto con sus respectivas pérdidas bajo ciertas condiciones operativas. Para resolver este problema los métodos más conocidos corresponden al método iterativo de Gauss-Seidel y Newton-Raphson; sin embargo, existen métodos de solución para flujos de potencia en sistemas de distribución

que aprovechan la topología radial de estos sistemas para mejorar la eficiencia computacional de estos.

#### **1.2.1.4. Pérdidas de potencia**

Todo circuito parte de la energía absorbida que se convierte en calorífica debido a le efecto Joule, según [15], esto se define como el fenómeno por el cual la energía eléctrica se trasforma en calor cuando la corriente atraviesa un conductor. Por lo que se considera un transporte adicional de energía para compensar las pérdidas de potencia activa por disipación de calor.

#### **1.2.1.5. GAMS (General Algebraic Modeling System)**

El software GAMS, es un herramienta de programación la cual permite la implementación de modelos de optimización matemática; este entorno de programación no es complejo y es de fácil aprendizaje [16]. La implementación de la metodología matemática en este software, permite ser utilizada como estrategia de alta efectividad para dar solución a problemas de optimización matemática no lineal para estudiantes de pregrado en ingeniería [17].

#### **1.2.1.6. MATLAB<sup>®</sup>**

El sistema de cómputo MATLAB es una herramienta de programación matemática que permite realizar cálculos numéricos con vectores y matrices [18], como caso particular puede también trabajar con números escalares (reales y complejos) [19]. Este lenguaje de programación es de alto rendimiento para cálculos técnicos, donde ofrece un entorno el cual permite construir herramientas reutilizables y además se pueden crear fácilmente funciones propias y programas especiales en código MATLAB; estos se pueden agrupar en TOOLBOX (también llamadas librerías) [19] [20].

#### **1.2.1.7. Estabilidad en tensión**

Se define como la capacidad de un sistema de potencia para mantener la tensión de estado estable en los barrajes del sistema después de haber sido sometido a una perturbación de una determinada condición de funcionamiento inicial [21]. La estabilidad en tensión es usualmente representada por las curvas PV o también conocidas como curvas "nariz" como la que se muestra en la Figura 1.1 [2], en donde la punta de la "nariz" se le denomina como el punto de colapso de tensión (PoCV) o punto de equilibrio. En este punto, la tensión cae rápidamente con un aumento de la carga y la potencia [22].

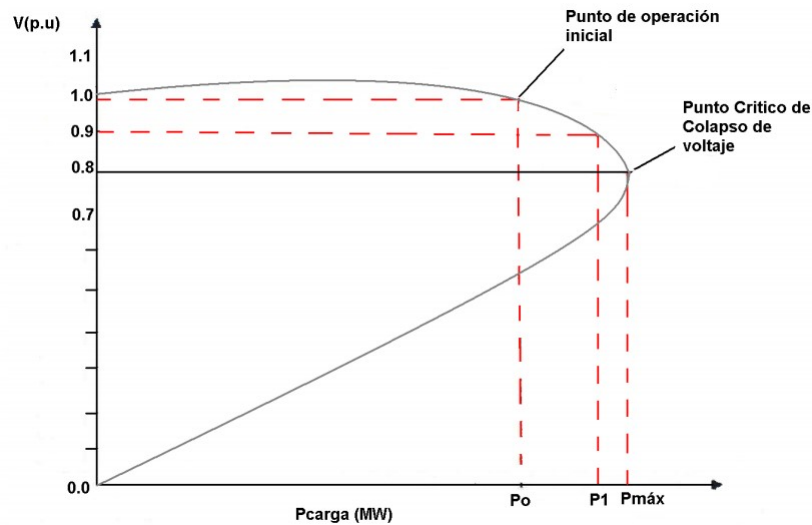


Figura 1.1: Curva PV (Fuente: [2]).

## 1.2.2. Revisión de la literatura

En la literatura científica, se presentaron varios escenarios para el análisis de los problemas de estabilidad de tensión en redes de distribución. En el año 2001 en [23] los autores presentaron un análisis de estabilidad de tensión de redes de distribución radial, además propusieron un índice de estabilidad de tensión para identificar el nodo que es más sensible al colapso en tensión, también demuestra que la solución de flujo de potencia de redes de distribución radiales es única.

Dos años después en realizaron un análisis de estabilidad de redes de distribución radiales utilizando un método de flujo de carga modificado para el análisis de estabilidad. Este método incorpora modelado de carga compuesto y variaciones del patrón de carga en cada nodo, los resultados son comparados con el método que se propuso en [23], donde resultó satisfactorio en comparación con otros métodos que se han conocido de índices de sensibilidad de tensión.

En el año 2009 los autores de [22], expusieron una metodología para optimizar la colocación de unidades de generación distribuida (GD) en redes eléctricas; con esto garantizaron el perfil de tensión máximo y determinaron las condiciones de capacidad de carga en condiciones normales y en situaciones de contingencia. Esta metodología apunta a encontrar la configuración entre un conjunto de componentes del sistema, la cual cumple con los requisitos de confiabilidad del sistema, teniendo en cuenta los límites de estabilidad.

En el año 2011 [24], se realizaron estudios de impacto de diferentes modelos de carga en una red de distribución de la zona Kumamoto en Japón, donde se proporcionaron análisis estáticos que muestran el impacto de la carga estática y el impacto en la dinámica de la tensión del sistema de distribución con generación distribuida. Un año después los autores en [25], expusieron un nuevo método para trazar curvas fotovoltaicas en sistemas de distribución de energía radial; para este método las soluciones estables e inestables se resolvieron simultáneamente. Estos resultados

se compararon con el solucionador de flujo de potencia continuo de Newton-Raphson y mostraron eficiencia en el sistema de pruebas de 33 nodos, donde su esfuerzo computacional resultó bajo, además han deducido que el modelo se adapta bien a los sistemas de distribución. En este mismo año en [26], se mostró un margen de estabilidad de tensión (VSM) de la red de distribución radial, los autores consideraron un índice de carga reactivo único para cargas compuestas. La eficiencia del VSM [26] que han propuesto se ha probado con éxito en una red de distribución radial para una configuración de 33 nodos.

En el año 2012 [27] propusieron la planificación de generación estática y dinámica basada en márgenes de potencia reactiva para mejorar la estabilidad de tensión dinámico en redes de distribución con generación eólica distribuida. El objetivo principal del trabajo fue mostrar la mejora de estabilidad en voltaje dinámico de los sistemas de generación distribuida de una manera rentable y que cumplan estándares normalizados para industrias.

En el año 2015 [28], los autores describieron un método de cuantificación de la incertidumbre para unidades de medida fasorial (PMU) en la evaluación de la estabilidad de tensión.

En el año [29], se ha mostrado el efecto característico de la carga en el funcionamiento de las curvas P-V, donde modifica el sistema cerca o lejos de la Bifurcación de la nariz del sillín (SNB); plantearon un índice de estabilidad de voltaje modificado (MVS), además tuvieron en cuenta unidades GD y modelo de carga ZIP el cual establece la dependencia de la potencia con respecto a la tensión y representa las características de impedancia (Z) constante, Corriente (I) constante y potencia (P) constante [30]; con esto analizaron la estabilidad en tensión en buses estándar IEEE-34 desequilibrado DS. En este mismo año implementaron un método de solución para el análisis de estabilidad en tensión en sistemas de distribución. En [31] presentaron un enfoque analítico basado en el análisis de circuitos y método bicuadrático, los autores evaluaron la estabilidad de tensión en redes de distribución radiales.

En el año 2018 [32], los autores han propuesto un índice de estabilidad en los sistemas de distribución de corriente alterna (CA), mediante el uso de la relación de admisión de carga de red, demostrando que el flujo de potencia jacobino es singular si y sólo si la relación de admisión de carga de red es unitaria, esto quiere decir que mostraron un comportamiento lineal con un aumento de carga. Al siguiente año en [33] plantearon el análisis teórico sobre el estado de estabilidad de la tensión de la red de distribución de CA. Este análisis ha determinado unos puntos prácticos esenciales, como la reserva de marcha estática y el fenómeno de inestabilidad en tensión, el límite de estabilidad de tensión estático y la potencia activa máxima. En este mismo año los autores de [34], estudian el impacto en el margen de estabilidad en tensión en una micro red isleña teniendo en cuenta la generación fotovoltaica, esto mediante un indicador de proximidad de colapso de tensión basado en la máxima potencia entregada. Los autores desarrollaron las conocidas curvas PV, o también conocidas como curvas de “nariz”, tuvieron en cuenta diferentes niveles de penetración fotovoltaica, adicional investigaron el efecto del factor de potencia en los generadores fotovoltaicos [34].

Con base de la revisión bibliográfica realizada, se puede evidenciar que en la literatura no es

fácil encontrar publicada sobre una formulación matemática la cual represente adecuadamente el cálculo del margen de estabilidad considerando la penetración de fuente de generación distribuida y la mejora de este a partir de un modelo de programación no lineal, de lo cual corresponde a el aporte de esta investigación.

### 1.3. Justificación

En los últimos años ha incrementado el interés por la producción de energía eléctrica a partir de energías renovables tales como: viento, sol y agua, cuyos principales impulsores son ahorro de combustible, el abastecimiento de lugares remotos, consideraciones ambientales, además de la creciente demanda eléctrica [22]. Todos estos factores hacen que las fuentes renovables sean una alternativa viable con los que se pretende suplir la demanda energética y cumplir con las políticas medioambientales vigentes. Dichas modificaciones pueden generar cambios en el sistema los cuales influyen en la estabilidad en tensión de la red [35]. Un sistema de potencia o de distribución es estable en tensión, si los valores de tensión en los nodos del sistema se encuentran en equilibrio o cerca de un valor inicial de funcionamiento después de estar sometido a una perturbación [21]. Además, dicho sistema será inestable en tensión si una perturbación tal como un aumento de carga o un cambio en las condiciones iniciales del sistema causa una caída o aumento progresivo tensión en los nodos del sistema que no puede ser reparado [22].

En la literatura especializada se han propuesto nuevas metodologías para la colocación de fuentes de generación de energía conectadas a sistemas de distribución con el fin de optimizar el consumo de energía [36]. También se han descrito modelos multi-objetivo para minimizar las pérdidas de potencia activa y reactiva con el fin de mejorar los perfiles de tensión [37]. Estos modelos se proponen como nuevos sistemas de generación de energía por su fácil acceso y pequeños costos; además, de su fácil implementación ya que son denominados sistemas de generación de energía renovable o no convencionales, con lo cual se hace importante el estudio de estabilidad en tensión, debido al impacto que se tiene incluir estas nuevas fuentes de generación no convencional al sistema.

Dado la progresiva integración de sistemas de generación de energía en niveles de media tensión, en este trabajo se aborda el problema de maximización del margen de estabilidad en sistemas de distribución de energía mediante la ubicación y el dimensionamiento óptimo de fuentes de generación distribuida. Esto se desarrolla a través de una formulación matemática de tipo no lineal entera mixta, la cual requiere de herramientas eficientes de solución. Por lo anterior, se selecciona el software GAMS como estrategia solución, y sus resultados se comparan con flujos de potencia recursivos y la verificación en el software DigSILENT para sistemas de prueba de 33 y 69 nodos, respectivamente. Nótese, que esta investigación no se ha presentado previamente en la literatura especializada, lo cual es una clara oportunidad de investigación que se aborda en este proyecto de grado.

## 1.4. Objetivos

Los objetivos generales y específicos considerados en el desarrollo de este proyecto de grado son los siguientes:

### 1.4.1. Objetivo General

Determinar la ubicación y el tamaño óptimo de las fuentes de generación distribuida en redes eléctricas de distribución para mejorar el margen de estabilidad de voltaje empleando un modelo matemático de optimización en el software GAMS.

### 1.4.2. Objetivos específicos

1. Desarrollar un modelo matemático de optimización que represente adecuadamente el cálculo del margen de estabilidad en sistemas de distribución de energía considerando penetración de fuentes de generación distribuida.
2. Implementar el modelo matemático desarrollado para la ubicación óptima de la generación distribuida en el software de optimización GAMS empleando sistemas de prueba de 33 y 69 nodos con topología radial.
3. Validar los resultados obtenidos para el margen de estabilidad antes y después de la ubicación de la generación distribuida en los sistemas de prueba de 33 y 69 nodos mediante en el software DigSILENT, con el fin de verificar la fidelidad entre el modelo matemático implementado y los modelos de análisis de sistemas de potencia disponibles en DigSILENT.

## 1.5. Contribuciones del proyecto de grado

La principal contribución de este proyecto de grado está enfocado a la comunidad académica, ya que se presenta una metodología de solución para el problema de cálculo del margen de estabilidad en sistemas de distribución mediante un modelo matemático de programación no lineal entero mixto, el cual es resuelto mediante su implementación en el entorno de programación matemática de GAMS. Para lo anterior, se presenta la forma de implementación a manera de tutorial y sus resultados se validan con flujos de potencia recursivos, así como, con la simulación de los sistemas de prueba en DigSILENT para verificar resultados. Es importante mencionar, que de este trabajo de grado se está elaborando un artículo científico, el cual será sometido a una revista con categoría  $Q_3$  o superior; lo cual confirma la novedad de la temática tratada, así como, de la metodología de solución propuesta.

## 1.6. Organización del documento

El resto de esta monografía está estructurada de la siguiente forma:

- En el capítulo 2 se presenta la metodología para obtención de la curva PV y a partir de esto identificar el índice de estabilidad de un sistema radial simple; seguido a esto se realiza la implementación en el software MATLAB de la metodología para la obtención de curva  $\lambda$ - V con respecto a diferentes factores de Potencia. Adicional a esto se explica la metodología para la implementación de un algoritmo para calcular el margen de estabilidad o coeficiente  $\lambda$  en sistema radial de N nodos.
- En el capítulo 3 se muestra el modelo de optimización matemática para la determinación del margen de estabilidad en tensión para un sistema de distribución. Además, se presenta una descripción acerca de las funcionalidades del software GAMS; en este se implementará el modelo matemático en un sistema de prueba de 7 nodos en donde se realizará la descripción del algoritmo.
- En el capítulo 4 se exponen los parámetros y características de los sistemas de prueba; También se realiza la comprobación de la simulación en DigSILENT de cada sistema de prueba. Además, se indican los escenarios de estudio con lo que se realizara el cálculo del margen de estabilidad en tensión de cada sistema de prueba.
- En el capítulo 5 se presentan los resultados obtenidos de los sistema de prueba para cada caso de estudio presentado en 4; con base en la implementación de la metodología planteada en los capítulos 2 y 3 se realiza el análisis de los datos; posterior a esto se realiza una comparación de los perfiles de tensión obtenidos en GAMS y DigSILENT para el caso base en cada alimentador de pruebas.
- Finalmente en el capítulo 6, se encuentran las conclusiones y trabajos futuros derivados de este proyecto, además la bibliografía empleada para la realización del mismo.



## Capítulo 2

# Curvas de estabilidad de tensión $P-V$ o $\lambda-V$

En este capítulo se expone el proceso algebraico para la determinación de la ecuación de cuarto grado, donde se pretende abordar el cálculo del margen de estabilidad en tensión de un sistema radial simple fuente-línea-carga y generar su respectiva curva  $PV$  y  $\lambda V$ ; para esto fue necesario ejemplificar la adaptación de la ecuación de cuarto grado dentro de un algoritmo ejecutado en MATLAB para la determinación del margen, se presentan gráficas del sistema fuente-línea-carga a diferentes factores de potencia y seguido se realiza la aplicación de la lógica utilizada para determinar el margen de estabilidad de tensión de un sistema radial de  $N$  nodos.

### 2.1. Límite de estabilidad para un sistema fuente-línea-carga

Para ilustrar el problema de estabilidad de tensión en un sistema eléctrico, considérese el diagrama fuente-línea-carga que se presenta en la Figura 2.1; donde existe una impedancia de línea compuesta de un arreglo serie resistencia-inductancia y una carga de potencia constante. De este esquema, se supone conocida la tensión en la fuente y el ángulo de la carga, y se requiere de conocer el valor de la tensión en esta última.

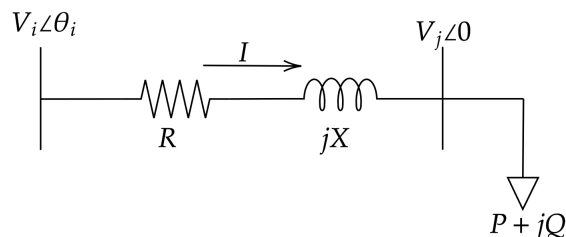


Figura 2.1: Circuito representativo de un sistema radial (Fuente: Autores).

Nótese que el diagrama de la Figura 2.1 se conoce al nodo de carga como el nodo de recibo y la fuente como el nodo de envío. Para este circuito se aplica la primera y segunda leyes de Kirchoff se obtienen la Ecuación (2.1) para la corriente que fluye por la línea, y la definición de potencia en terminales de la carga, i.e., Ecuación (2.2).

$$I = \frac{V_i \angle \theta_i - V_j \angle 0}{R + jX} \quad (2.1)$$

$$V_j I^* = P + jQ \quad (2.2)$$

Además, de la expresión (2.2) se puede obtener la corriente de línea en función de la carga como sigue:

$$I = \frac{P - jQ}{V_j \angle 0} \quad (2.3)$$

Al definirse la corriente del sistema de dos maneras distintas, se puede igualar (2.1) con (2.3), con el fin de obtener (2.4), de la anterior se trasladan los denominadores a multiplicar a lados opuestos del igual, tal como se presenta en (2.5).

$$\frac{V_i \angle \theta_i - V_j \angle 0}{R + jX} = \frac{P - jQ}{V_j \angle 0} \quad (2.4)$$

$$V_j V_i \angle \theta_i - V_j^2 = (P - jQ)(R + jX) \quad (2.5)$$

De la expresión (2.5) se separa parte real y parte imaginaria, tal como se presenta en (2.6) y (2.7), respectivamente.

$$V_j V_i \cos(\theta_i) = V_j^2 + (RP + XQ) \quad (2.6)$$

$$V_j V_i \sin(\theta_i) = XP - RQ \quad (2.7)$$

Para eliminar los términos de  $\sin(\theta_i)$  y  $\cos(\theta_i)$  se eleva al cuadrado cada una de las ecuaciones anteriores obtenido como resultado las expresiones (2.8) y (2.9), respectivamente, finalmente estas se suman y se obtiene como resultado la Ecuación (2.10).

$$V_j^2 V_i^2 \cos^2(\theta_i) = V_j^4 + 2V_j^2(RP + XQ) + (RP + XQ)^2 \quad (2.8)$$

$$V_j^2 V_i^2 \sin^2(\theta_i) = (XP - RQ)^2 \quad (2.9)$$

$$0 = V_j^4 + V_j^2(2(RP + XQ) - V_i^2) + (R^2 + X^2)(P^2 + Q^2) \quad (2.10)$$

Se puede observar que en (2.10) se tiene un polinomio de segundo grado con variable dependiente  $V_j^2$ , al aplicar la solución cuadrática y racionalizar en ambos lados de la ecuación, se obtiene la fórmula (2.11).

$$V_j = \pm \sqrt{\frac{-(2(RP + XQ) - V_i^2) \pm \sqrt{(2(RP + XQ) - V_i^2)^2 - 4(R^2 + X^2)(P^2 + Q^2)}}{2}} \quad (2.11)$$

A partir de (2.11), se observa que el termino que delimita el conjunto de soluciones esta dado por el argumento de la raíz interna, el cual se presenta de nuevo en (2.12). Este término debe ser mayor o igual cero para que exista una solución real.

$$\left(2(RP + XQ) - V_i^2\right)^2 - 4(R^2 + X^2)(P^2 + Q^2) \geq 0 \quad (2.12)$$

Nótese que la expresión (2.12) que pueden existir combinaciones de potencia activa y reactiva e impedancias de línea que pueden llevar el sistema a un colapso de tensión, dado que existe un conjunto infinito de variables y parámetros que no satisfacen esta desigualdad.

## 2.2. Representación curva $\lambda$ - $V$ en MATLAB®

Con el fin de ilustrar el efecto que tiene el aumento progresivo de carga en la estabilidad de tensión en sistema de distribución, se considera el factor  $(1 + \lambda)$  como factor de incremento de las potencias activas y reactivas. Lo cual transforma la expresión (2.10) en (2.13), a la anterior se le calculan las raíces, como resultado se tendrá una raíz positiva y una raíz negativa, ya que las raíces son soluciones a el polinomio y dichas soluciones son las tensiones del nodo  $j$ ; se tendrá en cuenta únicamente la raíz positiva como solución a la expresión, esto se realiza con cada valor de  $\lambda$ .

$$0 = V_j^4 + V_j^2 \left(2(RP(1 + \lambda) + XQ(1 + \lambda)) - V_i^2\right) + (R^2 + X^2)(1 + \lambda)(P^2 + Q^2) \quad (2.13)$$

Para ilustrar el efecto del aumento progresivo de las cargas en la tensión, se consideran los datos de la Tabla 2.1. Nótese que se ha tomado la tensión del nodo de envío en 0.9320 pu para emular que esta es una línea aguas abajo en un alimentador de distribución donde la tensión del nodo de envío no es necesariamente igual a la fuente. Además, se tiene en cuenta una potencia aparente de 0.0900 pu, con la cual se realizarán pruebas para diferentes factores de potencia.

En el Algoritmo 1 se presenta el código de MATLAB para obtener la curva PV o  $\lambda$ -  $V$  a través de la solución de la expresión (2.13), esto se realiza teniendo en cuenta distintos valores de factor de potencia en atraso.

Tabla 2.1: Parámetros de simulación para la construcción de curvas  $\lambda$ -  $V$  en MATLAB (Fuente: Autores).

Datos para la prueba	
$V_i$	0.9320 pu
$R$	0.7373 pu
$X$	0.5770 pu
$S$	0.0900 pu

En el Algoritmo 1 se presenta el código de MATLAB para obtener la curva PV o  $\lambda$ -  $V$  a través de la solución de la expresión (2.13).

En las Figuras 2.2 y 2.3 se presentan la curvas  $\lambda$ -  $V$ , donde se puede observar el máximo aumento de potencia activa que puede tener el sistema, a partir de este se obtienen las curvas  $\lambda$ -  $V$  para diferentes factores de potencia donde se consideran 4 casos de factor de potencia.

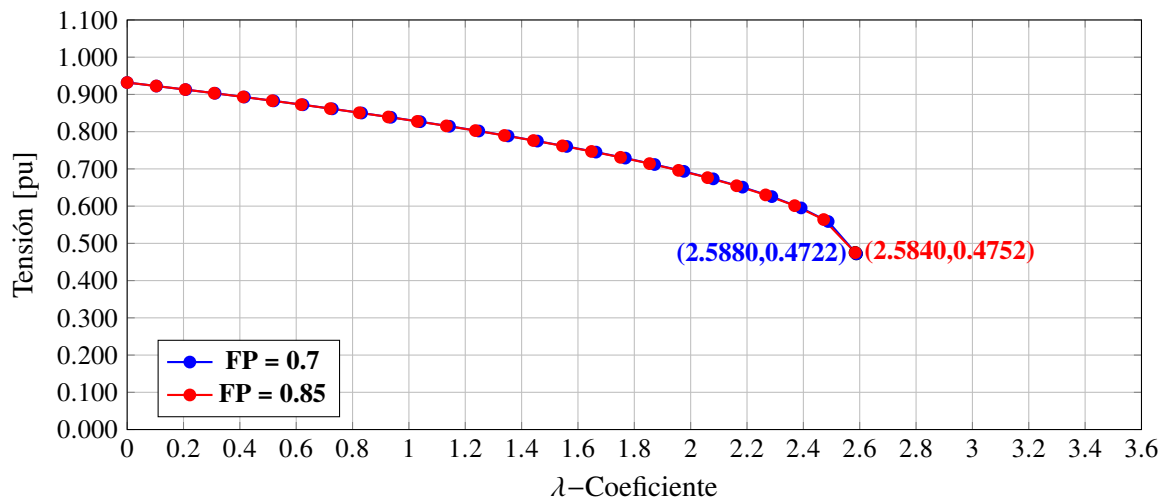


Figura 2.2: Curvas  $\lambda$ -  $V$  y coeficiente ( $\lambda$ ) máximo de un sistema radial simple para FP = 0.7 y FP = 0.85 (Fuente: Autores).

Como se menciona anteriormente en la Figura 2.2 se puede observar la curva  $\lambda$ -  $V$  obtenida para los dos casos iniciales (FP = 0.7 y FP = 0.85), en donde el coeficiente ( $\lambda$ ) para un FP = 0.7 es mayor que para FP = 0.85. Para este caso en particular esto sucede por que hay un aumento progresivo de la potencia activa tanto como de la reactiva. Además también se puede percibir que al tener un factor de potencia mas cercano a 1, el sistema puede soportar incrementos de carga cada vez mas grandes.

**Algorithm 1** Algoritmo para realizar la gráfica de la curva  $\lambda$ -  $V$  teniendo en cuenta variaciones en el factor de potencia.

```

1  clc
2  clear all
3  %% DATOS INICIALES
4  vs=0.9032;
5  r=0.7373;
6  x=0.5770;
7  S=0.09;
8  FP=0.8;
9  %% CALCULO DE P Y Q DE LA CARGA CON RESPECTO AL FP
10 p0=S*FP;
11 delta = acos(FP);
12 delta_grados= delta*(180/pi);
13 q0=S*sin(delta);
14 %% GRAFICA DE CURVA PV
15 i=0;
16 Vr = zeros(2039,1);
17 paso=0.001;
18 for lambda= 0:paso:5
19     i = i + 1;
20     p=lambda*p0;
21     q=lambda*q0;
22     a=1;
23     b=((2*r*p)+(2*x*q)-(vs^2));
24     c(((r^2)+(x^2))*((p^2)+(q^2)));
25     R=[a 0 b 0 c];
26     vr=roots(R);
27     vr=vr(vr>0);
28     if imag(vr) == 0
29         Vr(i)= vr(1);
30     else
31         break
32     end
33 end
34 %% MARGEN DE ESTABILIDAD EN VOLTAJE
35 lambda = lambda-paso
36 %% POTENCIA ACTIVA Y REACTIVA MAXIMA
37 Pmax = p0*lambda
38 Qmax = q0*lambda

```

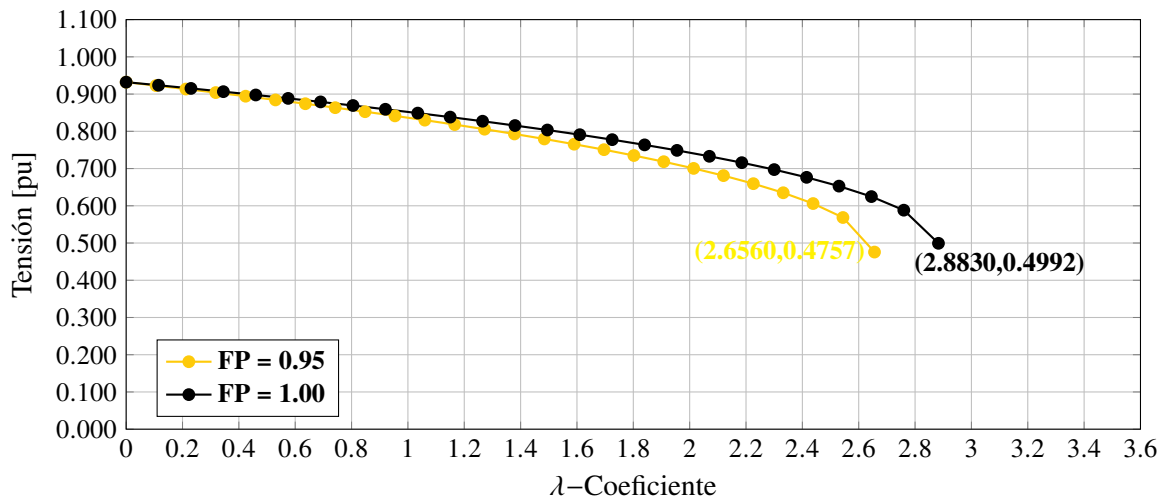


Figura 2.3: Curvas  $\lambda$ -  $V$  y coeficiente ( $\lambda$ ) máximo de un sistema radial simple para FP = 0.95 y FP = 1.00 (Fuente: Autores).

### 2.3. Obtención del coeficiente de estabilidad en MATLAB para sistemas radiales

A partir de la metodología presentada anteriormente para la obtención de las curvas  $\lambda$ -  $V$  en MATLAB, se realiza un algoritmo iterativo donde se utiliza la teoría de flujo de potencia como herramienta para comprobar la convergencia del sistema a medida que el coeficiente ( $\lambda$ ) aumenta y con esto aumentar la carga del sistema. Esto quiere decir que en el momento en que el sistema con la carga aumentada  $\lambda$ -veces no converja, se llegara al límite de incremento de carga o margen de estabilidad del sistema. El resultado obtenido por este algoritmo, se ve condicionado por el incremento del coeficiente  $\lambda$ , es decir, si se quieren 8 decimales este debe aumentar en pasos de  $80 \times 10^{-9}$ , esto implicaría mayor costo computacional y altos tiempos de ejecución, por tal razón para el caso de la presente investigación el incremento del ( $\lambda$ ) se realiza a pasos  $1 \times 10^{-4}$  con el fin de obtener 4 cifras significativas.

En el diagrama de flujo de la Figura 2.4, se presentan los principales elementos para una correcta solución del problema de cálculo de margen o coeficiente de estabilidad en tensión en sistemas radiales de  $N$  nodos. La solución completa o algoritmo funcional en MATLAB se puede encontrar en el Anexo A.

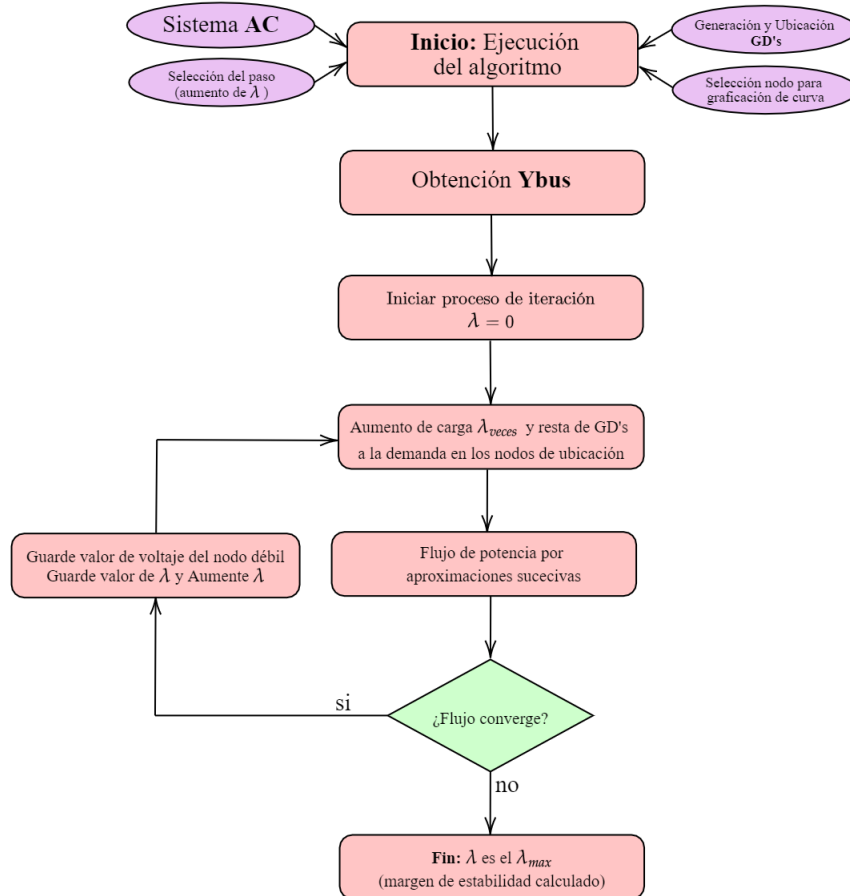


Figura 2.4: Algoritmo general de implementación en MATLAB para sistemas radiales de  $N$  nodos (Fuente: Autores).

### 2.3.1. Ejemplo de Aplicación

Con el fin de presentar un ejemplo de la aplicación del algoritmo, se muestra la implementación del procedimiento realizado anteriormente en un sistema de prueba de 7 nodos Figura 2.5.

Esta red eléctrica se compone por 7 nodos y 6 líneas operadas a 23 kV como salida de tensión en la subestación y 1 MVA como potencia base. Los parámetros de este alimentador se presentan en la Tabla 2.2.

La aplicación del algoritmo para un sistema de 7 nodos se encuentra en el Anexo A, en este se puede evidenciar los parámetros y características del sistema mencionados anteriormente. Es importante tener en cuenta que para este ejemplo de aplicación solo se realiza el proceso de cálculo de coeficiente de estabilidad para el caso base en esta sección, es decir, no se tiene en cuenta inclusión de generación distribuida.

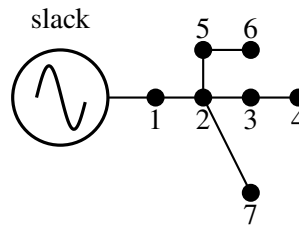


Figura 2.5: Configuración eléctrica de los alimentadores de prueba: sistema de prueba de 7 nodos (Fuente: Autores).

La Figura 2.6 representa la curva  $\lambda$ -  $V$  del sistema de prueba de 7 nodos, de esta se puede evidenciar el comportamiento ante aumentos de carga progresivos que se plantean en el Algoritmo 3 (Anexo A). Se puede evidenciar que el valor del coeficiente ( $\lambda$ ) es 15.584, esto quiere decir que la carga puede aumentar 15.584 veces antes de que ocurra un colapso por tensión.

Tabla 2.2: Parámetros eléctricos para el sistema de 7 nodos usado en el ejemplo de implementación de GAMS (Fuente: [1]).

Nodo $i$	Nodo $j$	$R_{ij}$ [ $\Omega$ ]	$X_{ij}$ [ $\Omega$ ]	$P_j$ [kW]	$Q_j$ [kvar]
1	2	0.5025	0.3025	1000	600
2	3	0.4020	0.2510	900	500
3	4	0.3660	0.1864	2500	1200
2	5	0.3840	0.1965	1200	950
5	6	0.8190	0.7050	1050	780
2	7	0.2872	0.4088	2000	1150

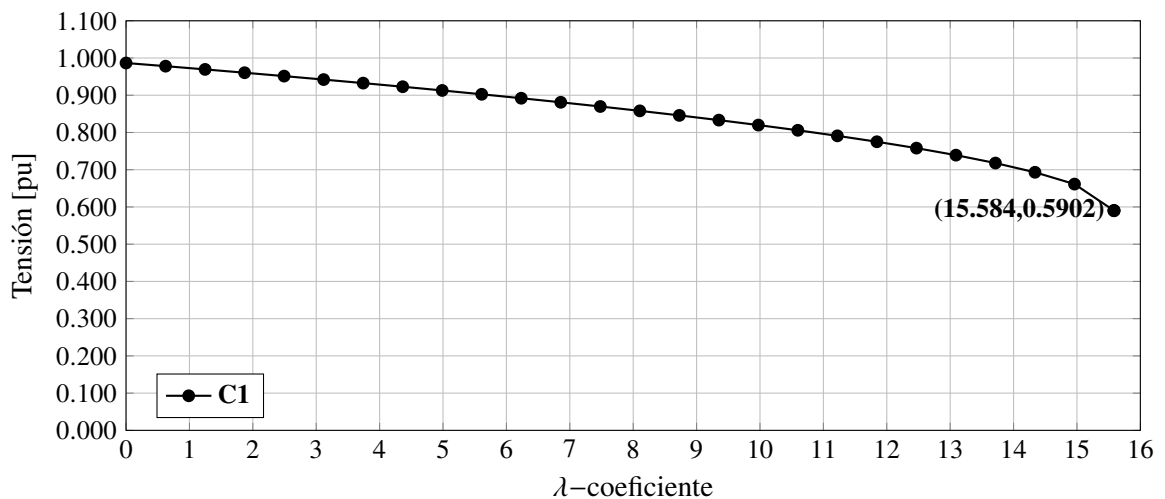


Figura 2.6: Gráfica de estabilidad en tensión coeficiente ( $\lambda$ ) para un sistema de prueba 7 nodos (Fuente: Autores).



# Capítulo 3

## Modelo de optimización generalizado

*En este capítulo se desarrolla la formulación matemática que da solución al problema de determinación de margen de estabilidad en tensión en sistemas de distribución considerando la localización óptima de generación distribuida mediante un modelo de programación no lineal entero mixto; el cual es resuelto mediante su implementación en el entorno de programación matemática GAMS mediante el solucionador BONMIN, además se realiza un ejemplo de aplicación de la metodología en un sistema de prueba de 7 nodos; para llevar a cabo este proceso se realiza una breve explicación del entorno de programación.*

### 3.1. Formulación matemática

El problema del cálculo del margen de estabilidad en tensión en redes de distribución se puede representar en un modelo de programación no lineal, considerando como función objetivo la maximización del coeficiente  $\lambda$  [38]. Este parámetro permite conocer el incremento simultáneo máximo en todas las cargas antes hasta el punto de colapso de tensión [39].

#### 3.1.1. Función objetivo

La función objetivo del problema corresponde al coeficiente de carga de toda la cuadrícula de distribución, que se maximiza y se puede escribir matemáticamente (3.1).

$$z = \text{máx}\{\lambda\} \tag{3.1}$$

Donde  $z$  es el valor de la función objetivo, y  $\lambda$  representa el coeficiente máximo de carga.

#### 3.1.2. Conjunto de restricciones

El conjunto de restricciones asociadas con el problema de maximización del margen de estabilidad en sistemas de distribución considerando generación distribuida incluye restricciones

tales como: (i) ecuaciones de balance de potencia activa y reactiva; (ii) ecuación de regulación de tensión; (iii) ecuación de límite máximo de generación de potencia activa para cada unidad GD; (iv) variable binaria de ubicación y (v) ecuación de porcentaje penetración de generación distribuida. Estas se describen a continuación:

$$P_i^{GC} + P_i^{GD} - P_i^D(1 + \lambda) = V_i \sum_{j \in \Omega_N} V_j Y_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j - \phi_{ij}), \{V_i \in \Omega_N\} \quad (3.2)$$

Donde  $P_i^{GC}$  representa la potencia activa generada en el nodo  $i$  por un generador convencional (GC), se entiende como la potencia suministrada por la red eléctrica;  $P_i^{GD}$  es la potencia activa generada por un generador distribuido (GD) situado en el nodo  $i$ ;  $P_i^D$  es la potencia activa total exigida en el nodo  $i$ .

$$Q_i^{GC} - Q_i^D(1 + \lambda) = V_i \sum_{j \in \Omega_N} V_j Y_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j - \phi_{ij}), \{V_i \in \Omega_N\} \quad (3.3)$$

En la ecuación (3.3)  $Q_i^{GC}$  representa la energía reactiva generada en el nodo  $i$  por un generador convencional;  $Q_i^{GD}$  es la potencia reactiva generada por un GD situado en el nodo  $i$ ;  $Q_i^D$  es la potencia reactiva total exigida en el nodo  $i$ .

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max}, \{V_i \in \Omega_N\} \quad (3.4)$$

De (3.4)  $V_i^{\min}$  y  $V_i^{\max}$  representa los valores de tensión mínimos y máximos permitidos en cada nodo, esta corresponde a la restricción de regulación de tensión; según la CREG en la resolución 024 del 26 de abril de 2005: “En condiciones normales de operación en Colombia las tensiones en las barras de 115kV, 110kV y 220kV, 230kV no deben ser inferiores al 90 % ni superiores al 110 % del valor nominal. Para la red de 500kV el voltaje mínimo permitido es del 90 % y el valor máximo es del 105 % del valor nominal”.

$$0 \leq P_i^{GD} \leq x_i P_i^{GD \max}, \{V_i \in \Omega_N\} \quad (3.5)$$

Donde  $P_i^{GD \max}$  es la inyección de energía activa máxima permitida el nodo  $i$  por un GD y  $x_i$  representa la variable de decisión, que toma un valor de 1 si el GD se encuentra en el nodo  $i$  y 0 de lo contrario. La Ecuación (3.5) muestra la posibilidad de localizar y dimensionar un GD en cualquier nodo del sistema. Consideramos solo la inyección de energía activa en los GD, lo que significa que  $Q_i^{GD} = 0$  en este proyecto de grado.

$$\sum_{i \in \Omega_N} x_i \leq N_{dis}^{GD} \quad (3.6)$$

La ecuación (3.6) limita el número de posibilidades de ubicación para la generación distribuida en el sistema por lo que  $N_{dis}^{GD}$  es el numero disponible de GD.

$$\sum_{i \in \Omega_N} P_i^{GD} \leq \beta \sum_{i \in \Omega_N} P_i^D \quad (3.7)$$

La ecuación (3.7) representa la cantidad de penetración de generación distribuida, donde  $\beta$  es un parámetro que representa el porcentaje de penetración de generación distribuida en el sistema; esta se plantea con el fin de estudiar distintos casos de estudio con el control de dicho porcentaje.

$$x_i \in \{0, 1\} \quad \{\forall_i \in \Omega_N\} \quad (3.8)$$

En (3.8) se expresa el carácter binario de la variable de decisión y (3.9) presenta la definición de positivo del  $\lambda$ - coeficiente.

$$\lambda \geq 0 \quad (3.9)$$

### 3.1.3. Observaciones Generales

El modelo MINLP descrito en las ecuaciones (3.1)-(3.9), representan el problema del cálculo del margen de estabilidad en tensión en redes de distribución. La ecuación (3.1), corresponde a la función objetivo del problema de estabilidad de tensión en las redes de distribución que se ocupa de calcular el factor de cargabilidad máxima de la red [40].

Esta formulación matemática se puede implementar directamente en la plataforma GAMS [41], lo que permite tener un solución óptima con un bajo esfuerzo computacional. Dicha solución se presentará en la siguiente sección mediante un ejemplo ilustrativo para el sistema de 7 nodos en el software GAMS a manera de tutorial.

## 3.2. Sistema general de modelado algebraico: GAMS

El Sistema de Modelado Algebraico General (GAMS, por sus siglas en inglés), fue diseñado especialmente para modelar sistemas lineales o no lineales y problemas de optimización [41]. Este software es un potente paquete para la resolución de dichos problemas a gran escala basados es una formulación completa [1]; además, este cuenta con una secuencia lógica de implementación del modelo matemático bajo estudio y su posterior resolución [42].

Para solucionar un problema de programación en la herramienta GAMS, se deben tener claras las variables, conjuntos de datos, ecuaciones y estructura general del modelo. En la Figura 3.1 se presentan las componentes particulares de un modelo en estudio con los cuales se podrá dar solución a un problema de programación a través de cinco componentes esenciales [1] que se presentan a continuación:

1. Los conjuntos donde las variables tienen sentido, por ejemplo, conjunto de nodos  $i \in \Omega_N$ .

2. Todos los escalares, parámetros y matrices implicados en el modelo, es decir, el número de generadores, matrices y vectores.
3. Todas las variables del modelo, por ejemplo, tensiones, potencias, ángulos, etc.
4. Los nombres de las ecuaciones y estructuras matemáticas, por ejemplo (3.2), (3.3) asociadas con las restricciones de equilibrio de potencia.
5. Definir la naturaleza del modelo de optimización y las opciones de visualización.

```
*Definición de los conjuntos
SETS
*Definición de los escalares
SCALARS
*Definición de los parametros
PARAMETERS
*Definición de las matrices
TABLE
*Definición de las variables
VARIABLES
*Definición de las ecuaciones
EQUATIONS
*Definición de las características
MODEL
OPTIONS
SOLVE
DISPLAY
```

Figura 3.1: Estructura de un modelo optimización en GAMS (Fuente: Autores).

Una vez descritas estas componentes esenciales del paquete de optimización GAMS, es importante escoger el solucionador adecuado para este modelo descrito al inicio de este capítulo (ver ecuaciones (3.1) a (3.9)). Una vez creado el archivo, donde se asigna el nombre y la ubicación se deben seguir los siguientes pasos para la selección del solucionador:

1. Ubicarse en la interfaz de inicio del programa GAMS Figura 3.2 y seleccionar la opción file.

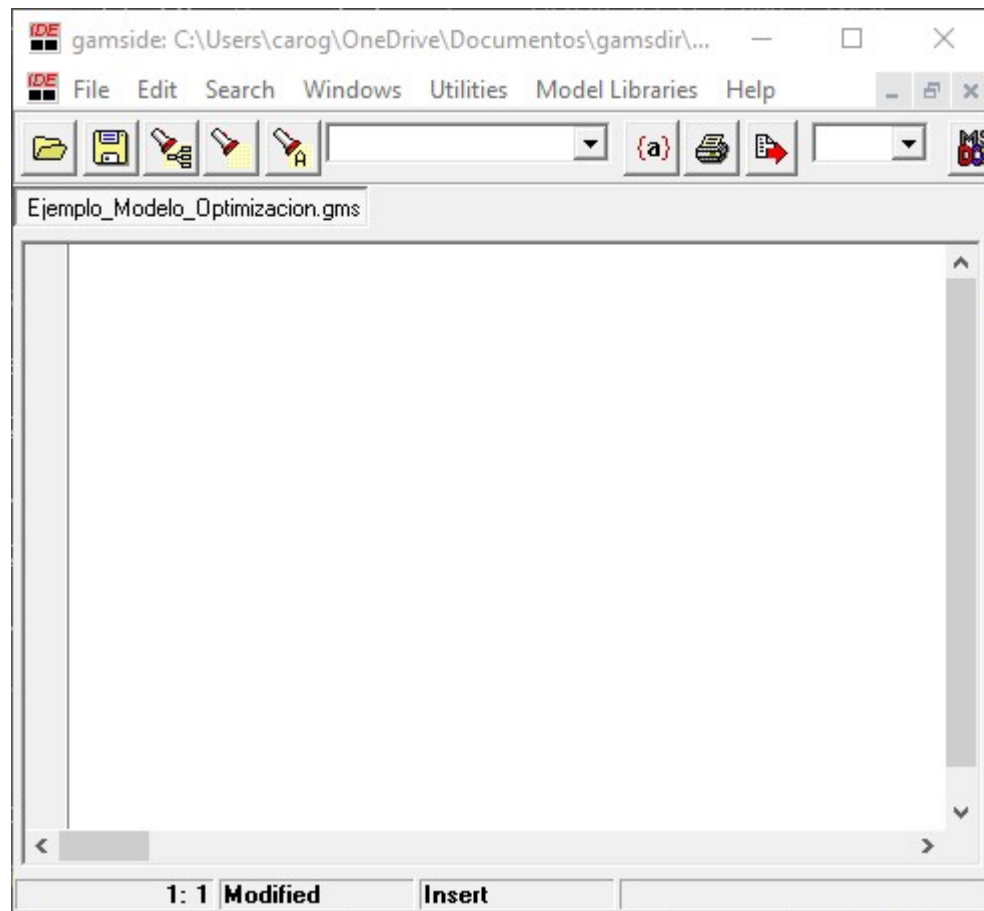


Figura 3.2: Interfaz de inicio de GAMS (Fuente: Autores).

2. Seguido a esto a aparecerá una barra de menús en donde se seleccionara options (ver Figura 3.3).
3. Esto generará una ventana de opciones (ver Figura 3.4.) con diferentes pestañas.
4. Ubicarse en la pestaña solvers y aparecerá un tabla con los solucionadores, en la cual se muestra si posee la licencia full o demos, o si no la posee (ver Figura 3.5.) Se puede escoger cualquier solvers que tenga la capacidad de solucionar modelos del tipo MINLP (programa no linea de enteros mixtos). Para el caso particular de este proyecto de grado se selecciona el solver BONMIN; este es un solucionador de código abierto para la programación no lineal de enteros mixtos.

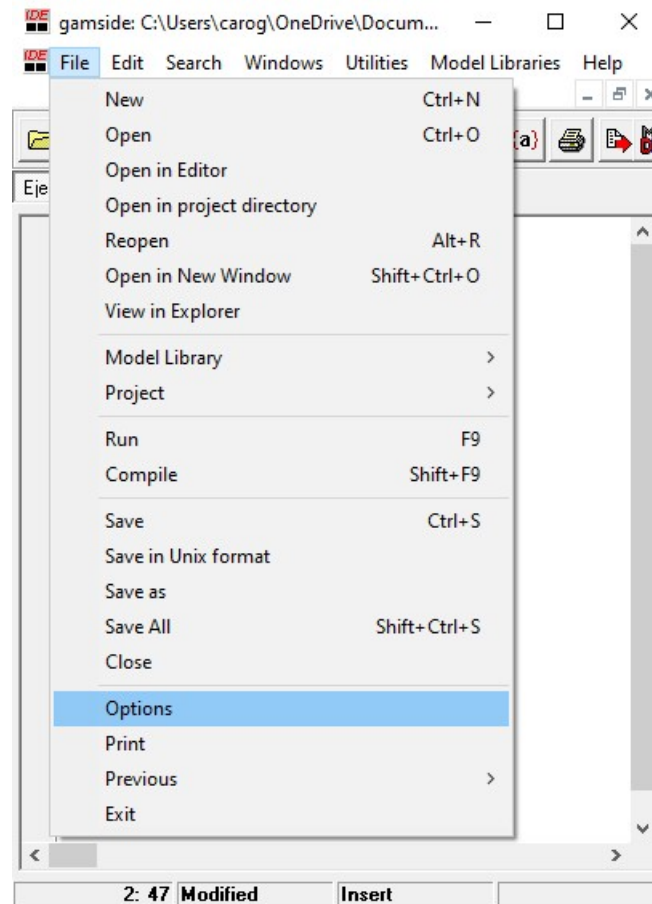


Figura 3.3: Barra de menu en GAMS.

A partir de los procesos descritos anteriormente en GAMS, se procede a la aplicación del algoritmo del modelo matemático y para correr el programa se utiliza el botón RunGams o F9 como se presenta en Figura 3.6. Seguido a esto se generan dos ventanas donde una de estas se podrá observar el informe general de la solución del modelo matemático. Es importante aclarar que GAMS también tiene un botón de ayuda Help o ayuda en donde esta ofrece el manual de usuario entre otras ayudas Figura 3.7.

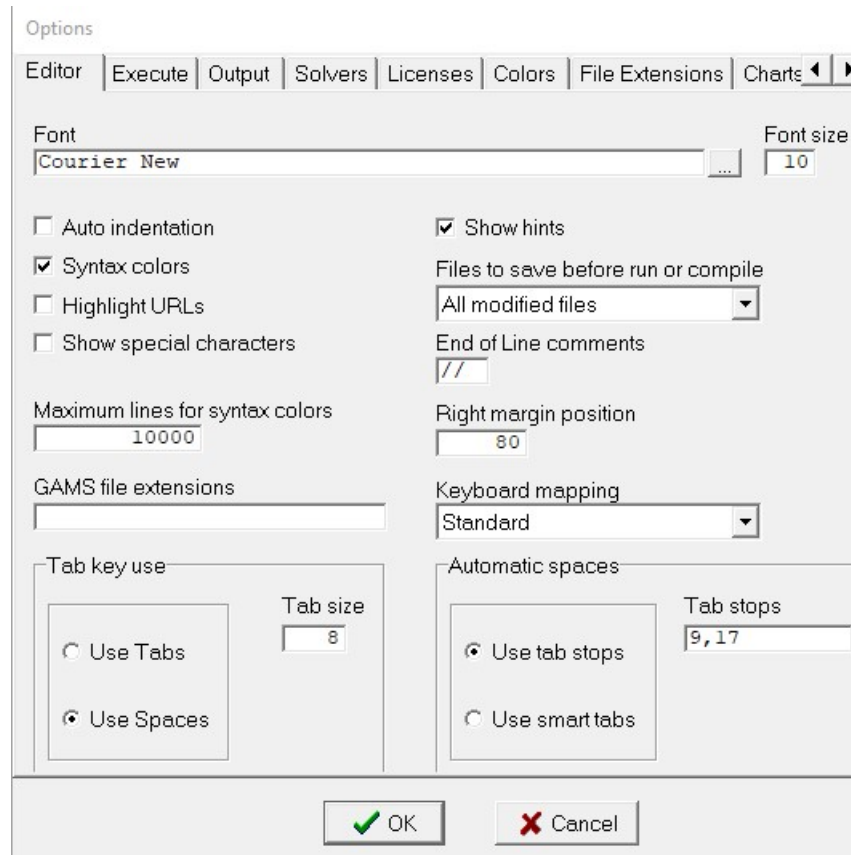


Figura 3.4: Ventana de opciones de GAMS (Fuente: Autores).

### 3.2.1. Ejemplo de implementación

Con el fin de explicar el funcionamiento, ingreso de datos y visualización de datos en GAMS y a partir de la estructura planteada anteriormente, se implementa un ejemplo del modelo matemático en una red eléctrica compuesta por 7 nodos y 6 líneas como se presenta en Figura 2.5, estas son operadas a 23 kV como salida de tensión en la subestación y 1 MVA como potencia base. Sus parámetros de línea y sus consumos de energía se presentan en la Tabla 2.2.

Del Algoritmo 2 implementado en GAMS ilustrado más adelante, se puede ver las componentes del modelo de optimización descrito en las ecuaciones (3.1)-(3.9), el cual cuenta con las siguientes características:

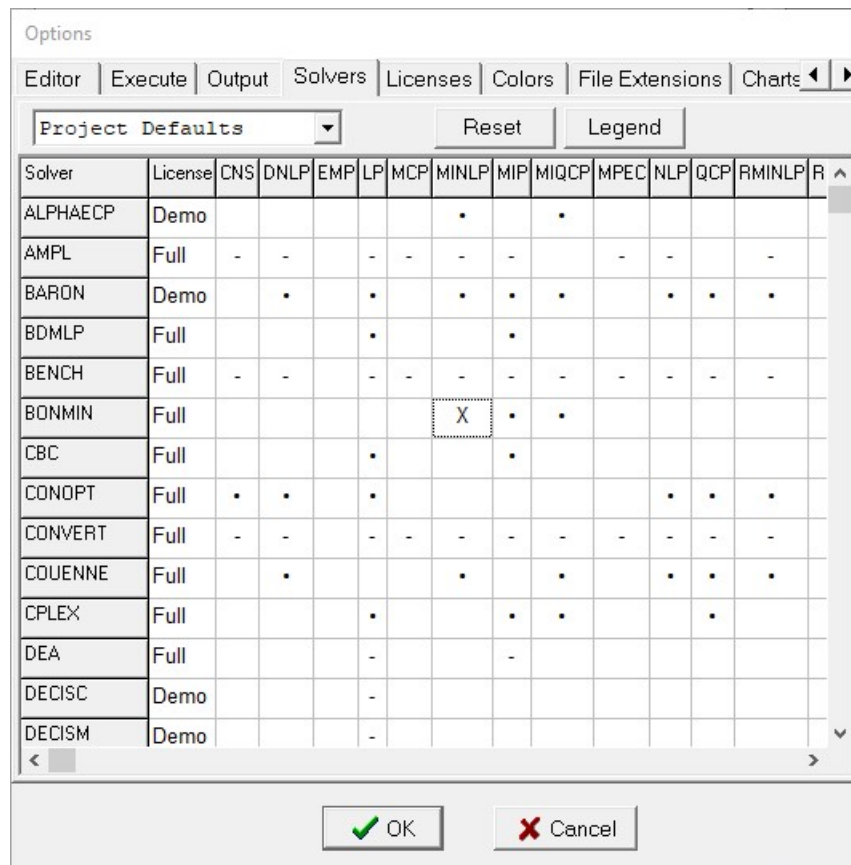


Figura 3.5: Pestaña de solver de la ventana opciones de GAMS (Fuente: Autores).

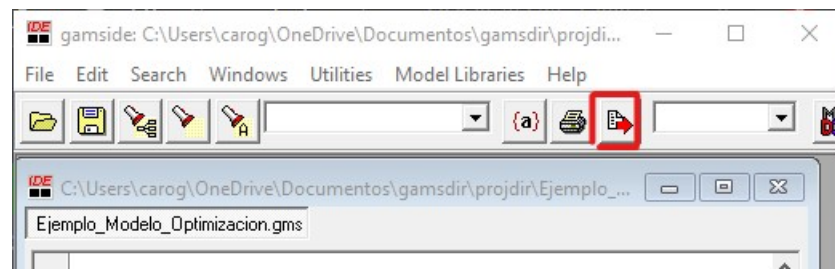


Figura 3.6: Botón para ejecutar código en GAMS (Fuente: Autores).

1. El comando ALIAS (N, NP) descrito en la línea 5 permite la duplicación del conjunto de nodos N en el conjunto NP para evaluar las ecuaciones de balance de potencia.
2. El conjunto de variables se describe en las líneas 40-49 está compuesto por variables continuas (tensión, ángulos, potencias y coeficiente de carga) y variables binarias (ubicación óptima de la GD).



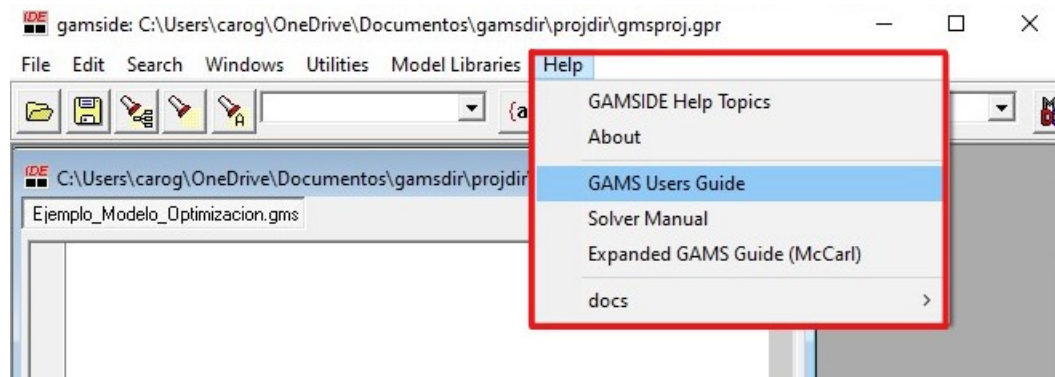


Figura 3.7: Botón de ayuda Help en GAMS (Fuente: Autores).

3. Las restricciones de tensión (3.4) se presentan en las líneas 50 y 51, el comportamiento típico del nodo de holgura en la red de distribución radial se describen en las líneas 52 y 53.
4. En la línea 54 se representa el límite inferior de la variable  $\lambda$ , el cual se expresa en (3.9).
5. Las líneas 55 a 62 definen el nombre de las ecuaciones, mientras que la función objetivo (3.1) y las restricciones de potencia activa (3.2) y reactiva (3.3), están representadas en las líneas 63, 64 y 66 respectivamente.
6. En las líneas 68 y 69 se muestran las salidas de potencia mínima y máximo, es decir, la restricción (3.5), y en 70 se representa el número máximo de direcciones generales disponibles (3.6).
7. La restricción de penetración de GD (3.7) se presenta en la línea 71, donde al coeficiente de penetración  $\beta$  se le asigna un valor arbitrario del 40%; no se toma el valor del 100% ya que es un caso trivial puesto que el sistema al aumentar su demanda consumiría toda la potencia suministrada por el GD.
8. Las líneas 72 a 74 definen las características del modelo y su tipo (maximización), así como sus características de visualización.

**Algorithm 2** Algoritmo de flujo de potencia en GAMS para el sistema de 7 nodos.

```

1 SETS
2 G conjunto de generadores convencionales /G1/
3 N conjunto de nodos /N1*N33/
4 MAP (G,N) relacion de la generacion y los nodos/G1.N1/;
5 ALIAS(N,NP);
6 SCALARS
7 PGmax potencia maxima de salida por el GD /0/
8 NGmax unidades de GD disponible /0/;
9 TABLE LINE(N,N,*) YBUS matrix: YBUS = Y<PHI
10 Y PHI
11 N1.N1 901.921127450169 -0.541881487533056
12 N2.N1 901.921127450169 2.599711166056740
13 N1.N2 901.921127450169 2.599711166056740
14 N2.N2 4225.31203745061 -0.627679749517968
15 N3.N2 1116.21013633344 2.583440665436250
16 N5.N2 1226.36440161427 2.668614055686530
17 N7.N2 1058.84470205320 2.183227654872620
18 N2.N3 1116.21013633344 2.583440665436250
19 N3.N3 2401.88600124091 -0.511488986218966
20 N4.N3 1287.94374735150 2.670540998703630
21 N3.N4 1287.94374735150 2.670540998703630
22 N4.N4 1287.94374735150 -0.471051654886168
23 N2.N5 1226.36440161427 2.668614055686530
24 N5.N5 1706.01794624463 -0.540610678882462
25 N6.N5 489.524057395199 2.430858585727870
26 N5.N6 489.524057395199 2.430858585727870
27 N6.N6 489.524057395199 -0.710734067861924
28 N2.N7 1058.84470205320 2.183227654872620
29 N7.N7 1058.84470205320 -0.958364998717178;
30 TABLE BUS(N,*) Datos de la demanda
31 VMIN VMAX PL QL
32 * (pu) (pu) (pu) (pu)
33 N1 0.40 1.10 0.00 0.00
34 N2 0.40 1.10 1.00 0.60
35 N3 0.40 1.10 0.90 0.50
36 N4 0.40 1.10 2.50 1.20
37 N5 0.40 1.10 1.20 0.95
38 N6 0.40 1.10 1.05 0.78
39 N7 0.40 1.10 2.00 1.15;
40 VARIABLES
41 z Funcion objetivo
42 p(G) Potencia activa generada en el slack
43 q(G) Potencia reactiva generada en el slack
44 v(N) Magnitud del voltaje en el nodo n
45 d(N) Angulo del voltaje en el nodo n;
46 pdg(N) Potencia activa DG en el Nodo N
47 L coeficiente de carga de la red ;
48 BINARY VARIABLES
49 x(N) Variable para la ubicacion optima de DG;
50 v.lo(N) = BUS(N, 'VMIN');
51 v.up(N) = BUS(N, 'VMAX');
52 d.fx('N1')=0.00;
53 v.fx('N1')=1.00;
54 L.lo = 0;
55 EQUATIONS
56 OBJFUC Funcion objetivo
57 PBAL(N) Balance de potencia activa en cada nodo
58 QBAL(N) Balance de potencia reactiva en cada nodo
59 TGEN Numero de DG disponibles
60 MAXGD(N) Potencia reactiva maxima salida de el DG
61 MINGD(N) Potencia reactiva minima salida de el DG
62 PNTGD(N) Restriccion de penetracion de DG;
63 OBJFUC.. z =E= L;
64 PBAL(N).. SUM(GSMAP(G,N),p(G))-BUS(N,'PL')*(1+L)+ pdg (N) =e= v(N)*SUM(NP,LINE(N,NP,'Y')*v(NP)*
65 cos(d(N)-d(NP)-LINE(N,NP,'PHI')));
66 QBAL(N).. SUM(GSMAP(G,N),q(G))-BUS(N,'QL')*(1+L)=e= v(N)*SUM(NP,LINE(N,NP,'Y')*v(NP)*
67 sin(d(N)-d(NP)-LINE(N,NP,'PHI')));
68 MAXGD(N).. pdg(N)=G=0;
69 MINGD(N).. pdg(N)=L=x(N)*PGmax;
70 TGEN.. SUM(N,x(N))=L= NGmax;
71 PNTGD(N).. pdg(N)=L= 0.4*BUS(N,'PL');
72 MODEL Sistema_7_Nodos /ALL/;
73 OPTIONS decimals = 8;
74 SOLVE Sistema_7_Nodos us MINLP maximizing z;
75 DISPLAY v.l,d.l,p.l,q.l,z.l,x.l,pg.l;

```

# Capítulo 4

## Sistema de prueba y escenarios

*En este Capítulo se presentan los sistemas de prueba utilizados para la comprobación del modelo matemático presentado en el Capítulo 3; para este caso se presentarán dos sistemas de pruebas y los casos de estudio con el fin de validar la eficiencia del modelo de optimización matemática y así, determinar el margen de estabilidad en tensión en sistemas de distribución. Las redes eléctricas consideradas operan en media tensión y están compuestas por 33 y 69 nodos, respectivamente. La información de estos alimentadores de prueba, la simulación y comprobación de cada sistema en DigSILENT, y los casos de simulación se presentan en el desarrollo de este capítulo 4.*

### 4.1. Alimentador de prueba de 33 nodos

La validación del modelo propuesto se realiza en un alimentador de prueba de distribución radial clásico compuesto por 32 nodos y 32 líneas operadas a una tensión nominal de 12.66 kV. La configuración de esta red de este alimentador se presenta en la Figura 4.1, además, la información de líneas y cargas se reporta en la Tabla 4.1.

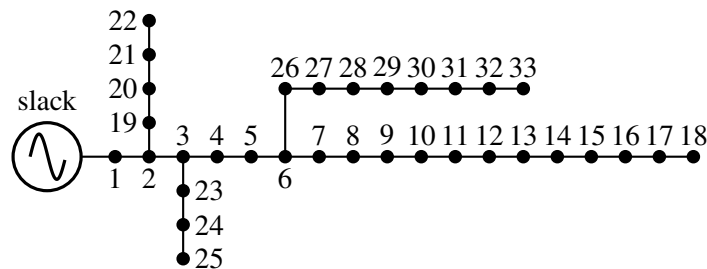


Figura 4.1: Configuración eléctrica de los alimentadores de prueba: sistema de prueba de 33 nodos (Fuente: Autores).

Tabla 4.1: Parámetros eléctricos para el sistema de prueba de 33 nodos (Fuente: [1]).

Nodo $i$	Nodo $j$	$R_{ij}$ [ $\Omega$ ]	$X_{ij}$ [ $\Omega$ ]	$P_j$ [kW]	$Q_j$ [kvar]
1	2	0.0922	0.0477	100	60
2	3	0.4930	0.2511	90	40
3	4	0.3660	0.1864	120	80
4	5	0.3811	0.1941	60	30
5	6	0.8190	0.7070	60	20
6	7	0.1872	0.6188	200	100
7	8	1.7114	1.2351	200	100
8	9	1.0300	0.7400	60	20
9	10	1.0400	0.7400	60	20
10	11	0.1966	0.0650	45	30
11	12	0.3744	0.1238	60	35
12	13	1.4680	1.1550	60	35
13	14	0.5416	0.7129	120	80
14	15	0.5910	0.5260	60	10
15	16	0.7463	0.5450	60	20
16	17	1.2890	1.7210	60	20
17	18	0.7320	0.5740	90	40
2	19	0.1640	0.1565	90	40
19	20	1.5042	1.3554	90	40
20	21	0.4095	0.4784	90	40
21	22	0.7089	0.9373	90	40
3	23	0.4512	0.3083	90	50
23	24	0.8980	0.7091	420	200
24	25	0.8960	0.7011	420	200
6	26	0.2030	0.1034	60	25
26	27	0.2842	0.1447	60	25
27	28	1.0590	0.9337	60	20
28	29	0.8042	0.7006	120	70
29	30	0.5075	0.2585	200	600
30	31	0.9744	0.9630	150	70
31	32	0.3105	0.3619	210	100
32	33	0.3410	0.5302	60	40

Nótese que, para este sistema de prueba, la demanda total de potencia activa es de 3715 kW y la demanda total de potencia reactiva es de 2300 kvar. Para fines de simulación, se consideran 100 kVA y 12.66 kV, como base de potencia y voltaje, respectivamente.

### 4.1.1. Caso base 33 nodos para simulación DigSILENT

Con el fin de comprobar que el sistema de prueba de 33 nodos está modelado correctamente en el software DigSILENT, se realiza la simulación de un flujo de potencia sin ninguna modificación a los parámetros de este, i.e., el caso base. El modelo de la red se muestra en la Figura 4.2.

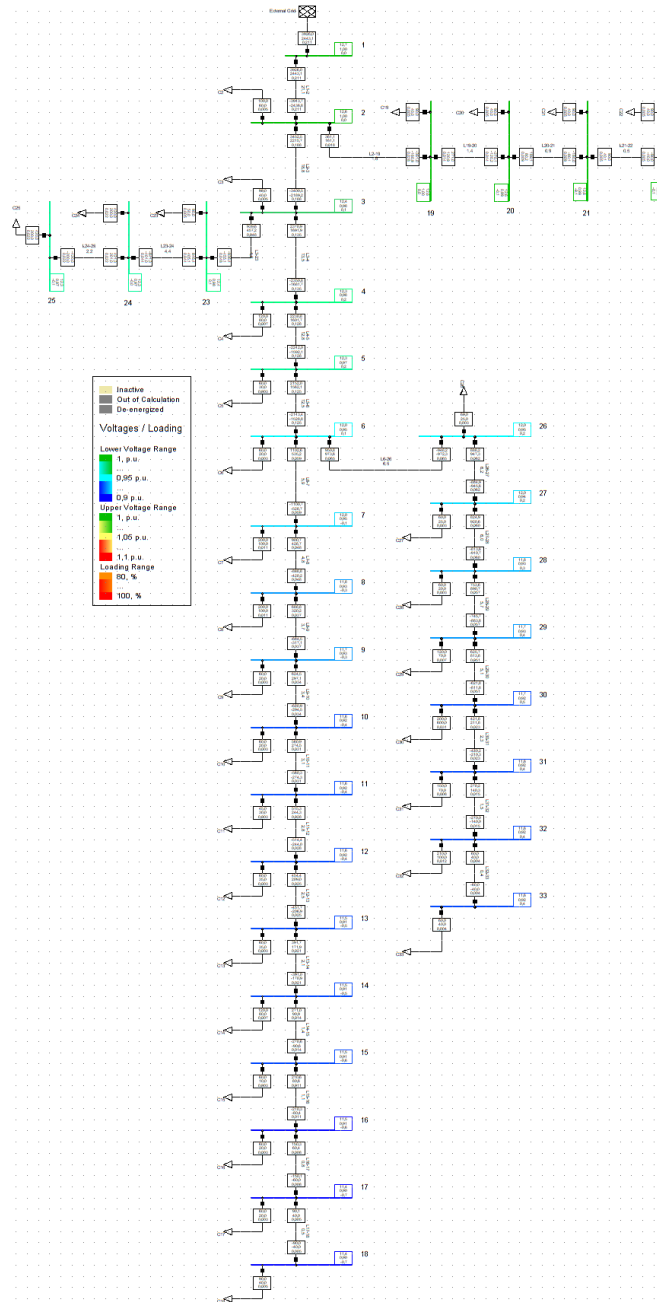


Figura 4.2: Montaje en DigSILENT del sistema de prueba de 33 nodos (Fuente: Autores).

Name	u, Magnitude p.u.	U, Angle deg
9	0.92595	-0.32471
8	0.93228	-0.25020
7	0.94594	-0.09671
6	0.94946	0.13498
5	0.96794	0.22913
4	0.97537	0.16196
33	0.91639	0.38163
32	0.91667	0.38936
31	0.91759	0.41241
30	0.92175	0.49686
3	0.98288	0.09584
29	0.92531	0.39154
28	0.93353	0.31360
27	0.94497	0.23062
26	0.94753	0.17445
25	0.96929	-0.06756
24	0.97262	-0.02386
23	0.97929	0.06487
22	0.99156	-0.10389
21	0.99220	-0.08355
20	0.99290	-0.06419
2	0.99701	0.01362
19	0.99648	0.00278
18	0.90377	-0.69412
17	0.90439	-0.68434
16	0.90643	-0.60547
15	0.90782	-0.58174
14	0.90924	-0.54329
13	0.91153	-0.46300
12	0.91771	-0.36984
11	0.91922	-0.38157
10	0.92009	-0.38897
1	1.	0.

Figura 4.3: Reporte de DigSILENT de magnitud y ángulo de tensiones en los nodos del sistema 33 nodos (Fuente: Autores).

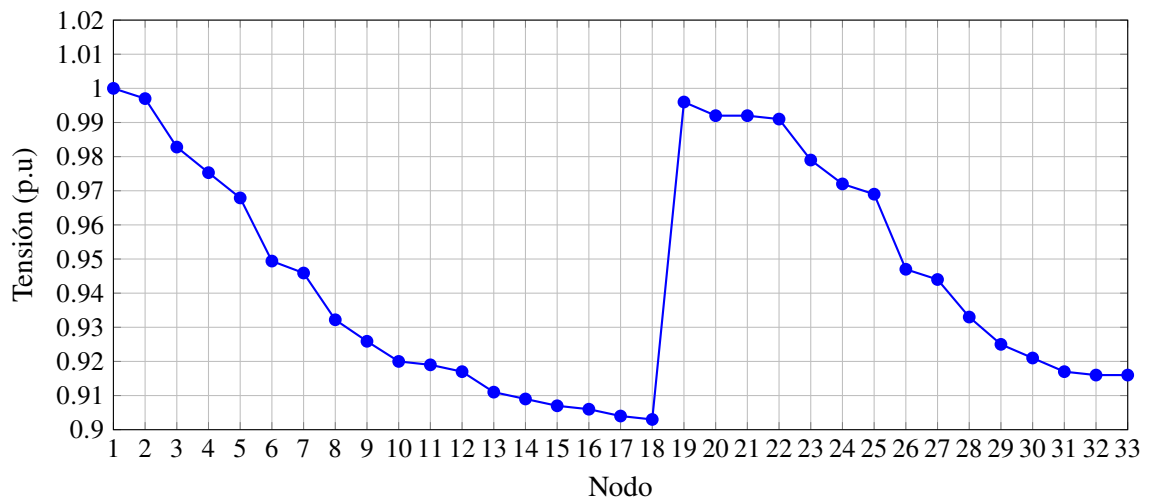


Figura 4.4: Perfiles de tensión reportado por simulación en DigSILENT (Fuente: Autores).

## 4.2. Alimentador de prueba de 69 nodos

Este sistema de prueba está compuesto por 69 nodos y 68 ramas con 12.66 kV de tensión en funcionamiento. El nodo SLACK se encuentra en el nodo 1, y su configuración se presenta

en la Figura 4.5, además, la información de las líneas y cargas se reportan en la Tabla 4.2.

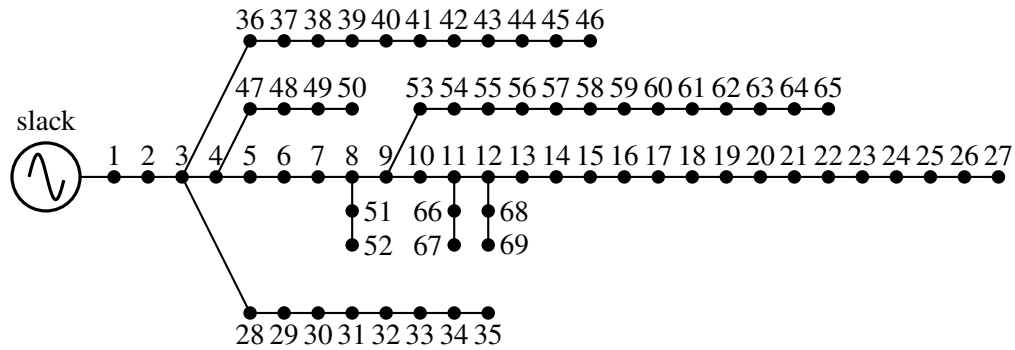


Figura 4.5: Configuración eléctrica de los alimentadores de prueba: sistema de prueba de 69 nodos (Fuente: Autores).

Tabla 4.2: Parámetros eléctricos para el sistema de prueba de 69 nodos (Fuente: [1]).

Nodo $i$	Nodo $j$	$R_{ij}$ [ $\Omega$ ]	$X_{ij}$ [ $\Omega$ ]	$P_j$ [kW]	$Q_j$ [kvar]
1	2	0.0005	0.0012	0	0
2	3	0.0005	0.0012	0	0
3	4	0.0015	0.0036	0	0
4	5	0.0251	0.0294	0	0
5	6	0.3660	0.1864	2.6	2.2
6	7	0.3811	0.1941	40.4	30
7	8	0.0922	0.0470	75	54
8	9	0.0493	0.0251	30	22
9	10	0.8190	0.2707	28	19
10	11	0.1872	0.0619	145	104
11	12	0.7114	0.2351	145	104
12	13	1.0300	0.3400	8	5
13	14	1.0440	0.3450	8	5
14	15	1.0580	0.3496	0	0
15	16	0.1966	0.0650	45	30
16	17	0.3744	0.1238	60	35
17	18	0.0047	0.0016	60	35
18	19	0.3276	0.1083	0	0
19	20	0.2106	0.0690	1	0.6
20	21	0.3416	0.1129	114	81
21	22	0.0140	0.0046	5	3.5
22	23	0.1591	0.0526	0	0
23	24	0.3463	0.1145	28	20
24	25	0.7488	0.2475	0	0

Nodo $i$	Nodo $j$	$R_{ij}$ [ $\Omega$ ]	$X_{ij}$ [ $\Omega$ ]	$P_j$ [kW]	$Q_j$ [kvar]
25	26	0.3089	0.1021	14	10
26	27	0.1732	0.0572	14	10
3	28	0.0044	0.0108	26	18.6
28	29	0.0640	0.1565	26	18.6
29	30	0.3978	0.1315	0	0
30	31	0.0702	0.0232	0	0
31	32	0.3510	0.1160	0	0
32	33	0.8390	0.2816	10	10
33	34	1.7080	0.5646	14	14
34	35	1.4740	0.4873	4	4
3	36	0.0044	0.0108	26	18.55
36	37	0.0640	0.1565	26	18.55
37	38	0.1053	0.1230	0	0
38	39	0.0304	0.0355	24	17
39	40	0.0018	0.0021	24	17
40	41	0.7283	0.8509	102	1
41	42	0.3100	0.3623	0	0
42	43	0.0410	0.0478	6	4.3
43	44	0.0092	0.0116	0	0
44	45	0.1089	0.1373	39.22	26.3
45	46	0.0009	0.0012	39.22	26.3
4	47	0.0034	0.0084	0	0
47	48	0.0851	0.2083	79	56.4
48	49	0.2898	0.7091	384.7	274.5
49	50	0.0822	0.2011	384.7	274.5
8	51	0.0928	0.0473	40.5	28.3
51	52	0.3319	0.1140	3.6	2.7
9	53	0.1740	0.0886	4.35	3.5
53	54	0.2030	0.1034	26.4	19
54	55	0.2842	0.1447	24	17.2
55	56	0.2813	0.1433	0	0
56	57	1.5900	0.5337	0	0
57	58	0.7837	0.2630	0	0
58	59	0.3042	0.1006	100	72
59	60	0.3861	0.1172	0	0
60	61	0.5075	0.2585	1244	888
61	62	0.0974	0.0496	32	23
62	63	0.1450	0.0738	0	0
63	64	0.7105	0.3619	227	162
64	65	1.0410	0.5302	59	42



Nodo $i$	Nodo $j$	$R_{ij}$ [ $\Omega$ ]	$X_{ij}$ [ $\Omega$ ]	$P_j$ [kW]	$Q_j$ [kvar]
11	66	0.2012	0.0611	18	13
66	67	0.0047	0.0014	18	13
12	68	0.7394	0.2444	28	20
68	69	0.0047	0.0016	28	20

Este sistema de prueba tiene como demanda total de potencia activa 3890.7 kW y demanda total de potencia reactiva 2693.6 kvar. Para fines de simulación, se considera 100 kVA y 12.66 kV, como base de potencia y voltaje, respectivamente.

#### 4.2.1. Caso base 69 nodos simulación DigSILENT

Con el mismo objetivo que en el sistema de prueba presentado anteriormente, se realiza el modelo del sistema de prueba en DigSILENT donde posteriormente se ejecuta un flujo de carga sin ninguna modificación a los parámetros del sistema, el montaje de este sistema de prueba se muestra en la Fig.(4.7)

The image shows two overlapping windows from the DigSILENT software, each displaying a table of voltage data for 69 nodes. The tables have the following columns: Name, u, Magnitude p.u., and U, Angle deg. The data is sorted by node number (1 to 69).

Name	u	Magnitude p.u.	U, Angle deg
1	1.	0.	
10	0.97245	0.23147	
11	0.97135	0.25022	
12	0.96819	0.30287	
13	0.96528	0.34907	
14	0.96238	0.39517	
15	0.95952	0.44122	
16	0.95899	0.44980	
17	0.95811	0.46396	
18	0.95810	0.46411	
19	0.95763	0.47265	
2	0.99996	-0.00126	
20	0.95734	0.47819	
21	0.95685	0.48707	
22	0.95685	0.48720	
23	0.95678	0.48854	
24	0.95662	0.49144	
25	0.95645	0.49459	
26	0.95638	0.49588	
27	0.95636	0.49625	
28	0.99992	-0.00273	
29	0.99985	-0.00469	
3	0.99993	-0.00253	
30	0.99976	-0.00202	
31	0.99974	-0.00155	
32	0.99966	0.00079	
33	0.99947	0.00638	
34	0.99921	0.01374	
35	0.99916	0.01516	
36	0.99991	-0.00343	
37	0.99970	-0.01549	
38	0.99947	-0.02234	
39	0.99941	-0.02432	
4	0.99983	-0.00596	
40	0.99941	-0.02443	
41	0.99825	-0.06616	
42	0.99796	-0.07081	
43	0.99792	-0.07142	
44	0.99791	-0.07158	
45	0.99781	-0.07339	
46	0.99781	-0.07339	
47	0.99978	-0.00777	
48	0.99854	-0.05260	
49	0.99469	-0.19170	
5	0.99902	-0.01858	
50	0.99415	-0.21151	
51	0.97854	0.13838	
52	0.97853	0.13856	
53	0.97466	0.16881	
54	0.97141	0.19443	
55	0.96694	0.23001	
56	0.96257	0.26497	
57	0.94010	0.66153	
58	0.92904	0.86409	
59	0.92476	0.94506	
6	0.99008	0.04916	
60	0.91974	1.04956	
61	0.91234	1.11861	
62	0.91205	1.12133	
63	0.91166	1.12498	
64	0.90976	1.14284	
65	0.90919	1.14821	
66	0.97129	0.25137	
67	0.97129	0.25138	
68	0.96786	0.30893	
69	0.96786	0.30895	
7	0.98079	0.12089	
8	0.97858	0.13808	
9	0.97744	0.14689	

Figura 4.6: Reporte DigSILENT magnitud y ángulo de tensiones en los nodos del sistema 33 nodos (Fuente: Autores).

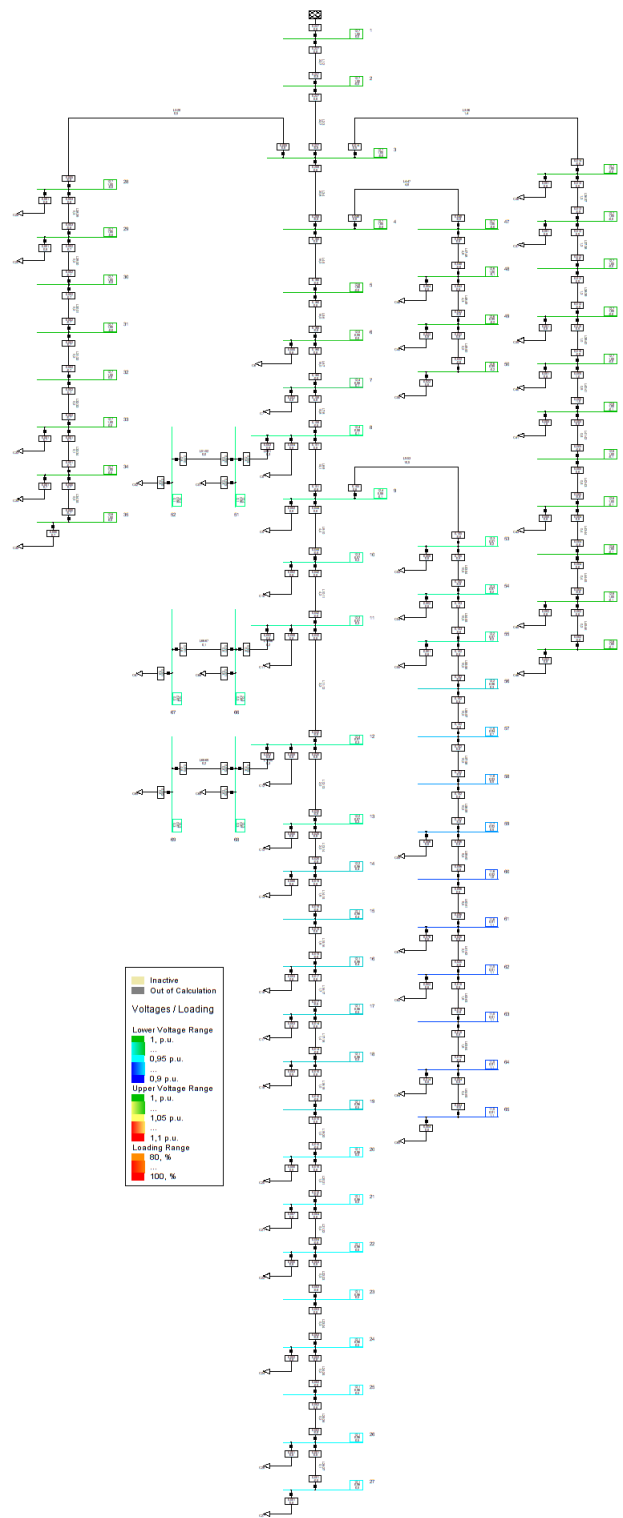


Figura 4.7: Montaje DigSILENT sistema de prueba 33 nodos (Fuente: Autores).

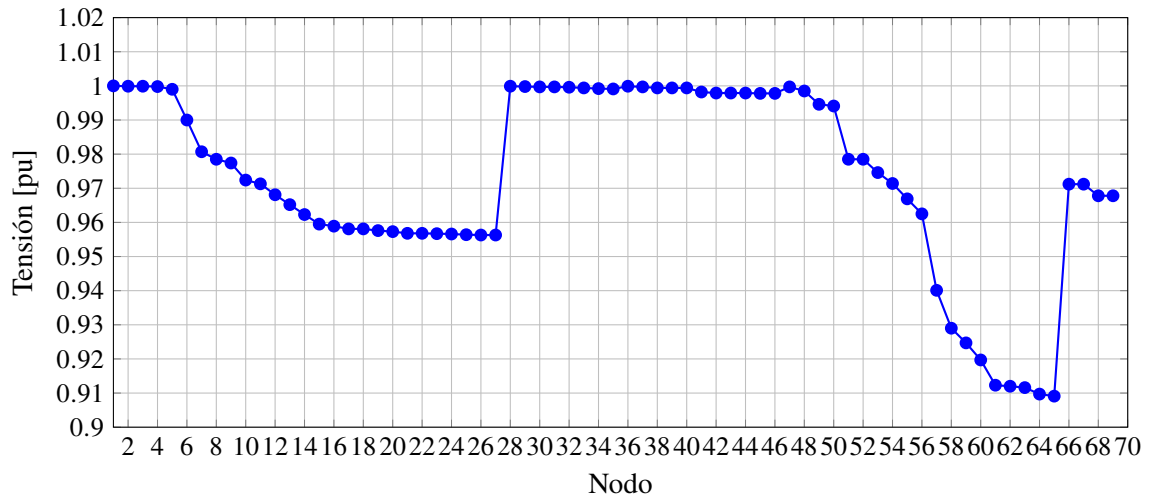


Figura 4.8: Perfiles de tensión Reportados por simulación en DigSILENT (Fuente: Autores).

### 4.3. Escenarios de simulación

La validación del cálculo de margen de estabilidad de tensión propuesto para las redes de distribución presentadas en la sección anterior, se basa en los siguientes casos de simulación.

- ✓ **Caso 1 (C1):** La configuración original de la red, es decir, sin porcentaje alguno de penetración de GD; se entiende como caso base .
- ✓ **Caso 2 (C2):** La operación de la red de distribución considerando una penetración del 40 % en GD y la ubicación de las unidades de GD; solución del modelo descrito en el Capítulo 3.
- ✓ **Caso 3 (C3):** La operación de la red de distribución considerando una penetración del 60 % GD y la ubicación de las unidades de GD solución del modelo descrito en el Capítulo 3 .

Se debe considerar que los valores de penetración de GD mencionados en **C2** y **C3** son valores arbitrarios, estos se escogen con el fin de tener un contraste de la cargabilidad máxima de los sistemas de prueba ante el aumento de la penetración de GD; como se menciona en el capítulo (3) no se toma como caso de estudio un 100 % de penetración debido a la trivialidad de sus resultados, puesto que es evidente que los sistemas soportaran un aumento de demanda mas alta pero consumiendo la potencia nominal de los generadores conectados a la red. Para los casos de simulación **C2** y **C3**, se considera lo siguiente para los sistemas de prueba:

- ✓ La conexión de máximo tres generadores distribuidos con una potencia máxima de 1.2 MW para los sistemas de prueba de 33 nodos y tensiones de 0.3 pu a 1.2 pu, como límites inferiores y superiores para la tensión, i.e.,  $V_{\min}$  y  $V_{\max}$  respectivamente.
- ✓ La conexión de máximo tres generadores distribuidos con una potencia máxima de 2.5 MW

y tensiones de 0.45 pu y 1.5 pu, como límites inferiores y superiores de la tensión, respectivamente.

Las consideraciones anteriores se deben tener en cuenta ya que se quiere evitar llegar a una solución o a una región del problema con soluciones indefectibles. Por lo tanto, se realizó un proceso de prueba y error manual moviendo los límites de tensión y las capacidades de generación para los casos C2 y C3 en el modelo simulado en GAMS, hasta estar seguros de estar en una región de soluciones factibles para el problema de optimización. Adicional a lo anterior, se tendrá una validación de los perfiles de tensión obtenidos por el modelo matemático por medio del software de simulación de sistemas eléctricos DIgSILENT®

# Capítulo 5

## Aplicación y resultados

*En este capítulo se muestran los resultados obtenidos de los sistemas de prueba para cada caso de estudio presentado en el Capítulo 4, a partir de la metodología de optimización implementada en GAMS para la determinación del margen de estabilidad ( $\lambda$ ) y ubicación de generación distribuida (GD) propuesta en el Capítulo 3; posteriormente se consignan los datos del resultado de ubicación y dimensión de GD en el algoritmo iterativo presentado en el Capítulo 2 implementado en MATLAB; luego se realiza una comparación para cada caso de estudio de los ( $\lambda$ )- coeficiente obtenido en MATLAB y GAMS; además se muestra la curva  $\lambda$ - V para cada caso de estudio; se presentan los perfiles de tensión para mostrar el impacto de la ubicación GD a partir de lo obtenido en MATLAB y para finalizar se realiza la descripción del proceso para la simulación del caso base para cada sistema de prueba en DigSILENT con aumentos de carga progresivos, esto con el fin de validar nuevamente los resultado de GAMS comparando los perfiles de tensión obtenidos.*

### 5.1. Validación Computacional

La implementación del modelo matemático para la determinación del margen de estabilidad en tensión para redes de distribución, se lleva a cabo con el software GAMS desde el editor GAMSIDE utilizando el solucionador BONMIN. Además, mediante el uso de software MATLAB versión 2020a se realiza una posterior verificación de dicho margen a partir de la ubicación y el tamaño óptimo de la generación distribuida proveída por el software GAMS. Posteriormente, se realiza una simulación en DigSILENT versión 15.1 para comparar los perfiles de tensión del sistema dados por cada uno de los softwares mencionados.

Todos los programas, algoritmos y simulaciones se ejecutaron en una computadora portátil ASUS con un procesador AMD Ryzen 5 3550H, 2.10 GHz, memoria RAM de 8.0 GB y sistema operativo de 64 bits de Microsoft Windows 10.

En la Figura 5.1 se puede observar la metodología utilizada para la obtención de los resul-

tados; este representa un diagrama entrada – salida de parámetros de cada uno de los algoritmos realizados: (i) MMG: Modelo matemático implementado en GAMS; (ii) AMETM: Algoritmo de determinación de margen de esta en tensión implementado en MATLAB y (iii) DPL: DigSILENT Programming Language.

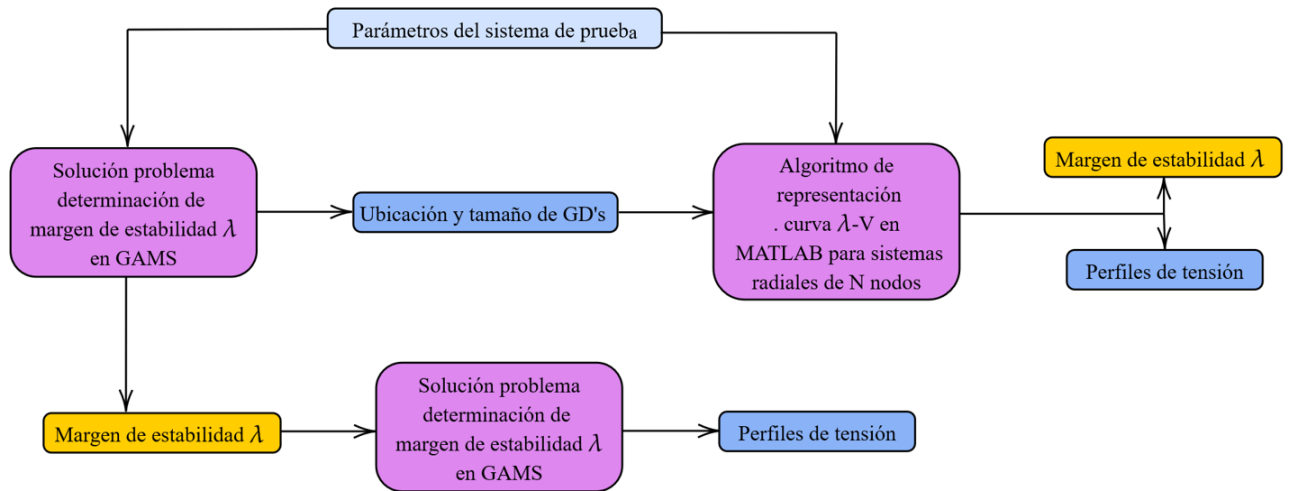


Figura 5.1: Diagrama entrada – salida para la validación computacional de la metodología empleada (Fuente: Autores).

### 5.1.1. Sistema de prueba de 33 nodos

Para este sistema de pruebas se consideran tres casos de simulación presentados en el capítulo 4. Los cuales corresponden al caso base, penetración de GD 40 % y 60 %. Para la ejecución del modelo matemático en GAMS se fijan como límites superiores e inferiores del tensión en los nodos los valores de 1.2 pu y 0.3 pu respectivamente como se mencionó en el capítulo 4.

#### 5.1.1.1. Evaluación de los casos de simulación

Para la evaluación de los casos de simulación, se debe de tener en cuenta que la curva obtenida por medio de MATLAB ilustra el comportamiento del nodo débil (nodo 18), ya que este presenta el perfil de tensión más bajo de todos los nodos del sistema. También es importante tener en cuenta que la formulación presentada en la ecuaciones (3.1) a (3.9) determinará el margen de estabilidad de tensión para todos los nodos del sistema, adicional también dentro del reporte de solución de GAMS se podrá observar las tensiones y ángulos de cada nodo, en caso de que estos sean requeridos en análisis posteriores.

Los resultados de la Tabla 5.1 demuestran que el modelo propuesto en el capítulo 3 encuentra la solución óptima global de la determinación del margen de estabilidad para el sistema de prueba 33 nodos.

Tabla 5.1: Resultados del coeficiente ( $\lambda$ ) para todos los casos de simulación en el alimentador de prueba de 33 nodos (Fuente: Autores).

Caso	No de GD	Nodo de ubicación	PG1 [pu]	PG2 [pu]	PG3 [pu]	GAMS ( $\lambda$ )	MATLAB ( $\lambda$ )
1	0	0	-	-	-	2.4079	2.4079
2	1	18	1.2	-	-	2.9128	2.9128
	2	(18,32)	0.9316	0.5544	-	3.0590	3.0590
	3	(17,18,32)	0.5735	0.3663	0.5462	3.0635	3.0635
3	1	18	1.2	-	-	2.9128	2.9128
	2	(17,32)	1.2	1.029	-	3.3068	3.3068
	3	(17,18,32)	0.8324	0.3885	1.0080	3.3091	3.3091

A partir de los resultados obtenidos en la Tabla 5.1 se puede observar que la inyección de potencia distribuida permite incrementar el margen de estabilidad en tensión, alrededor de 27.22 % y 37.43 % para los casos C2 y C3 respectivamente con el número máximo de generadores conectados a la red contrastando con el caso base (C1); los valores del incremento porcentual de  $\lambda$ , se obtienen mediante la relación de la diferencia de  $\lambda$  del caso a comparar menos el  $\lambda$  del caso base, esto sobre el valor  $\lambda$  del caso base. Además, podemos observar que el valor de  $\lambda$  encontrado en MATLAB en comparación con el de GAMS es muy cercano. Se debe tener en cuenta que el valor de error no puede ser determinado con exactitud ya que esto implicaría disminuir el aumento de  $\lambda$  en el algoritmo implementado en MATLAB y por lo tanto un mayor costo computacional. Sin embargo, se estima que el error debería estar alrededor de  $1 \times 10^{-6}$  %; esto debido a lo mencionado en el capítulo 2 en la sección 2.3, donde se menciona el impacto del aumento de lambda en el algoritmo implementado en MATLAB .

En la Figura 5.2 se presenta el rendimiento de tensión en todos los nodos del alimentador de prueba de 33 nodos para el caso 1 (caso base) y para los casos 2 y 3 considerando 3 unidades de GD.

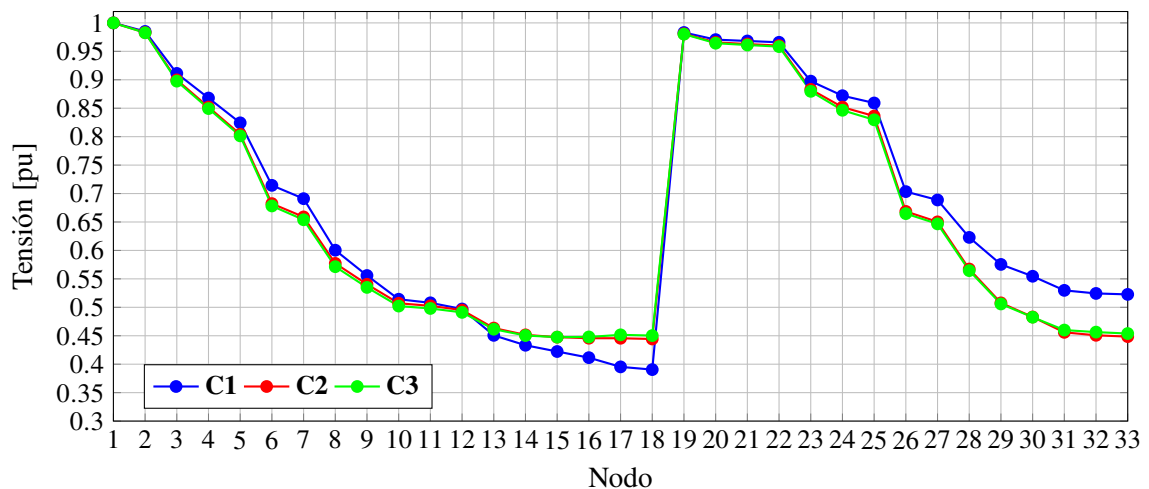


Figura 5.2: Perfiles de tensión en el sistema de distribución para el análisis de : Caso:1 (caso base) y Caso:2-3 con 3 unidad de GD en el sistema de prueba 33 nodos (Fuente: Autores).

En la Figura 5.2 se observa que el nodo débil del sistema es el 18 con una magnitud de tensión 0.3905 pu para el C1. Así mismo se puede observar que en la Tabla 5.1 al incluir 1, 2 y 3 GD para C2 y C3 se encuentra relacionados los mismos nodos incluyendo el nodo débil; este comportamiento se explica ya que se necesita aumentar el perfil de tensión de los nodos débiles de la red y en el contexto de esta investigación la única forma de que esto ocurra es disminuyendo la carga demandada en estos nodos a través de la compensación de potencia activa, ya que se cuenta con las herramientas para realizar esta compensación .

La curva  $\lambda$ - V para el sistema de prueba 33 nodos se presenta en: (i) la Figura 5.3 para el caso base, caso 2 y 3 con una unidad de generación distribuida; (ii) para caso 2 y 3 con dos unidades de GD en la Figura 5.4 y (iii) para caso 2 y 3 con tres unidades de GD en la Figura 5.5.

Tenga en cuenta que en todos los casos presentados en la Figura 5.3 , 5.4 y 5.5 el punto de colapso se presenta en el nodo 18 según lo mostrado en los perfiles de tensión. Así mismo se muestra un aumento del margen de estabilidad en tensión cuando aumenta la penetración de generación para C2 y C3 cuando hay inyección de potencia activa de 2 o 3 fuentes de generación distribuida como se observa en Figura 5.4 y 5.5.

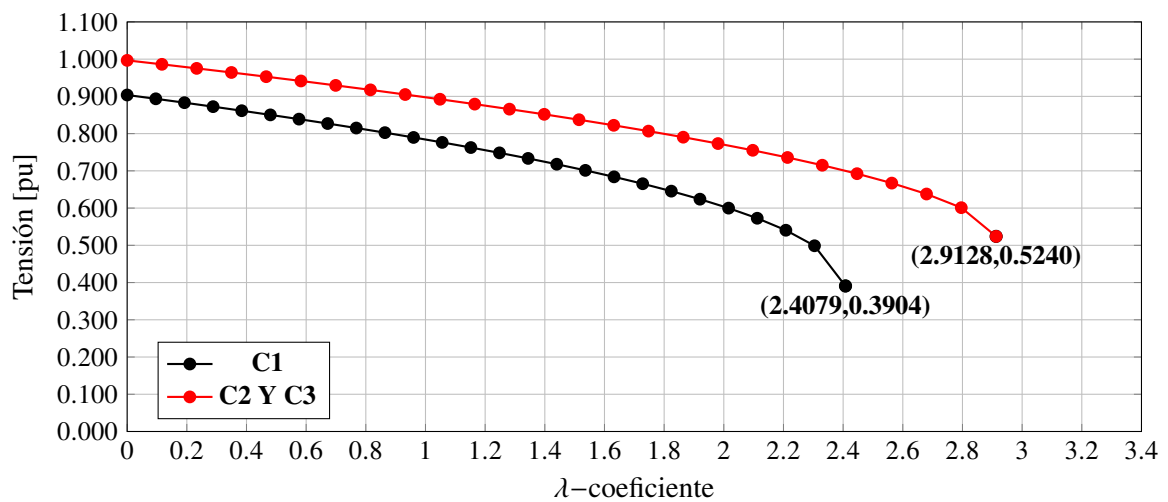


Figura 5.3: Gráfica de estabilidad en tensión coeficiente ( $\lambda$ ) para un sistema de prueba 33 Nodos para los Caso: 1 (caso base) y Casos: 2 y 3 con 1 unidad de GD (Fuente: Autores).



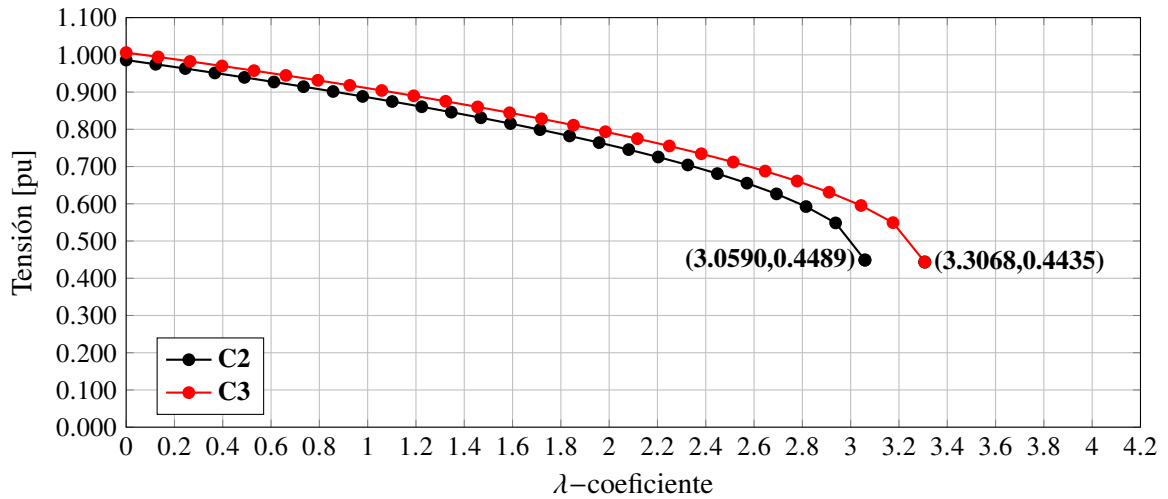


Figura 5.4: Gráfica de estabilidad en tensión coeficiente ( $\lambda$ ) para un sistema de prueba 33 Nodos para los Casos: 2 y 3 con 2 unidades de GD (Fuente: Autores).

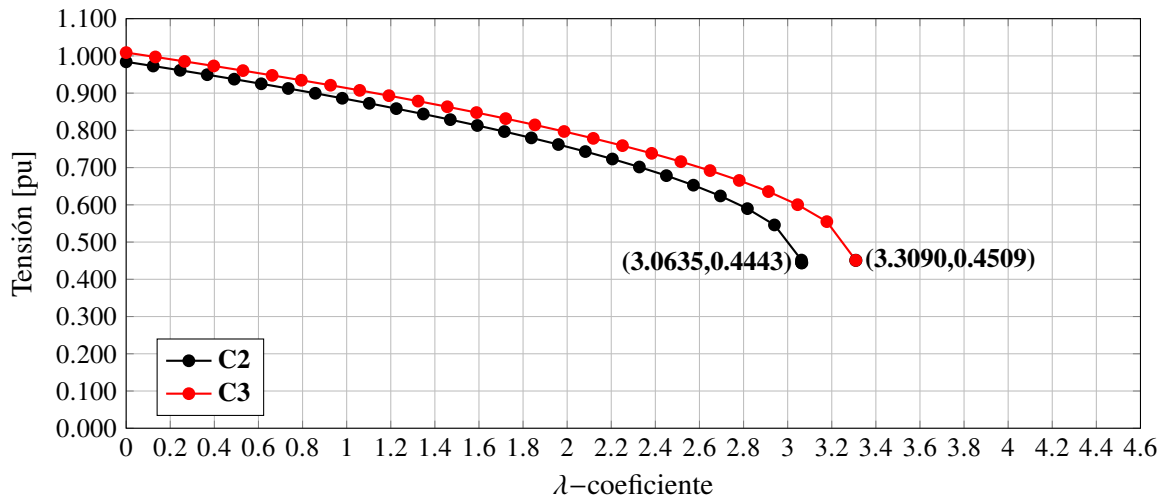


Figura 5.5: Gráfica de estabilidad en tensión coeficiente ( $\lambda$ ) para un sistema de prueba 33 Nodos para los Casos: 2 y 3 con 3 unidades de GD (Fuente: Autores).

Nótese que en la Figura 5.3 para el caso base el valor de tensión en el punto de colapso es de 0.3904 pu y un coeficiente de estabilidad ( $\lambda$ ) de 2.4079; para el caso 2 y 3 el punto de colapso en tensión (PoCV) es de 0.5240 pu y  $\lambda$  de 2.9128, esto demuestra que hay una mejora del índice de estabilidad del 20.96 %; por lo que se puede decir que cuando hay un aumento de la penetración de generación distribuida se tiene una mejora del PoCV y en el coeficiente de estabilidad ( $\lambda$ ). Así mismo en la Figura 5.4 cuando se tienen dos unidades de GD, se observa que hay una mejora del 8.10 % en  $\lambda$  pero el PoCV no tiene una variación significativa; esto se debe a que el segundo generador está ubicado sobre otra zona débil del sistema. De igual forma en la Figura 5.5 para

cuando se tienen tres unidades de GD se observa una mejora de 8.10 % en  $\lambda$  y no se tiene una variación significativa del PoCV.

### 5.1.2. Sistema de prueba 69 nodos

Para este sistema de pruebas se consideran tres casos de simulación presentados en el capítulo 4. Los cuales corresponden al caso base, penetración de GD 40 % y 60 %. Para la ejecución del modelo matemático en GAMS se fijan como límites superiores e inferiores de la tensión en los nodos los valores de 1.5 pu y 0.45 pu respectivamente.

#### 5.1.2.1. Evaluación de los casos de simulación

De igual forma que en la sección anterior, para la evaluación de los casos de simulación, se debe tener en cuenta que la curva  $\lambda$ -V obtenida en MATLAB representa el comportamiento del nodo débil (nodo 65), ya que este presenta el perfil de tensión más bajo de todos los nodos del sistema. También es importante tener en cuenta que la formulación presentada en las ecuaciones (3.1) a (3.9) determinará el margen de estabilidad de tensión para todos los nodos del sistema, adicional también dentro del reporte de solución de GAMS se podrá observar las tensiones y ángulos de cada nodo, en caso de que estos sean requeridos en análisis posteriores.

La Tabla 5.2 presenta los resultados numéricos alcanzados por el modelo matemático MINLP propuesto en el capítulo 3, en donde los resultados obtenidos demuestran que el modelo propuesto encuentra la solución óptima global para la determinación del margen de estabilidad para el sistema de prueba 69 nodos.

Tabla 5.2: Resultados del coeficiente ( $\lambda$ ) para todos los casos de simulación en el alimentador de prueba de 69 nodos (Fuente: Autores).

Caso	No. de GD	Nodo de ubicación	PG1 [pu]	PG2 [pu]	PG3 [pu]	GAMS ( $\lambda$ )	MATLAB ( $\lambda$ )
1	0	0	-	-	-	2.2118	2.2118
2	1	58	1.5562	-	-	2.6191	2.6191
	2	(64,65)	1.3289	0.2273	-	2.8408	2.8408
3	3	(61,64,65)	0.4276	0.9011	0.2274	2.8432	2.8431
	1	59	2.3343	-	-	2.8825	2.8825
	2	(61,64)	1.1140	1.2202	-	3.1394	3.1394
	3	(61,64,65)	1.1172	0.9719	0.2451	3.1403	3.1403

A partir de los resultados obtenidos en la Tabla 5.2 se puede observar que para los casos C2 y C3 con 3 unidades de generación distribuida (GD) hay un incremento del coeficiente ( $\lambda$ ) de 28.55 % y 41.98 % respectivamente; además, el valor de  $\lambda$  encontrado en MATLAB en comparación con el GAMS son invariables al igual que para el sistema de 33 nodos el error está alrededor de  $1 \times 10^{-6}$  %. También se puede apreciar en la Tabla 5.2 que para C2 y C3 cuando hay 3 GD, el generador conectado al nodo 65 es el que menos potencia solicita con 0.2274 pu y 0.2451 pu respectivamente; este comportamiento se debe a que los otros dos generadores

que se conectan en estos mismos casos se conectan en nodos aguas arriba a este (nodo 65), disminuyendo la carga conectada a los nodos aguas arriba a este y con esto subiendo el perfil de tensión sin la necesidad de inyectar demasiada potencia activa al nodo.

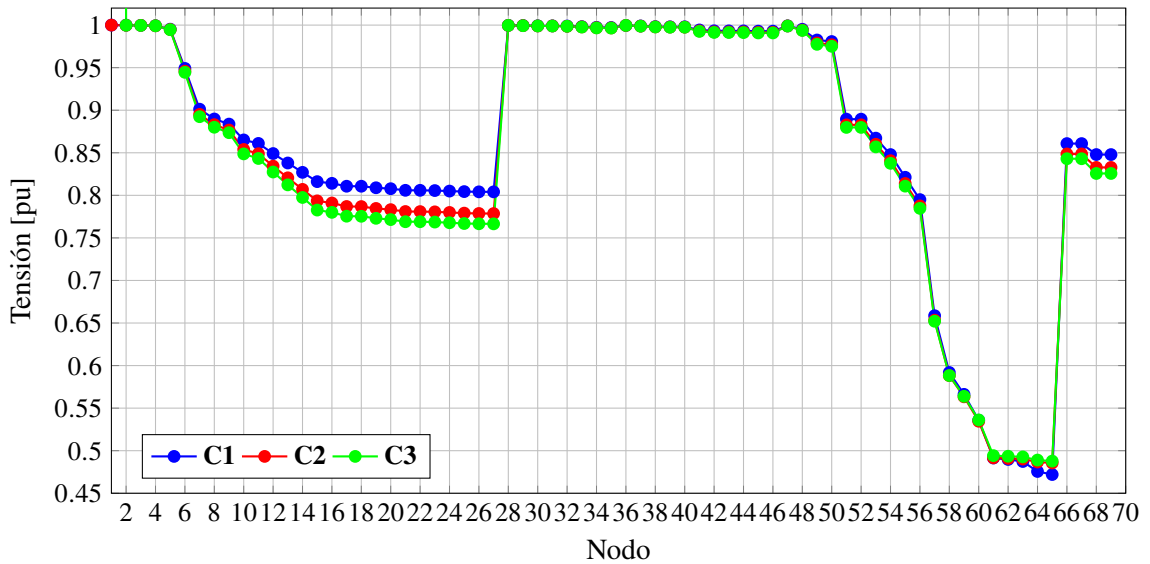


Figura 5.6: Perfiles de tensión en el sistema de distribución para el análisis de : Caso:1 (caso base) y Caso:2-3 con 3 unidad de GD en el sistema de prueba 69 nodos (Fuente: Autores).

En la Figura 5.6 se observa que el nodo débil del sistema es el 65 con una magnitud de tensión 0.4720 PU para C1, es evidente que los nodos donde el modelo ubica los GD para cada caso son los nodos 58-65 estos corresponden a la zona débil del sistema, como se observa en Figura 4.7.

La curva  $\lambda-V$  para el sistema de prueba 69 nodos se presenta en: (i) la Figura 5.7 para el caso base, caso 2 y 3 con una unidad de generación distribuida; (ii) para caso 2 y 3 con dos unidades de GD en la 5.8 y (iii) para caso 2 y 3 con tres unidades de GD en la 5.9.

Tenga en cuenta que en todos los casos presentados en la Figura 5.7 , 5.8 y 5.9 el punto de colapso se presenta en el nodo 65 según lo mostrado en los perfiles de tensión. Además, se muestra un aumento del margen de estabilidad en tensión cuando aumenta la penetración de generación para C2 y C3 cuando hay inyección de potencia activa de 2 o 3 fuentes de generación distribuida como se observa en Figura 5.8 y 5.9.

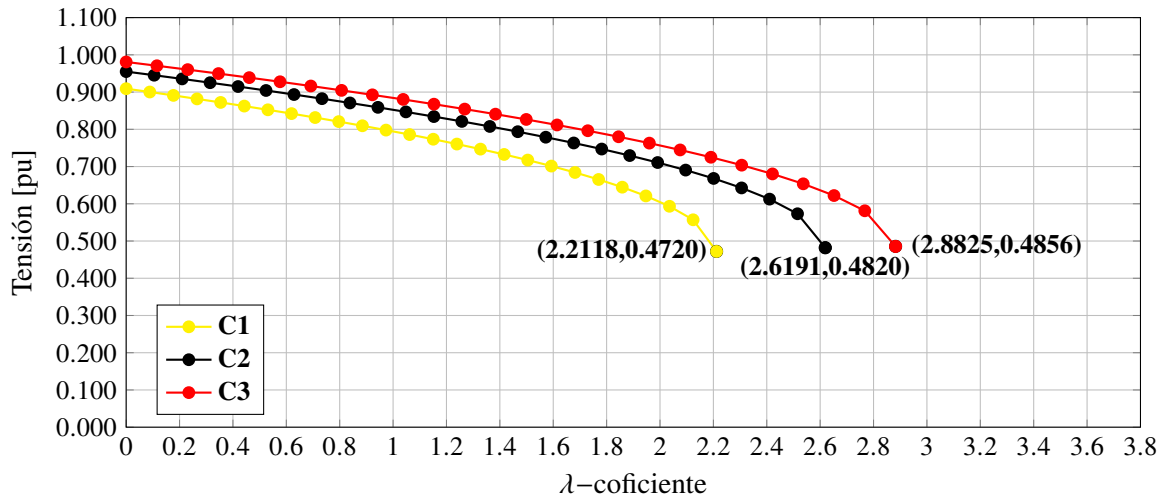


Figura 5.7: Gráfica de estabilidad en tensión coeficiente ( $\lambda$ ) para un sistema de prueba 69 Nodos para los Caso: 1 (caso base) y Casos: 2 y 3 con 1 unidad de GD (Fuente: Autores).

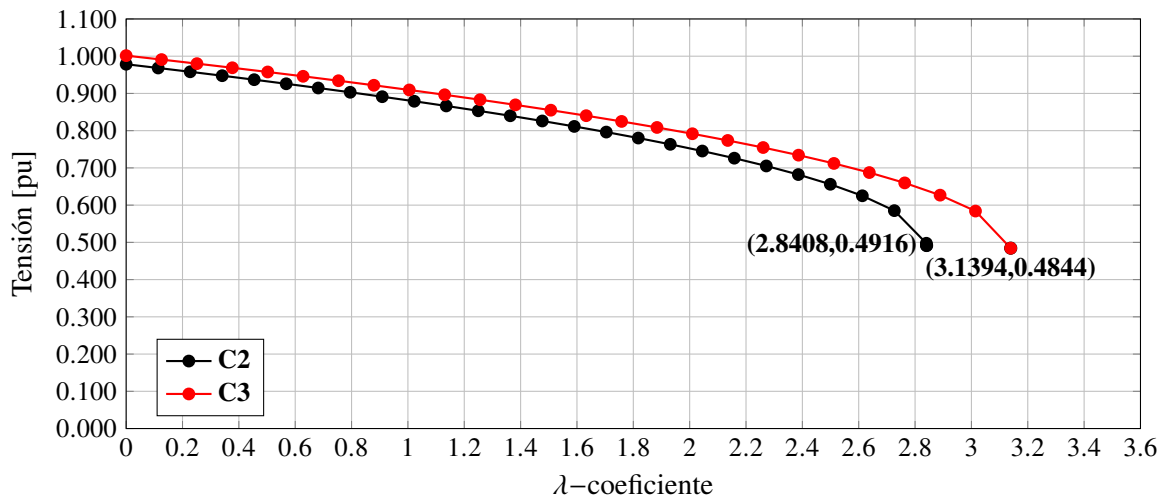


Figura 5.8: Gráfica de estabilidad en tensión coeficiente ( $\lambda$ ) para un sistema de prueba 69 Nodos para los Casos: 2 y 3 con 2 unidades de GD (Fuente: Autores).

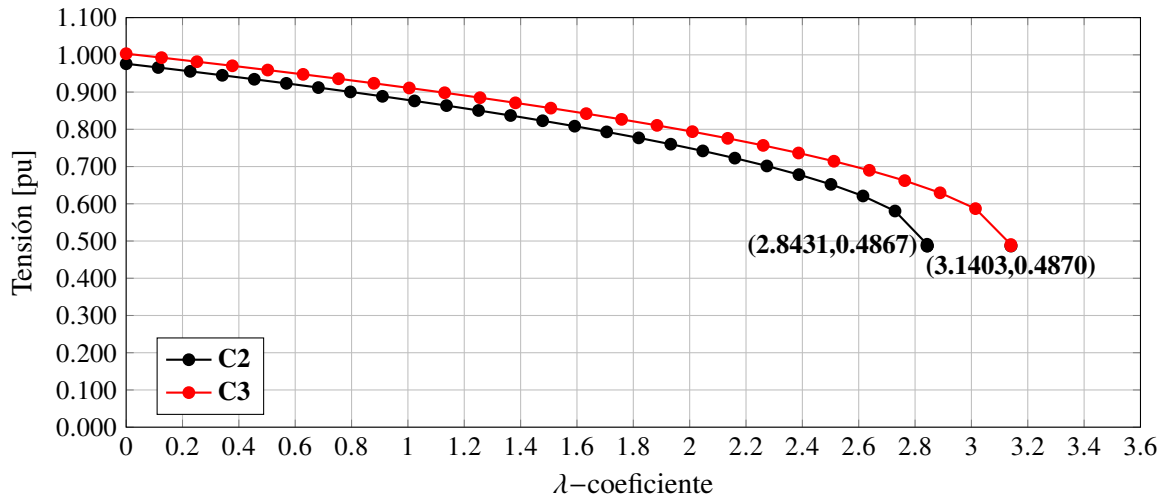


Figura 5.9: Gráfica de estabilidad en tensión coeficiente ( $\lambda$ ) para un sistema de prueba 69 Nodos para los Casos: 2 y 3 con 3 unidades de GD (Fuente: Autores).

Nótese que en al igual que en el sistema de 69 nodos, para el caso base el punto de colapso en tensión (PoCV) es de 0.4720 pu y un coeficiente ( $\lambda$ ) de 2.2118; para el caso 2 el PoCV es de 0.4820 pu y  $\lambda$  de 2.6191 ; para el caso 3 el PoCV es de 0.4856 pu y  $\lambda$  de 2.8825 como se muestra en la Figura 5.7, donde al comparar el C1 con C2 y C3 se tiene un incremento del coeficiente de estabilidad ( $\lambda$ ) de 18.41 % y 30.32 % respectivamente por lo que se demuestra que hay una mejora del índice de estabilidad ( $\lambda$ ) y el PoCV cuando se aumenta la penetración de generación distribuida (GD). Así mismo cuando se incluyen dos unidades de GD se observa que en la Figura 5.8 para el C2 el PoCV es de 0.4916 pu y  $\lambda$  de 2.8408 y para C3 el PoCV es de 0.4844 pu y  $\lambda$  de 3.1394; donde hay un incremento en el coeficiente ( $\lambda$ ) debido al aumento del porcentaje de penetración de GD, pero se evidencia una disminución en el PoCV; esto se debe a que la ubicación de las dos unidades GD para C2 se hace sobre el nodo 64 y 65 (nodo débil) mientras para C3 se hace sobre el nodo 61 y 64. De igual forma en la Figura 5.9 cuando se ubican tres unidades de GD se presenta el mismo fenómeno de incremento en el coeficiente ( $\lambda$ ) y disminución en PoCV ya que la mayor inyección de potencia se presenta en el nodo 61 y 64.

Cuando se analizan los perfiles de tensión en el alimentador de prueba de 69 nodos en Figura 5.6 en el caso C1, la tensión mínima se experimenta en el nodo 65 con 0.4720 pu; además, para los casos C2 y C3 los valores mínimos resultan en el mismo nodo (es decir, nodo 65) con magnitudes de 0.4856 pu y 0.4878 pu respectivamente, de igual forma para el alimentador de prueba 33 nodos en Figura 5.2 para el C1, la tensión mínima que se experimenta en el nodo 18 con 0.3905 pu para C2 y C3 los valores mínimos de tensión son 0.4443 pu y 0.4503 pu respectivamente, por lo que según estos valores se puede interpretar lo siguiente: (i) Estos corresponden a la caída máxima de tensión en la red de distribución en condiciones de carga extremas, sin embargo estos valores nunca ocurrirán bajo operación real ya que los esquemas de protección con respecto a las bajas tensiones desconectarán la red de distribución para proteger todos los componentes; (ii) El valor de  $\lambda$  reportado en la Tabla 5.1 y 5.2 pueden entenderse como

indicadores de eficiencia de la red, ya que cuanto más lejos de cero están, más robusta es la red de distribución y sus incrementos de carga, debido a que el coeficiente ( $\lambda$ ) mide la condición de carga extrema donde la red de distribución presentará un colapso de tensión.

### 5.1.3. Simulación con DigSILENT

Para la validación que se requiere realizar en el software DigSILENT fue necesario realizar aumentos de carga en todo el sistema de manera conjunta y automática, esto con el fin de poder observar de manera gráfica si el software de simulación de sistemas de potencia, tiene como efecto el mismo comportamiento que el modelo matemático implementado en GAMS (MMG) y el algoritmo implementado en MATLAB (AMETM). Debido a que el proceso de aumentar la carga del sistema de manera manual desde la interfaz de usuario es complicada y tardío, se opta por implementar en el Software un algoritmo o comando DPL (DigSILENT Programming Language) para optimizar esta tarea.

DigSILENT en años recientes ha abierto sus funcionalidades a fin de proveer más flexibilidad en la automatización de simulaciones y cálculos mediante un ambiente de programación. Uno de esos mecanismos de programación es el denominado lenguaje de programación de DigSILENT, o simplemente DPL por la abreviación desde el inglés de DigSILENT Programming Language, DPL. El DPL es un lenguaje de programación interno de PowerFactory que sirve con el propósito de una interfaz para automatizar tareas con el uso del programa DigSILENT PowerFactory. El DPL ofrece las mismas características de cualquier lenguaje de programación tales como comando de flujo de acciones y decisión, definición de variables para el uso del usuario, interfaz de entrada y salida a DigSILENT PowerFactory, expresiones matemáticas, etc. En general, DPL agrega una nueva dimensión al uso del programa DigSILENT PowerFactory permitiendo la creación de nuevas funciones de cálculo y análisis, y en consecuencia crear nuevos comandos de cálculo totalmente configurables y definidos por el usuario [43].

El comando DPL implementado consta de siete pasos a saber: (i) Guardar en una matriz la potencia aparente de cada una de las cargas; (ii) ingresar el valor máximo que puede tomar el coeficiente  $\lambda$  y dividirlo en 25, esto para poder realizar 25 iteraciones antes de llegar a el valor máximo de  $\lambda$  y no consumir recursos computacionales de manera innecesaria pretendiendo minimizar el error, puesto que el usuario ajusta el valor de  $\lambda_{maximo}$  dentro del comando; (iii) multiplicar todas las cargas del sistema por el factor  $(1 + \lambda)$ ; (iv) ejecutar la función de flujo de potencia; (v) guardar la magnitud de tensión de cada nodo en una segunda matriz; (vi) aumentar el valor de  $\lambda$  hasta llegar a la última iteración, y (vii) reescribir el valor original de la potencia aparente en las cargas del sistema, véase el Anexo 4.

Es importante mencionar que la ejecución de flujo de carga es una función interna de DigSILENT que solo se tiene que usar como un objeto en el comando, a consecuencia si se llega a dar un valor a  $\lambda$  por encima del valor máximo de convergencia del sistema; el software arrojará un error por la convergencia de la función de flujo de carga y no llegará a reescribir los valores de potencia y por ende la simulación se verá modificada permanentemente y se tendría que importar otro archivo de simulación con los parámetros correctos para que se pueda volver

a ejecutar flujo de carga o el comando DPL.

### 5.1.3.1. Resultados obtenidos DigSILENT caso base (C1) sistema de prueba 33 nodos

Como ya se mencionó, se utiliza el comando DPL para realizar el aumento de carga simultáneo en todos los nodos del sistema, ya que el comando se alimenta de la variable  $\lambda$  no es posible comparar este parámetro del sistema, por ende, se realizará un contraste con el perfil de tensión del nodo débil.

Para este caso a el coeficiente  $\lambda$  se le asignara un valor dentro del comando DPL de 2.407, a consecuencia el aumento  $\lambda$  dentro del comando sera de 0.09628. Es importante mencionar que los perfiles de tensión para cada aumento de carga serán guardados en una matriz llamada "Voltajes", a dicha matriz se tiene acceso a través del editor de comandos DPL.

En la Figura 5.10 se puede observar los perfiles de tensión obtenidos en GAMS y en DigSILENT, esto se realiza con el fin de comparar los resultados del modelo matemático MINLP y un caso cercano a lo que sucedería en el sistema si esto fuera un escenario real (simulación DigSILENT aumento de carga).

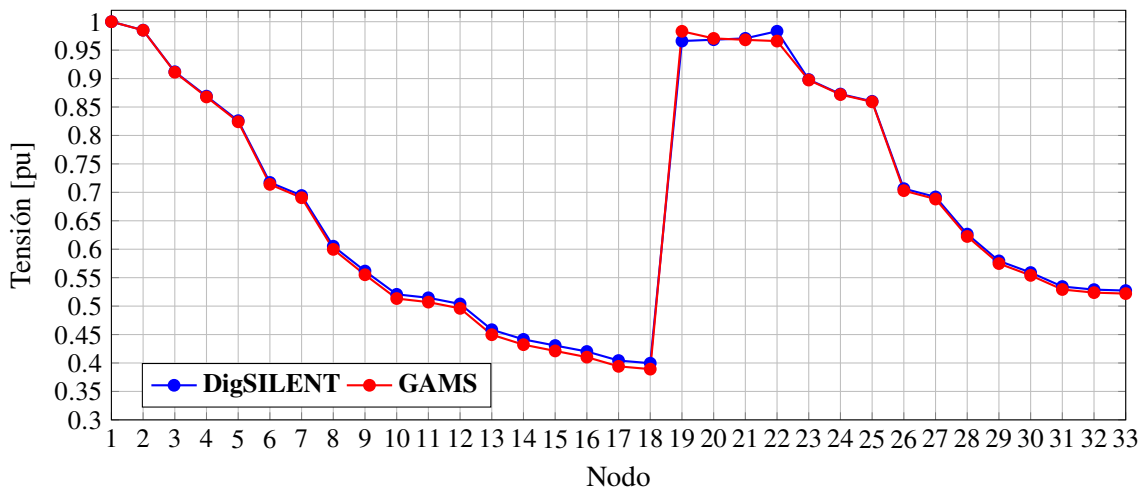


Figura 5.10: Perfiles de tensión de DigSILENT - GAMS en el sistema de distribución para el análisis: Caso 1 en el sistema de prueba 33 Nodos (Fuente: Autores).

La Figura 5.11 muestra los perfiles de tensión del nodo débil del sistema de prueba cuando se realiza el calculo del coeficiente  $\lambda$  mediante GAMS, MATLAB y DigSILENT para el caso base (C1).

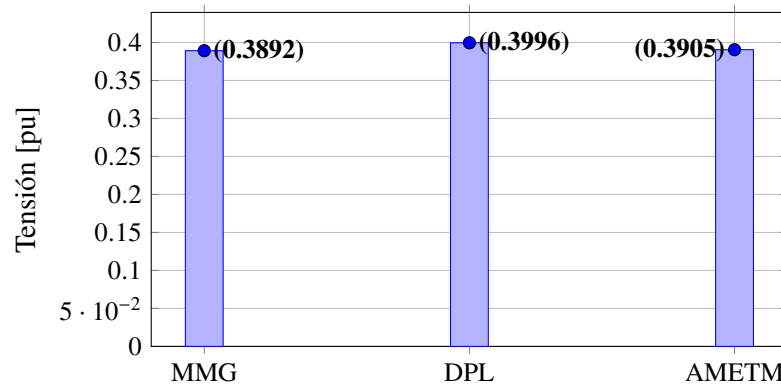


Figura 5.11: Perfil de tensión en el nodo débil en GAMS (MMG) - DigSILENT (DPL) - MATLAB (AMETM) para el análisis: Caso 1 en el sistema de prueba 33 Nodos (Fuente: Autores).

De la Figura 5.11 se pueden comparar los perfiles de tensión del nodo 18 obtenidos en las diferentes herramientas; se evidencia que no hay cambios representativos en el valor de tensión en el punto de colapso de voltaje (PoCV), por lo tanto esto implica que se realizó una metodología de optimización adecuada.

El margen de error entre los resultados de tensión obtenido en GAMS y DigSILENT no superan el 2.5% como se observa en Figura 5.11, asumiendo que el valor real que toma el sistema es el obtenido en GAMS ya que lo esperado por el modelo matemático MINLP es llegar a una solución óptima global.

### 5.1.3.2. Resultados obtenidos DigSILENT caso base (C1) sistema de prueba 69 nodos

De igual forma que en el sistema de prueba 33 nodos, se utiliza el comando DPL para realizar un aumento de carga simultaneo en todos los nodos del sistema, donde para este caso a el coeficiente  $\lambda$  se le asignara un valor dentro del comando DPL de 2.2115, a consecuencia el aumento de  $\lambda$  dentro del comando sera de 0.08846.

En la Figura 5.12 se puede observar los perfiles de tensión obtenidos en GAMS y en DigSILENT, igual que para el sistema de prueba anterior esto se realiza con el fin de comparar los resultados del modelo matemático MINLP y DigSILENT.



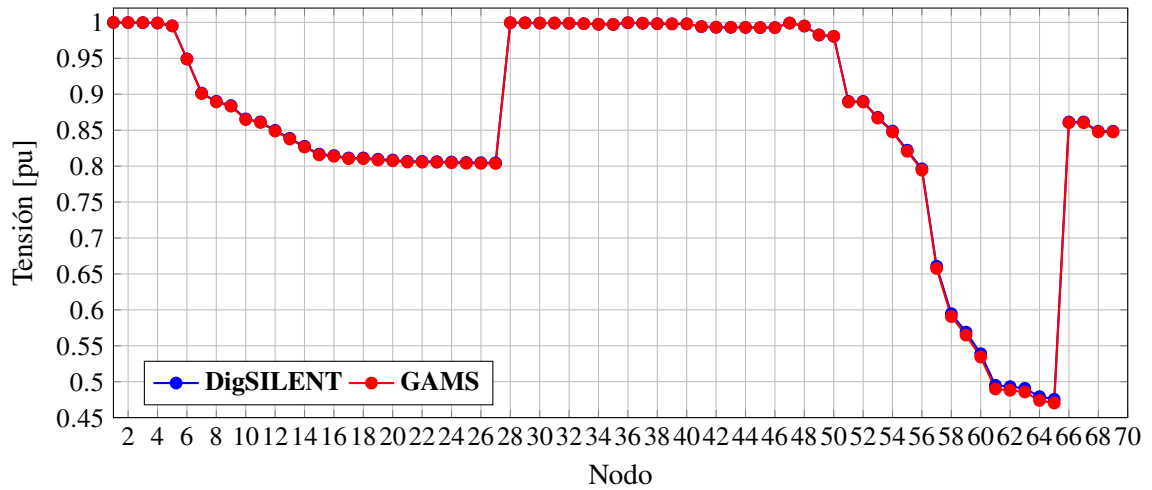


Figura 5.12: Perfiles de tensión de DigSILENT - GAMS en el sistema de distribución para el análisis: Caso 1 en el sistema de prueba 69 Nodos (Fuente: Autores).

La Figura 5.13 muestra los perfiles de tensión del nodo débil del sistema de prueba cuando se realiza el cálculo del coeficiente  $\lambda$  mediante GAMS, MATLAB y DigSILENT para el caso base (C1).

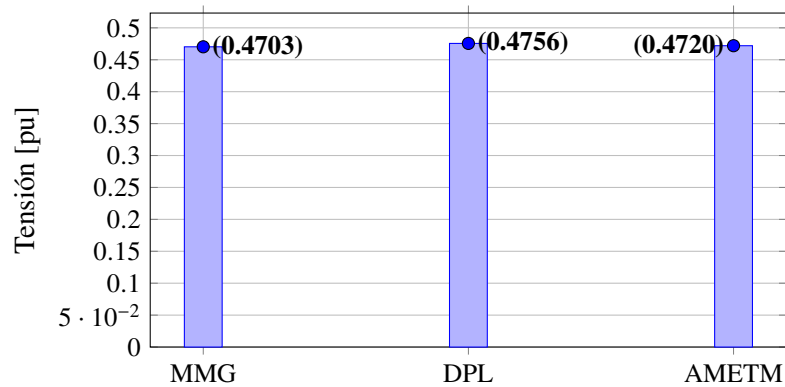


Figura 5.13: Perfil de tensión en el nodo débil en GAMS (MMG) - DigSILENT (DPL) - MATLAB (AMETM) para el análisis: Caso 1 en el sistema de prueba 69 Nodos (Fuente: Autores).

De la Figura 5.13 se pueden comparar los perfiles de tensión del nodo 65 obtenidos en las diferentes herramientas, se evidencia que no hay cambios representativos en el valor de tensión en el punto de colapso de voltaje (PoCV), por lo tanto esto implica que se realizó una metodología de optimización adecuada.

El margen de error entre los resultados de tensión obtenido en GAMS y DigSILENT no superan el 1 % se observa en Figura 5.13, asumiendo que el valor real que toma el sistema es el

obtenido en GAMS ya que lo esperado por el modelo matemático MINLP es llegara una solución óptima global.

# Capítulo 6

## Conclusiones y trabajos futuros

### 6.1. Conclusiones

Para este proyecto de grado se estudió el problema de maximización del margen de estabilidad de tensión en sistemas de distribución a través de la formulación de un modelo matemático de programación no lineal entera mixta. Dicho modelo matemático fue resuelto por el paquete de optimización GAMS a través de su solucionador BONMIN, además, se presentó un ejemplo ilustrativo de la implementación del modelo matemático en un pequeño sistema de prueba para mostrar la facilidad de uso de esta herramienta para resolver el problema de optimización. También, se empleó una metodología en MATLAB (AMETM) que permitió validar los resultados obtenidos en GAMS y obtener una representación gráfica del comportamiento del coeficiente (margen de estabilidad)  $\lambda$  en los sistemas de prueba cuando se aumenta la carga demandada.

Las validaciones numéricas encontradas en los sistemas de prueba IEEE 33 y 69 nodos, han demostrado que el problema de determinar el margen de estabilidad en tensión para redes de distribución mediante el enfoque MINLP converge al óptimo global, donde al comparar el resultado obtenido con MATLAB se evidencia una similitud en los datos demostrando que el modelo de optimización matemática implementado es acertado. Adicional la inyección de potencia activa por los generadores distribuidos en algunos nodos permitió demostrar que el coeficiente  $\lambda$  aumenta con respecto al caso base, lo que implica que estas inyecciones de potencia tuvieron efectos positivos en el margen de estabilidad de tensión de la red; esto es posible con el uso del algoritmo AMETM, con el cual se determina el valor de coeficiente (margen de estabilidad)  $\lambda$  y así determinar de manera gráfica el comportamiento de cada nodo de los sistemas de prueba IEEE 33 y 69 nodos.

Se validó la metodología propuesta en el caso base para cada uno de los sistemas de prueba IEEE utilizados mediante la utilización la programación de un comando DPL en el software DigSILENT, esto permitió evidenciar que desde el modelo de optimización planteado se obtienen resultados muy cercanos a lo que sucedería en la realidad en un sistema ante aumentos de

carga. También es importante mencionar que la metodología permite ratificar los beneficios de la inclusión de GD en redes de distribución, en donde se confirma que el correcto dimensionamiento y ubicación de fuentes de generación son de gran beneficio para la optimización de aspectos que afectan la calidad del servicio en redes de distribución; los cuales se encuentran en estudio.

## 6.2. Trabajos futuros

Como posibles trabajos de investigación derivables de esta investigación, se pueden considerar los siguientes:

- ✓ La reformulación del modelo matemático realizando las aproximaciones necesarias para obtener un modelo de optimización convexa, el cual pueda ser resuelto en la herramienta CVX de MATLAB, lo cual convierte el modelo de MINLP en un modelo de MI-SOCP.
- ✓ Aplicar el análisis propuesto al caso de ubicación óptima de fuentes fotovoltaicas y aerogeneradores distribuidos en la red y su impacto sobre el margen de estabilidad en tensión cuando se consideran curvas de operación 24 horas.

# Bibliografía

- [1] O. D. Montoya, W. Gil-González, and L. Grisales-Noreña, “An exact MINLP model for optimal location and sizing of DGs in distribution networks: A general algebraic modeling system approach,” *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 11, no. 2, pp. 409–418, jun 2020.
- [2] G. F. P. Castrillón and G. A. L. Getial, “Metodologías para el análisis de estabilidad de tensión en estado estacionario,” Ph.D. dissertation, 2008. [Online]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/71396041.pdf>
- [3] J. Dolores and J. Cervantes, *Sistemas de distribución de energía eléctrica*, 1st ed., Sans Serif Editores, Ed. Ciudad de Mexico: Sans Serif Editores, 1995.
- [4] “¿Qué es la red de distribución y qué elementos la componen?” [Online]. Available: <https://www.fundacionendesa.org/es/recursos/a201908-red-de-distribucion>
- [5] Jairo Alberto Leal Almario, “Distribucion de energia electrica en colombia conceptos y regulaciones.” [Online]. Available: <https://www.gruporenovatio.com/2019/03/distribucion-de-energia-electrica-en-colombia-conceptos-y-regulaciones>
- [6] Jose Samuel Ramírez Castaño, “Redes de distribución de energía ,” in *Redes de Distribución de Energía*, tercera ed ed., Universidad Nacional de Colombia, Ed., Manizales, 2003, ch. 1.
- [7] A. Elsherif, T. Fetouh, and H. Shaaban, “Power Quality Investigation of Distribution Networks Embedded Wind Turbines,” *Journal of Wind Energy*, vol. 2016, pp. 1–17, apr 2016.
- [8] A. F. Panesso-Hernández, J. Mora-Flórez, and S. Pérez-Londoño, “Complete power distribution system representation and state determination for fault location,” *DYNA*, no. 192, pp. 141–149, aug 2015.
- [9] Creg, “Resolución CREG 097 de 2008,” pp. 103–121, 2008.
- [10] O. D. Montoya, W. Gil-González, and D. A. Giral, “On the matricial formulation of iterative sweep power flow for radial and meshed distribution networks with guarantee of convergence,” *Applied Sciences*, vol. 10, no. 17, p. 5802, aug 2020.
- [11] O. D. Montoya, W. Gil-González, A. Arias-Londoño, A. Rajagopalan, and J. C. Hernández, “Voltage stability analysis in medium-voltage distribution networks using a second-order cone approximation,” *Energies*, vol. 13, no. 21, p. 5717, nov 2020.
- [12] G. E. F. González, M. A. J. Benavides, and T. W. F. Vicuña, “Estudio de un sistema de distribución y acometidas en baja tensión (tesis de pregrado),” Ph.D. dissertation, Universidad Politécnica Salesiana, mar 2015. [Online]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/10236/1/UPS-GT001310.pdf>
- [13] K. P. Schneider, B. A. Mather, B. C. Pal, C.-W. Ten, G. J. Shirek, H. Zhu, J. C. Fuller, J. L. R. Pereira, L. F. Ochoa, L. R. de Araujo, R. C. Dugan, S. Matthias, S. Paudyal, T. E. McDermott, and W. Kersting, “Analytic considerations and design basis for the IEEE distribution test feeders,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33, no. 3, pp. 3181–3188, may 2018.

- [14] F. S. Quille Pinto, "Optimización del flujo de potencia en el sistema eléctrico ecuatoriano con programación no lineal bajo MATLAB," Ph.D. dissertation, Universidad politécnica salesiana , Quito, feb 2015.
- [15] Antonio Orza Couto, "La electricidad: conceptos, fenómenos y magnitudes eléctricas ."
- [16] M. R. Bussieck and A. Meeraus, "General algebraic modeling system (GAMS)," in *Applied Optimization*. Springer US, 2004, pp. 137–157.
- [17] O. D. M. Giraldo, "Solving a classical optimization ProblemUsing GAMS optimizer package: Economic dispatch ProblemImplementation," *Ingeniería y Ciencia*, vol. 13, no. 26, pp. 39–63, nov 2017.
- [18] C. C. Fernández, *Manual basico de MATLAB*, Servicios Informáticos U.C.M Servicios Informáticos U.C.M, apoyo a Investigación y Docencia.
- [19] J. García, J. Rodríguez, and J. Vidal, "Aprenda Matlab 7.0 como si estuviera en primero," *Universidad Politécnica de Madrid, España*, p. 136, 2005. [Online]. Available: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Aprenda+Matlab+7+.+0+como+si+estuviera+en+primero{#}0>
- [20] M. S. Castro, J. T. Saraiva, and J. C. Sousa, "Application of the matlab® linprog function to plan the short term operation of hydro stations considered as price makers," in *2016 13th International Conference on the European Energy Market (EEM)*. IEEE, jun 2016.
- [21] *Power System Stability And Control*, ser. EPRI power system engineering series. McGraw-Hill, 1994. [Online]. Available: [https://books.google.com.co/books?id=v3RxH\\_GkwmsC](https://books.google.com.co/books?id=v3RxH_GkwmsC)
- [22] M. Alonso and H. Amaris, "Voltage stability in distribution networks with DG," in *2009 IEEE Bucharest PowerTech*. IEEE, jun 2009.
- [23] M. Chakravorty and D. Das, "Voltage stability analysis of radial distribution networks," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 23, no. 2, pp. 129–135, feb 2001.
- [24] N. K. Roy, M. J. Hossain, and H. R. Pota, "Effects of load modeling in power distribution system with distributed wind generation," pp. 1–6, 2011.
- [25] M. M. Aly and M. Abdel-Akher, "A continuation power-flow for distribution systems voltage stability analysis," in *2012 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon)*. IEEE, dec 2012.
- [26] S. Banerjee, T. K. Chattopadhyay, and C. K. Chanda, "Voltage stability margin of distribution networks for composite loads," in *2012 Annual IEEE India Conference (INDICON)*. IEEE, dec 2012.
- [27] N. Roy, H. Pota, and M. Hossain, "Reactive power management of distribution networks with wind generation for improving voltage stability," *Renewable Energy*, vol. 58, pp. 85–94, oct 2013.
- [28] C. Chen, J. Wang, Z. Li, H. Sun, and Z. Wang, "PMU uncertainty quantification in voltage stability analysis," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, no. 4, pp. 2196–2197, jul 2015.
- [29] M. Banejad and M. Kazeminejad, "Load effects on voltage stability in distribution network with considering of distributed generation," in *2017 IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*. IEEE, oct 2017.
- [30] J. R. C. QUIROZ, "Determinación experimental de las características de los modelos de carga de artefactos eléctricos modernos de uso residencial," Ph.D. dissertation, Escuela Politécnica Nacional, 2017.
- [31] S. A. A. Kazmi, M. K. Shahzaad, and D. R. Shin, "Voltage stability index for distribution network connected in loop configuration," *IETE Journal of Research*, vol. 63, no. 2, pp. 281–293, feb 2017.
- [32] Y. Song, D. J. Hill, and T. Liu, "Static voltage stability analysis of distribution systems based on network-load admittance ratio," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 34, no. 3, pp. 2270–2280, may 2019.
- [33] I. Tristiu, A. Iantoc, D. Postovei, C. Bulac, and M. Arhip, "Theoretical analysis of voltage instability conditions in distribution networks," in *2019 54th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*. IEEE, sep 2019.

- 
- [34] R. L. Sinder, T. M. L. Assis, and G. N. Taranto, "Impact of photovoltaic systems on voltage stability in islanded distribution networks," *The Journal of Engineering*, vol. 2019, no. 18, pp. 5023–5027, jun 2019.
- [35] Ministerio de Minas y Energía and Unidad de Planeación Minero Energética UPME, "Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia," UPME, Bogotá, Tech. Rep., 2015. [Online]. Available: <http://www1.upme.gov.co/sgic/>
- [36] S. Kaur, G. Kumbhar, and J. Sharma, "A MINLP technique for optimal placement of multiple DG units in distribution systems," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 63, pp. 609–617, dec 2014.
- [37] P. V. Babu and S. Singh, "Optimal placement of DG in distribution network for power loss minimization using NLP & PLS technique," *Energy Procedia*, vol. 90, pp. 441–454, dec 2016.
- [38] J. E. Candelo and G. C. Delgado, "Voltage stability assessment using fast non-dominated sorting algorithm 1," *DYNA*, vol. 86, no. 208, pp. 60–68, jan 2019.
- [39] I. Adebayo and Y. Sun, "New performance indices for voltage stability analysis in a power system," *Energies*, vol. 10, no. 12, p. 2042, dec 2017.
- [40] P. Prakash and D. K. Khatod, "Optimal sizing and siting techniques for distributed generation in distribution systems: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 57, pp. 111–130, may 2016.
- [41] "GAMS Aplicado a las Ciencias Económicas - FCE." [Online]. Available: <http://www.fce.unal.edu.co/unidad-de-informatica/proyectos-de-estudio/economia/1271-gams-aplicado-a-las-ciencias-economicas.html>
- [42] W. Gil-González, O. D. Montoya, L. F. Grisales-Noreña, A.-J. Perea-Moreno, and Q. Hernandez-Escobedo, "Optimal placement and sizing of wind generators in AC grids considering reactive power capability and wind speed curves," *Sustainability*, vol. 12, no. 7, p. 2983, apr 2020.
- [43] "PowerFactory - DIgSILENT, DPL programming language." [Online]. Available: <https://www.digsilent.de/en/powerfactory.html>

# Apéndices



# Apéndice A

# Algoritmo obtención curva $\lambda$ -V

**Algorithm 3** Algoritmo para graficar curva PV en un sistema de N nodos y obtención del margen de estabilidad ( $\lambda$ )

```

1  clc; clear all;
2  %% Par metros del sistema
3  % [i j Rij[Ohm] Xij[Ohm] Pj[kW] Qj[kVAr]
4  Datos = [1 2 0.5025 0.3025 1000 600
5           2 3 0.4020 0.2510 900 500
6           3 4 0.3660 0.1864 2500 1200
7           2 5 0.3840 0.1965 1200 950
8           5 6 0.8190 0.7050 1050 780
9           2 7 0.2872 0.4088 2000 1150];
10 Vb = 23e3; % Base Voltaje V
11 Sb = 1000; % Base potencia (kVA)
12 Zb = (Vb^2)/(Sb*1000); Datos(:,3:4) = Datos(:,3:4)/Zb;
13 Datos(:,5:6) = Datos(:,5:6)/Sb;
14 N = max(max(Datos(:,1:2))); % n mero de nodos.
15 %% Par metros para aumento de carga
16 paso=0.0001; Nodo = 7; I=0; Vr = zeros(2039,1); KK = zeros(2039,1);
17 %% Generación Distribuida
18 Ubicacion =[0]; Pdg = [0]; GD = zeros(N-1,1);
19 if Ubicacion ~= 0
20     ppp = 1;
21     for i=1: size(Ubicacion,2)
22         GD(Ubicacion(i)-1,1) = Pdg(i);
23     end
24 else
25     ppp=1;
26 end
27 %% C lculo de la matriz de admitancias
28 Y = YBUS(Datos); %Función YBUS
29 for lambda = 0:paso:10
30     I = I + 1;
31     %% aumento de lambda en las potencia sin modificar GD
32     Nodos=Datos;
33     Nodos(:,5)=(1 + lambda)*Nodos(:,5)-GD(:,1);
34     Nodos(:,6)=(1 + lambda)*Nodos(:,6);
35     %% Aproximaciones sucesivas inicio
36     N =max(max(Datos(:,1:2))); % n mero de nodos.
37     Vg = 1;
38     Ygg = Y(1,1);Ygd = Y(1,2:N);Ydg = Ygd.'; Ydd = Y(2:N,2:N);
39     Zdd = inv(Ydd);Sd = Nodos(:,5) + I*Nodos(:,6); Vd0 = ones(N-1,1);
40     tmax = 3000; er = 1e-10;
41     for t = 1:tmax
42         % Flujo Aprox. Succ.
43         Vd = -Zdd*(inv(diag(conj(Vd0)))*conj(Sd) + Ydg*Vg);
44         if abs(abs(Vd) - abs(Vd0)) < er
45             V = [Vg;Vd];
46             Sloss = (V.')*conj(Y*S);
47             break
48         else
49             Vd0 = Vd;
50         end
51     end
52     %% Aproximaciones susecivas fin
53     %% condicion ruptura for si flujo no converge
54     if t == tmax
55         lam = lambda - paso;
56         abs(V(Nodo)); % voltaje nodo debil
57         lambda;
58         Sloss;
59         V;
60         break
61     else
62         Vr(I)= abs(V(Nodo));
63         KK(I)= lambda;
64     end
65 end
66 %% Datos grafica y lambda
67 lam
68 z = round(size(Vr,1)/25);
69 grafica = [KK Vr]; graf = [grafica(1:z:size(grafica),:); 0 0];
70 graf(size(graf,1), :) = grafica(size(grafica,1),:);
71 x = graf(:,1) % valores lambda
72 y = graf(:,2) % Valores Voltaje en nodo debil
73 plot(x,y,'-*')

```

# Apéndice B

# Comando DPL implementado en DigSILENT®

## Algorithm 4 Algoritmo para realizar aumentos de carga progresivo en DigSILENT.

```
1 int nc,nv,j;
2 double xmax,i,p,q;
3 !Conjuntos
4 set LOADs; !Conjunto de cargas
5 object LOAD; !Objeto de cargas
6 set Vnodos; !Conjunto de cargas
7 object Vnodo; !Objeto de cargas
8 ClearOutput();
9 EchoOff();!Desactivar la interfaz de usuario
10 !Matrices
11 Carga.Init(1,1); !Potencia compleja de las cargas
12 Voltajes.Init(1,1); !Magnitud de voltajes
13 LOADs = AllRelevant('*.ElmLod');
14 !Guardar la potencia compleja de cada nodo en una matriz
15 nc = 0;
16 for (LOAD = LOADs.First() ; LOAD ; LOAD = LOADs.Next() ){
17     nc = nc + 1;
18
19     Carga.Set(nc,1,LOAD:plini); !Potencia activa
20     Carga.Set(nc,2,LOAD:qlini); !Potencia reactiva
21
22 }
23 !Aumentos de carga
24 xmax =3.0633; !Limite maximo de aumento de carga
25 j = 0;
26 for (i = 0; i<=xmax ; i += xmax/25){
27     j = j + 1;
28     !Reescribir la potencia de las cargas
29     nc = 0;
30     for (LOAD = LOADs.First() ; LOAD ; LOAD = LOADs.Next() ){
31         nc = nc + 1;
32         p = Carga.Get(nc,1); !Potencia activa
33         q = Carga.Get(nc,2); !Potencia reactiva
34         LOAD:plini = p*(1+i);
35         LOAD:qlini = q*(1+i);
36     }
37     !Correr flujo de pontencia
38     Ldf.Execute();
39     Vnodos = AllRelevant('*.ElmTerm');
40     !Guardar la magnitud del voltaje de cada nodo en una matriz
41     nv = 0;
42     for (Vnodo = Vnodos.First() ; Vnodo ; Vnodo = Vnodos.Next() ){
43         nv = nv + 1;
44         Voltajes.Set(j,nv,Vnodo:m:u); !Magnitud de tension
45     }
46 }
47 !Reescribir la potencia inicial de las cargas
48 nc = 0;
49 for (LOAD = LOADs.First() ; LOAD ; LOAD = LOADs.Next() ){
50     nc = nc + 1;
51
52     LOAD:plini = Carga.Get(nc,1);
53     LOAD:qlini = Carga.Get(nc,2);
54 }
```