



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Análisis Control de Tensión en una Red de Distribución, operando de manera aislada

Ana María Villa Giraldo

Universidad Nacional de Colombia

Departamento de Ingeniería eléctrica, electrónica y de computación

Manizales, Colombia

2015



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Analysis of Voltage Control in Distribution Network, operating in isolated manner

Ana María Villa Giraldo

National University of Colombia
Department of Electrical, Electronic and Computer Engineering
Manizales, Colombia
2015

Análisis Control de Tensión en una Red de Distribución, operando de manera aislada

Ana María Villa Giraldo

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería Eléctrica

Director (a):
Doctora Sandra Ximena Carvajal Quintero

Línea de Investigación:
Redes inteligentes y Mini-redes

Universidad Nacional de Colombia
Departamento de Ingeniería eléctrica, electrónica y de computación
Manizales, Colombia

2015

(Dedicatoria)

Agradezco a mis padres por el gran apoyo y confianza que depositaron en mí, es un orgullo tenerlos en mi vida y recibir su motivación día a día para culminar de la mejor manera una meta más en mi camino.

Camino que hemos recorrido juntos y que los lleva a convertirse en testigos de la dedicación, responsabilidad y esfuerzo que representa este logro, siendo más importante aún por el aporte entregado a la sociedad y a la investigación.

Resumen

El siguiente documento hace referencia a la Tesis de Maestría Ingeniería Eléctrica en profundización, en éste se presentará el análisis de estabilidad de tensión para una red de distribución operando en modo isla, el cual tiene como motivación: generar respaldo en la red de distribución del sistema eléctrico de potencia ante contingencias, sin alterar la calidad del servicio a los usuarios, los cuales quedan operando en modo isla; tener en cuenta las condiciones actuales de la normativa Colombiana; y las necesidades del país considerando entre ellas: confiabilidad, respaldo, sostenibilidad y zonas no interconectadas.

Se involucrará la generación distribuida con diferentes niveles de penetración, para lo cual se especificarán las definiciones y clases de este tipo de generación, con el fin de determinar cuál es la opción más adecuada para la implementación en Colombia, de igual manera se realizarán simulaciones por medio del software DigSilent, lo cual permitirá definir los límites de estabilidad de tensión y las condiciones que deben existir en la red de distribución operando en modo isla, con el fin de mantener dicho estado.

Palabras clave: Redes de distribución, Modo isla, Generación Distribuida, Estabilidad de tensión, Demanda, Controlador de tensión, Ley 1715, Standar IEEE 1547.4.

Abstract

The following document refers to the Master's Thesis in Electrical Engineering, the analysis of voltage stability for distribution network operating in island mode, which is to be submitted motivation: to generate support in the distribution system electric power to contingencies without altering the quality of service to network users distribution, which are operating in island mode; current conditions of the Colombian legislation and the country's needs considering including reliability, support, sustainability and non-interconnected areas.

Distributed generation with different levels of penetration is involved, for which the definitions and the different kinds that exist distributed generation, in order to determine what is best for Colombia, likewise be specified simulations were carried out by the DigSilent software, which will define the limits of voltage stability and the conditions that must exist in the distribution network operating in island mode to keep such state.

Keywords: Distribution networks, Island mode, Distributed Generation, Voltage Stability, Demand, Voltage controller, Act 1715, IEEE Standard 1547.4.

Contenido

1. Capítulo 1	14
1.1 Motivación	14
1.2 Planteamiento del Problema	16
1.3 Alcance	18
1.4 Objetivos	18
1.4.1 Objetivos Específicos.....	18
2. Capítulo 2	19
2.1 Generación Distribuida	19
2.1.1 Tecnologías de Generación Distribuida	22
2.1.2 Promesas y Desafíos de la Generación Distribuida	27
2.1.3 Aplicaciones de la Generación Distribuida	30
2.1.4 Impacto de la Generación Distribuida sobre la Red de Distribución	31
2.2 Estándar IEEE 1547:.....	36
2.3 LEY 1715 de 2014.....	44
3. Capítulo 3	48
3.1 Estabilidad en el Sistema Eléctrico de Potencia	48
3.1.1 Análisis del Sistema Eléctrico de Potencia.....	50
3.2 Generalidades Estabilidad De Tensión.....	52
3.2.1 Afectación de los perfiles de tensión en la red de distribución con la operación de GD54	
3.2.2 Estabilidad de Tensión en una red operando de manera aislada.....	56
3.3 EXPERIENCIAS INTERNACIONALES – GD	58
4. Capítulo 4	63
4.1 Diagrama unifilar	64
4.2 Red de distribución detallada incluyendo GD	65
4.3 Características de la red de distribución conectada al SEP sin GD	71
4.4 Características de la red de distribución operando con GD	77
4.5 Características de la red de distribución operando de manera aislada	82
4.5.1. Características de la red de distribución operando de manera aislada – Circuito Municipal	86
4.5.2. Características de la red de distribución operando de manera aislada – Planta Municipal soportando los circuitos Municipal, Intermedia y Sancancio.....	90
4.5.3. Características de la red de distribución operando de manera aislada, ante diferentes puntos de localización de la GD.....	96
4.5.4. Características de la red de distribución operando de manera aislada, ante mayor penetración de GD. En un solo circuito MUNICIPAL	101
4.6 Características de la red de distribución operando de manera aislada, ante combinación de GD con tecnologías PCH y fotovoltaica	110
4.7. Curvas P-V sobre la red de distribución operando de manera aislada.....	116
5. Conclusiones y Trabajos Futuros	131
5.1 Conclusiones.....	132
5.2 Trabajos Futuros	135

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Representación Generación Distribuida [2]	19
Figura 2. GD - Mini hidráulica [49].....	23
Figura 3. GD – Fotovoltaica [50]	24
Figura 4. Promesas y Desafíos de la Generación Distribuida.....	29
Figura 5. Normas IEC – Generación distribuida.	41
Figura 6. Estándares IEEE– Generación distribuida.....	41
Figura 7. Complemento a la normatividad nacional – Generación Distribuida.	42
Figura 8. Zonas no Interconectadas en Colombia [20]	46
Figura 9. Análisis De Estabilidad En Un Sistema De Potencia	49
Figura 10. Análisis Estacionario, Transitorio y Dinámico de un SEP.	51
Figura 11. Equipos en el SEP que influyen en el control de tensión [28]......	53
Figura 12. Característica Potencia – Voltaje para diferentes variaciones de K [12]	55
Figura 13. Diagrama Unifilar	64
Figura 14. Red de distribución detallada para el caso de estudio.....	65
Figura 15. Flujo de carga - Red de distribución conectada al SEP sin GD	71
Figura 16. Perfiles de tensión Circuito MUNICIPAL – SEP sin GD.....	73
Figura 17. Perfiles de tensión Circuito INTERMEDIA – SEP sin GD	74
Figura 18. Perfiles de tensión Circuito SANCANCIO – SEP sin GD	75
Figura 19. Perfiles de tensión Circuito MUNICIPAL – SEP y GD	78
Figura 20. Perfiles de tensión Circuito INTERMEDIA – SEP y GD.....	79
Figura 21. Perfiles de tensión Circuito SANCANCIO – SEP y GD.....	80
Figura 22. Perfiles de tensión obtenidos de la red de distribución operando con GD.	81
Figura 23. Flujo de carga solo con GD.....	82
Figura 24. Perfil de tensión sobre la red operando de manera aislada.....	84
Figura 25. Ubicación perfiles de tensión en la red.....	85
Figura 26. Flujo de carga – circuito Municipal operando de manera aislada con GD	86
Figura 27. Perfiles de tensión – Circuito Municipal con GD	87
Figura 28. Ubicación del mayor y menor perfil de tensión para el circuito MUNICIPAL ...	88
Figura 29. Potencia entrega por la Planta Municipal	90
Figura 30. Cargabilidad 244% de la Planta Municipal soportando los 3 circuitos.	91
Figura 31. Perfiles de tensión planta Municipal supliendo los 3 circuitos.....	92
Figura 32. Ubicación perfiles de planta Municipal alimentando los 3 circuitos – Sobrecarga	93
Figura 33. Cargabilidad 99% de la Planta Municipal soportando el circuito Municipal y parte del circuito Intermedia.	94

Figura 34. Perfil de tensión – Planta Municipal con circuito Municipal y una parte de Intermedia	95
Figura 35. Ubicación de los perfiles de tensión GD al Final del circuito y comportamiento de la planta Municipal.....	98
Figura 36. Perfiles de tensión - Planta Municipal ubicada al final del circuito.....	98
Figura 37. Ubicación de los perfiles de tensión GD al Inicio del circuito y comportamiento de la planta Municipal.....	99
Figura 38. Perfiles de tensión - Planta Municipal ubicada al Inicio del circuito.....	100
Figura 39. Comportamiento de los 2 generadores en el circuito Municipal	102
Figura 40. Perfiles de tensión – 2 generadores en el circuito Municipal ubicados a la mitad y final.	103
Figura 41. Ubicación de los perfiles de tensión con GD a la mitad y al final del circuito.....	104
Figura 42. Comportamiento de los 3 generadores en el circuito Municipal al Inicio, Final y Mitad.	105
Figura 43. Perfiles de tensión – 3 generadores en el circuito Municipal ubicados al inicio, mitad y final de la red.	106
Figura 44. Ubicación de los perfiles de tensión con GD al inicio, mitad y final del circuito.	107
Figura 45. Comportamiento de los 3 generadores en el circuito Municipal – En un mismo punto	108
Figura 46. Perfiles de tensión – 3 generadores en el circuito Municipal ubicados en la misma zona.....	109
Figura 47. Generador Fotovoltaico en una red operando de manera aislada.	112
Figura 48. GD – Fotovoltaica entregando a la red 0,01 MW	113
Figura 49. Perfiles de tensión GD – Fotovoltaica inyectando 0,5 MW a la red operando de manera aislada.....	115
Figura 50. Análisis de la curva P-V – Circuito Sancancio nodo lejano M11228	117
Figura 51. Comportamiento de la carga en el nodo M11228 ante análisis curva P-V. ...	117
Figura 52. Curva P-V en el nodo M11228.....	118
Figura 53. Ubicación de los nodos analizados para la curva P-V	119
Figura 54. Análisis curva P-V para varios nodos de la red operando de manera aislada	120
Figura 55. Ubicación de los nodos analizados para la curva P-V incluyendo GD - Fotovoltaica.....	121
Figura 56. Análisis curva P-V para varios nodos de la red operando de manera aislada y con GD Fotovoltaica	122
Figura 57. GD – PCH [55]	138
Figura 58. GD - Eólica	139
Figura 59. GD – Biomasa [57]	140
Figura 60. Potencia reactiva en las líneas eléctricas.	143
Figura 61. Características cortocircuito Trifásico	146
Figura 62. Características cortocircuito Monofásico	147
Figura 63. Flujo de Carga.....	147
Figura 64. Características Planta Intermedia.....	149
Figura 65. Características Planta Municipal.....	151
Figura 66. Características planta Sancancio.	153

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Comparación entre un sistema con GD y un sistema con generación centralizada	20
Tabla 2. Clasificación sobre la seguridad del suministro a corto plazo de la GD según su tecnología [24]	25
Tabla 3. Especificaciones técnicas y requisitos de la norma IEEE 1547. [39]	39
Tabla 4. Comparación normativa IEEE e IEC frente a la generación distribuida. [51 al 54]	42
Tabla 5. Valores del parámetro K como función del nivel de tensión [12].....	55
Tabla 6. Clase de Usuarios asociados a cada circuito.	67
Tabla 7. Resultados de las simulaciones aumentando la potencia entregada por el GD-Fotovoltaico	114
Tabla 8. Tabla resumen respecto a las simulaciones realizadas en el Capítulo 4	125

Lista de Anexos

Anexo A. Tecnologías de generación Distribuida	138
Anexo B. Elementos necesarios para el control de tensión en el SEP	141
Anexo C. Características de la red externa y plantas de generación	146

Lista de Símbolos y abreviaturas

Abreviaturas

Abreviatura	Término
<i>AGC</i>	Control automático de Generación
<i>CCENERGIA</i>	Cámara Colombiana de la Energía
<i>D-STATCOM</i>	Distribution – Static Var Compensator
<i>EDAC</i>	Esquema de deslastre Automático de Carga
<i>FENER</i>	Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid
<i>GD</i>	Generación Distribuida
<i>IEEE</i>	Institute of Electrical and Electronics Engineers
<i>PCH</i>	Pequeña Central Hidroeléctrica
<i>PRICE</i>	Proyecto Conjunto de Redes Inteligentes
<i>SD</i>	Sistema de Distribución
<i>SEP</i>	Sistema Eléctrico de Potencia
<i>SVC</i>	Compensador Estático de Reactiva
<i>ZIN</i>	Zonas No Interconectadas

1. Capítulo 1

1.1 Motivación

Actualmente para el eficiente desarrollo de la sociedad y la gran variedad de aplicaciones y tareas que se deben desempeñar día a día, se ha hecho necesario el uso de la energía eléctrica, exigiendo a las empresas prestadoras de este servicio, que garanticen su disponibilidad y exigiendo a los consumidores el uso eficiente de la misma, estos dos factores son claves en el momento de determinar el éxito o el fracaso de las economías mundiales [1].

Para el suministro de la energía eléctrica a los clientes de la red de distribución, es necesario cumplir con unos niveles de calidad, confiabilidad, garantizar la estabilidad de tensión en el sistema y los equipos que dependen del mismo; adicionalmente se debe estar en capacidad de proporcionar el servicio en cualquier momento, por lo que es de gran importancia para las empresas de energía considerar los siguientes factores:

- Lograr el balance entre la oferta y la demanda; por lo tanto deben tener presente las horas pico donde se da la máxima demanda y las horas valle con el fin de no generar más energía de la necesaria, ya que esto incurriría en desborde de energía, debido a que a hoy no se cuenta con sistemas de almacenamiento.
- Restablecimiento del sistema ante contingencias presentadas en la red de distribución.
- Versatilidad del sistema con el fin de continuar con el suministro de energía y no afectar a los clientes.

- Disponer de diferentes fuentes de alimentación y generación de respaldo, lo cual apuntará a la confiabilidad del sistema.

Debido a todos los requerimientos que se deben tener presentes en la red de distribución, este documento se ha elaborado con el ánimo de servir como apoyo a los operadores de red. En este, se realizarán análisis de estabilidad de tensión y se tendrán en cuenta las diferentes alternativas de generación de energía, de estas últimas se validará tanto su clase como la ubicación en el sistema, todo esto con el fin de proveer a los clientes el servicio de energía eléctrica en el instante que se necesite y con buenos niveles de calidad.

Se analizarán también las distintas fuentes de energía y su aporte al medio ambiente. Debido a las condiciones atmosféricas que hoy se presentan en el país, como lo son, cambios climáticos, las emisiones de gases de efecto invernadero y el constante aumento de contaminación, es necesario buscar diferentes alternativas que contribuyan en la disminución de estas afectaciones, y que adicionalmente ayuden a combatir la crisis energética que seguramente se presentará por los continuas alteraciones climáticas. [13]

"Colombia como país cuyas exportaciones dependen principalmente de sus riquezas naturales, entre ellas el petróleo, tiene la necesidad de evaluar nuevas fuentes de energía para enfrentar la crisis energética que los expertos pronostican a corto y mediano plazo". [3]

Una de las principales opciones para atacar estos fenómenos es el uso de Energías Renovables, empleando recursos naturales tales como: Eólicos, Solares, Hidroeléctricos, Geotérmicos y Biomasa; los cuales aportarán también para estimular el empleo, el desarrollo tecnológico y el crecimiento económico del país, apuntando hacia un país sostenible y en el cual surgirá la necesidad de plantear normas para migrar a este cambio exitosamente.

Con el fin de poner en práctica la implementación y el uso de las Energías Renovables en Colombia, el 13 de Mayo de 2014 es publicada la ley 1715 de 2014, por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional. El acto del lanzamiento de esta ley se realizó el día 5 de agosto, al cual asistieron especialistas del sector energético colombiano [3] [21].

La Ley 1715 de 2014 marca un hito para el desarrollo sostenible del sector energético en Colombia, ya que promueve las energías alternativas limpias, renovables, ambientalmente sostenibles, y también la gestión eficiente de la energía contribuyendo a la mejora en la competitividad del país. [4]

Teniendo en cuenta la aprobación de la Ley 1715, la integración al Sistema Energético Nacional y los múltiples beneficios que esta conlleva, se incluye la generación distribuida (GD) en las redes de distribución, formando así islas o Mini Grids, como es conocido actualmente, y las cuales son pequeños sistemas de energía, capaz de equilibrar los recursos de oferta y demanda, para mantener el servicio estable dentro de un límite definido. [5]

Para efectos del tema que se pretende profundizar en este documento, se tendrá en cuenta una red de distribución operando de manera aislada, ya que en caso de presentarse una falla en el Sistema Interconectado, la Mini Grid debe continuar sufriendo el servicio de energía a los usuarios que hacen parte del Sistema Eléctrico de Potencia (SEP).

Para llevar a cabo la aplicación descrita anteriormente, se deben realizar los respectivos estudios de estabilidad y análisis de la nueva configuración del sistema, con el fin de identificar la viabilidad, las condiciones y límites que se deben cumplir, para obtener un buen y correcto comportamiento de la Mini Grid en cuanto a confiabilidad y estabilidad de tensión.

1.2 Planteamiento del Problema

En una red de distribución operando de manera aislada, no es común encontrar generadores síncronos, los cuales corresponden a elementos que normalmente fijan los valores de tensión y frecuencia, por lo tanto se deben implementar otro tipo de dispositivos que permitan la estabilidad y control de tensión para la red de distribución, incluso cuando opera en modo isla. [6].

Lo anterior genera un gran reto, ya que se deben realizar estudios y simulaciones, con el fin de determinar qué tipo de elementos y en qué condiciones de la red, se deben utilizar para lograr la estabilidad de tensión.

Mientras la red de distribución opera de manera autónoma es decir modo isla, no pueden depender de la red central con el fin de proporcionar los siguientes puntos: estabilidad para controlar la tensión y la frecuencia, el suministro y la demanda debe ser equilibrada y se debe administrar la potencia activa o reactiva.

Se debe tener presente que las características de la red de un sistema autónomo deben ser similares a las de un sistema interconectado. Los usuarios de ambos sistemas autónomos e interconectados, utilizan el mismo tipo de equipo y por lo tanto requieren la misma calidad de la energía para su funcionamiento. [7]

Como se mencionó anteriormente, en Colombia se cuenta con la integración de la ley 1715, lo cual conlleva a múltiples beneficios que se pretenden obtener a partir de la implementación de los recursos renovables y la GD en las Mini Grids.

Es necesario realizar estudios antes de su ejecución, sobre los escenarios que se puedan presentar por la integración de esta a la red de distribución, teniendo en cuenta que, ante la presencia de eventos en el SEP, la mini grid operará de manera aislada con el fin de suplir el servicio de energía a los usuarios que dependerán de la nueva configuración del sistema.

Es de nuestro interés analizar el comportamiento de la Mini Grid, con los elementos necesarios para la operación de la misma, los diferentes niveles de penetración de la GD, los consumos y la clase de usuarios finales; para poder obtener una respuesta satisfactoria de la misma y que a su vez cumpla con los límites de estabilidad de tensión.

Se deben considerar múltiples aspectos en cuanto a la operación de la mini grid en modo isla, tales como: ¿Se mantendrá la estabilidad de tensión sin la referencia del sistema interconectado?, ¿Qué tanto influye en la operación de la red de distribución operando de manera aislada, diferentes niveles de penetración de GD?, ¿Soportará toda la carga normalmente conectada en el sistema?, ¿Existe algún tipo de control con el fin de mantener la estabilidad de tensión?, ¿En que afecta no tener estabilidad de tensión?,

¿Cómo se logra incentivar el uso de energías renovables para cumplir con la ley 1715, si no es realizando estudios, análisis y simulaciones del sistema previendo y solucionando todo lo que pueda pasar?

1.3 Alcance

El estudio acerca del “análisis control de tensión en una red de distribución operando en modo isla”, tiene como propósito, realizar simulaciones de una red de distribución alimentado a través de pequeños generadores empleando recursos renovables, aplicando el concepto de la GD. Con lo cual se obtendrán diferentes escenarios y se analizarán los resultados, determinando cuáles son las condiciones que debe tener una red para operar satisfactoriamente en los diferentes niveles de penetración de GD, sin perder la estabilidad de tensión y poder prestar un servicio confiable a los usuarios.

1.4 Objetivos

Analizar los perfiles y control de tensión en una red de distribución que opere en modo isla, ante los diferentes niveles de penetración de GD.

1.4.1 Objetivos Específicos

- Determinar las condiciones operativas para la red de distribución del estudio.
- Definir los aspectos fundamentales que deben tenerse en cuenta en un estudio de estabilidad de tensión en una red de distribución que opere en modo isla asociado a la instalación ascendente de GD
- Definir los límites bajo los cuales se mantienen los perfiles de tensión en la red de distribución, con diferentes niveles de penetración de GD.

2. Capítulo 2

2.1 Generación Distribuida

La GD, tiene como característica la localización cerca de las zonas de demanda y su producción de energía a pequeña escala, mediante fuentes de generación empleando los recursos renovables [12] [23]. Se puede conectar directamente al consumidor o a la red de transporte y distribución. En la Figura 1 se contemplan dichas representaciones.



Figura 1. Representación Generación Distribuida [2]

La GD tiene gran aplicabilidad para sociedades como zonas rurales, pequeñas poblaciones, centros de negocios y zonas industriales; logrando múltiples beneficios como: la utilización de los recursos renovables de la zona [13] y la optimización de los mismos, esto con el fin de obtener la promoción eficiente de su propia energía, desarrollando así un entorno con mayor autonomía y disminución de la dependencia del Sistema Eléctrico de Potencia. Adicionalmente se presenta una reducción significativa en cuanto las emisiones contaminantes en el medio ambiente. [2]

Por el contrario a lo explicado en el párrafo anterior, el Sistema Eléctrico de Potencia actual se tiene implementado para cumplir con el suministro de energía eléctrica por medio de generación centralizada, el cual consta de una gran central de generación y una red completa para la transmisión y distribución de la energía a los usuarios finales como son los hogares, hospitales, universidades, zonas Industriales, etc.

En la Tabla 1, se consignan las diferencias que se pueden presentar en el suministro de energía a los usuarios finales, por medio de un sistema con GD y un sistema con generación centralizada.

Tabla 1. Comparación entre un sistema con GD y un sistema con generación centralizada

SISTEMA CON GENERACIÓN DISTRIBUIDA (GD)	SISTEMA CON GENERACIÓN CENTRALIZADA
Está iniciando su proceso de penetración	Implementado actualmente para dar suministro a casi toda la población
Múltiples clúster interconectados entre sí y con la red Nacional. Generación descentralizada	Configuración de Generación Centralizada
Múltiples puntos de generación y con diferentes Fuentes de Energías Renovables	Pocos puntos de Generación, pero a gran escala
Potencias reducidas del orden de los kW hasta algunas unidades de MW	La potencia instalada es elevada

SISTEMA CON GENERACIÓN DISTRIBUIDA (GD)	SISTEMA CON GENERACIÓN CENTRALIZADA
Disminución de las pérdidas de energía en el transporte y la distribución, ya que se produce la energía cerca del lugar de consumo	Se presentan pérdidas por transporte y distribución de la energía
Adaptación de la Oferta y la demanda mediante redes inteligentes (Smart Grids)	Pronostico del comportamiento de la oferta y la demanda según los registros históricos de la empresa
Mejora la confiabilidad y la calidad del sistema eléctrico, debido a la baja probabilidad de falla de pequeños generadores a la vez y su distribución por el territorio	Una falla en el sistema de generación, o en las redes de transmisión afectará a gran cantidad de los usuarios
Menor daño y contaminación al medio ambiente y ecosistemas asociados, mediante el uso de energías renovables	Mayor daño y contaminación para el medio ambiente y ecosistemas asociados, debido al uso de combustibles e invasiones de predios naturales

Teniendo en cuenta las diferencias expuestas en la Tabla 1, se evidencia que la GD trae grandes beneficios respecto a la generación centralizada que a hoy está presente.

Estos beneficios se pueden apreciar en cuanto a la reducción de pérdidas de energía, ya que al estar cerca de la demanda y la zona a la que va a suministrar el servicio no necesitará de extensas líneas de transmisión ni de distribución, la GD puede prestar el servicio de energía eléctrica incluso en lugares remotos donde por medio de la generación centralizada dependería de la construcción y ampliación de toda su infraestructura para poder cumplir con el suministro, evidentemente esto incrementaría los costos y por último la GD ayuda a la disminución de la contaminación al medio ambiente debido el uso de recursos renovables lo cual le apunta a desarrollo auto sostenible.

2.1.1 Tecnologías de Generación Distribuida

A continuación se hace una compilación sobre los tipos de tecnologías que pueden ser implementadas en la GD:

Tecnologías tradicionales:

- Turbina de gas
- Micro-turbina
- Motores alternativos

Tecnologías no tradicionales:

- Eólica
 - Mini-hidráulica
 - Solar térmica
 - Solar Fotovoltaica
 - Geotérmica
 - Mareomotriz
 - Sistemas que aprovechan la biomasa como combustible mediante la gasificación.
- [9]

Se especificarán a continuación las tecnologías que se pretenden analizar en el caso de estudio que se tiene como objetivo para este documento. Las características técnicas de las demás tecnologías de GD se encuentran en el anexo 1.

✓ **Mini hidráulica:**

Aprovechamiento de la energía potencial del agua, almacenada en un embalse o procedente de un río. Movidas por la energía potencial del agua que acopladas a un alternador, generan energía eléctrica para el abastecimiento localizado.

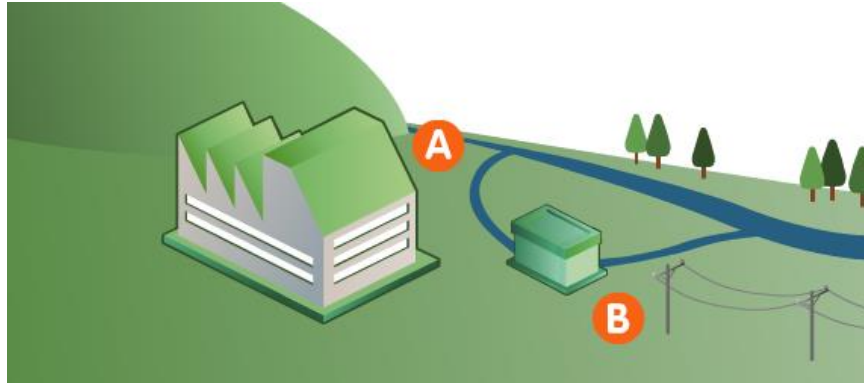


Figura 2. GD - Mini hidráulica [49]

Energía primaria → Agua

Potencia (MW) → 0,01 – 10

Existen dos tipos de centrales mini hidráulicas:

- a. Central de agua fluyente o en derivación: son aquellas en las que parte del agua del río se desvía de su cauce.
- b. Central de embalse o de regulación: se construye una presa en el cauce del río formando un embalse en el cual se almacena el agua necesaria.

✓ **Fotovoltaica:**

Aprovecha la radiación solar para producir energía eléctrica.

Energía primaria → Sol

Potencia (MW) → 0,001 – 0,1



Figura 3. GD – Fotovoltaica [50]

Se basa en la absorción de la radiación solar por parte de un material semiconductor, que constituyen las celdas fotovoltaicas, provocando un desplazamiento de cargas en su interior y originando la generación de corriente continua. La corriente continua se puede convertir en corriente alterna mediante inversores conectados entre el dispositivo de GD y la red eléctrica o carga.

La GD empleando sistemas fotovoltaicos está siendo utilizada, en las casas, edificios o instalaciones comerciales ubicadas en los techos, son consideradas como pequeña instalación, y por otro lado existen plantas fotovoltaicas conectadas a la red en gran escala, la última clase de generación fotovoltaica y conexión a la red, será empleada como caso de estudio para el desarrollo de la presente tesis.

De igual manera se tienen diferentes aplicaciones dependiendo de la clasificación de las redes y en la zona que se pretenda realizar su instalación, a continuación se expondrán algunas de ellas:

- Sus aplicaciones principales son la generación básica y autónoma en zonas rurales si se combina con baterías.
- Suministro de mantenimiento para las telecomunicaciones.
- Iluminación exterior y señalización.

Tiene como ventajas:

- La no presencia de combustible.
- No genera contaminación al medio ambiente durante su operación.
- Adicionalmente es confiable y segura.

Los sistemas de GD eólico y fotovoltaico, tienen un suministro de energía eléctrica inestable ya que dependen de las condiciones atmosféricas. Suministran potencia activa solamente y necesitan una fuente de potencia reactiva en el sistema eléctrico. Se utilizan en lugares alejados y necesitan controlar su funcionamiento en algunas aplicaciones. [9]

Se debe tener en cuenta que las tecnologías de GD pueden ser controlables o no - controlables en cuanto la materia prima que necesitan para operar, estas últimas son aquellas en donde su disponibilidad es incierta (energía eólica, solar, hidráulica, etc) y pueden presentar variaciones en la potencia generada debido a la disponibilidad de los recursos distribuidos.

Por ejemplo para bajos niveles de generación el uso de dispositivos de almacenamiento como Baterías, puede contribuir al sistema para generar balance entre la demanda y suministro de energía. [24]

En la Tabla 2 se consignan las diferentes tecnologías y su clasificación sobre la disponibilidad del recurso necesario para operar, el cual lo llamaremos como seguridad del suministro a corto plazo.

Tabla 2. Clasificación sobre la seguridad del suministro a corto plazo de la GD según su tecnología [24]

TECNOLOGIA GD	PRESENTAN SEGURIDAD EN EL SUMINISTRO A CORTO PLAZO	NO PRESENTAN SEGURIDAD DEL SUMINISTRO A CORTO PLAZO
Convencionales	X	
Micro. Turbinas	X	

TECNOLOGIA GD	PRESENTAN SEGURIDAD EN EL SUMINISTRO A CORTO PLAZO	NO PRESENTAN SEGURIDAD DEL SUMINISTRO A CORTO PLAZO
Cogeneración		X
Pequeñas hidroeléctricas		X
Turbinas eólicas		X
Paneles fotovoltaicos		X
Plantas geotérmicas	X	
Plantas de biomasa	X	
Plantas mareomotriz		X

Si bien para algunas de las tecnologías especificadas en la Tabla 2, no se puede garantizar la continuidad de la energía debido a su fuente de energía como por ejemplo el sol, ya se encuentran y se puede disponer de diferentes sistemas y alternativas que garantizan la continuidad del suministro de energía a los usuarios, estos sistemas son:

- **Gestión eficiente de la energía:** se conoce como el conjunto de acciones orientadas a asegurar el suministro energético a través de la implementación de medidas de eficiencia energética y respuesta de la demanda. [21]
- **Respuesta de la demanda:** consiste en cambios en el consumo de energía eléctrica por parte del consumidor, con respecto a un patrón usual de consumo, en respuesta a señales de precios o incentivos diseñados para inducir bajos consumos. [21]
- **Desafíos técnicos:** Los aspectos técnicos también son tomados en cuenta para garantizar continuidad en el suministro de energía; frente a estas características se deben analizar las siguientes para conservar la estabilidad en la red [47]:

- Sistema de Baterías
- Sistemas de control y manejo inteligentes, que proporcionan un suministro estable, económico y sostenible de la energía.
- Sistemas Híbridos
- Sistemas fotovoltaicos modernos [47]

Teniendo en cuenta las especificaciones relacionadas anteriormente sobre las tecnologías de GD, y las características de la red de distribución operando de manera aislada que será de nuestro interés analizar en el caso práctico, se escogen las tecnologías PCH y Fotovoltaica, con el fin de realizar pruebas de implementación en la red tanto individual como en conjunto, y a diferentes niveles de penetración.

Las dos tecnologías seleccionadas, se acoplan a las necesidades de la red de distribución operando de manera aislada del caso de estudio, y que se considerada como una minigríd, debido a la capacidad de potencia que pueden suministrar, y su alta aplicabilidad en Zonas No Interconectadas para las cuales se pretende contribuir con los resultados del estudio.

2.1.2 Promesas y Desafíos de la Generación Distribuida

Entre las grandes ventajas que conlleva el uso de GD en las redes de distribución actuales, se tiene que es de gran ayuda en horas de alta demanda, ya que se puede tener como reserva y adicionalmente llegar a sitios remotos donde existen restricciones para la red de distribución convencional, entregando así el servicio de energía [25][27].

Lo anterior da mayor tiempo y aplaza las inversiones de infraestructura para Transmisión y Distribución [26] que se deban hacer en el sistema, evitando la elevación de costos, reduciendo las pérdidas de la línea, y difiriendo la construcción de grandes instalaciones de generación [27]; por otro lado la nueva demanda y clientes remotos se puede suplir por medio de la GD.

Adicionalmente la GD brinda fiabilidad a la red, ya que ante eventos y fallas presentadas en la red de distribución y que provoquen su desconexión, la GD continuará con el servicio de energía eléctrica alimentando la porción de red conectada a esta. Causando que el sistema no sea tan vulnerable ante contingencias [25] [27].

Como se mencionó en el ítem anterior las diferentes tecnologías de la GD emplean recursos renovables y por lo tanto puede ser considerada como un importante contribuidor de la disminución ante impactos ambientales [25] [27], ya que debido a su diversificación y ubicación dispersa, se presta para implementar diferentes tipos de recursos distribuidos y por lo tanto aumenta los beneficios para la sociedad y el medio ambiente, generando desarrollo sostenible y disminuyendo las emisiones de los gases de efecto invernadero. [12].

Del mismo modo en que la GD presenta múltiples beneficios para el sistema y los usuarios finales, también se deben considerar otro tipo de factores relevantes que se deben estudiar, reforzar y desarrollar para la implementación de la GD en la red de distribución actual sin causar traumatismos. A continuación se exponen algunos de esos puntos a evaluar:

- Con el fin de no generar comportamiento indeseados en el sistema y que afecten la calidad del suministro de energía, se debe fomentar el desarrollo de la normativa adecuada que incentiven la GD [26], en cuanto el tipo de tecnología a utilizar y las condiciones técnicas que se deben garantizar para obtener un correcto funcionamiento calidad del servicio, ya sea de manera aislada o en interconexión [27].
- En Colombia actualmente se desarrolla la Ley 1715 cuyo objetivo principal se basa en el uso de energías renovables. De igual manera para obtener un sistema confiable y seguro, se debe garantizar su gestión y control para lo cual es de vital importancia contar con un buen sistema de comunicaciones y medida avanzada para el control y programación [26].
- Se debe tener presente que debido a todas las inversiones que se deben realizar con el fin de garantizar un sistema seguro, se pueden llegar a presentar altos

costos sobre la inversión inicial en la implementación de GD, como consecuencia al gran porcentaje de los riesgos tecnológicos, ya que muchos de ellos aún están en etapa de investigación con un alto costo asociado. [27] [12]

- Por otro lado, se deberán analizar más a fondo algunos impactos tecnológicos que conlleva la GD, ya que presenta cambio de flujos de potencia en la red (flujos bidireccionales), lo que altera las condiciones de corto circuito en la red provocando que se deba pensar en diferentes sistemas de protección. [19]

Teniendo en cuenta las ventajas y desafíos de la GD, en la Figura 4 se hace un resumen sobre las consideraciones que se deben tener presentes ante la implementación de la GD en la red de distribución actual.

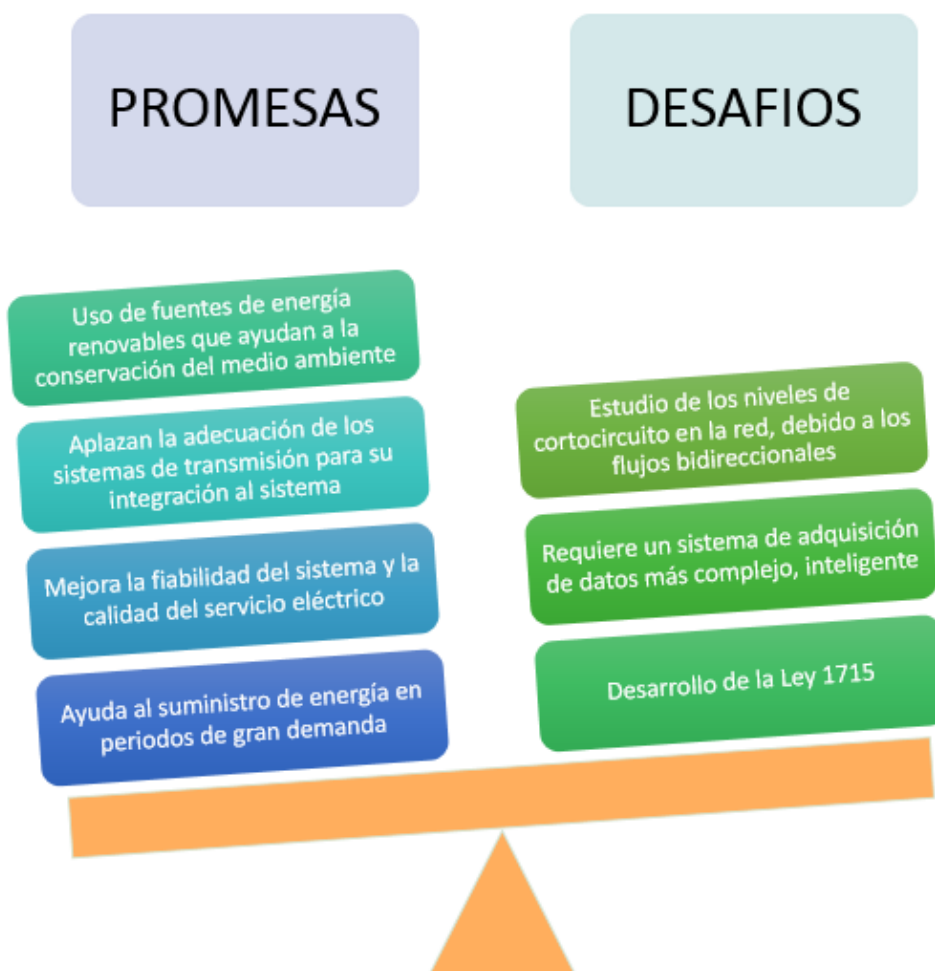


Figura 4. Promesas y Desafíos de la Generación Distribuida.

De la Figura 4 donde se consignaron las promesas y desafíos de la GD, es de notar que aunque se presentan temas en los cuales se tiene que estudiar un poco más y hacer una evaluación rigurosa, son más las ventajas que traería su implementación tanto para el sistema y los usuarios finales como para el medio ambiente, obteniendo un sistema confiable y brindando suministro de energía a población que hoy no la puede tener, por los altos costos de infraestructura.

2.1.3 Aplicaciones de la Generación Distribuida

Las principales aplicaciones de la GD, se basan en su eficiencia de entrega de energía, confiabilidad y suministro en zonas aisladas, estas funciones son especificadas a continuación:

- a) **Generación:** la GD trabajando en modo interconectado con el sistema eléctrico de potencia, utiliza su generación de energía básica para proveer una parte de su energía a la red y contribuir a está mejorando los niveles de tensión del SEP por medio del aumento de nivel de tensión, esto ayuda a reducir las pérdidas de potencia y mejorar la calidad de energía. [25]
- b) **Demanda en horas pico:** En un sistema de potencia variable en cuanto a la generación - consumo y la curva de demanda que se presenta diariamente (horas picos y valles), existe la GD la cual tiene la capacidad de contribuir fuertemente cuando el sistema está al tope es decir en horas picos, para estos casos se tiene la posibilidad de inyectar más potencia a la red que proveniente de la GD, minimizando el desequilibrio entre generación y demanda y adicionalmente reduciendo los costos a los usuarios finales. [19] [26]
- c) **Capacidad de reserva:** para cumplir con la confiabilidad del sistema, se debe estar preparado ante contingencias en el SEP, para lo cual la GD tiene la capacidad de almacenamiento de energía y suministrarla cuando se presenten eventos en la red de distribución que generen su desconexión, garantizando así la continuidad del servicio y también la capacidad de seleccionar las cargas más importantes como hospitales o industrias para prestar el servicio. [1] [19]

- d) Funcionamiento en zonas aisladas, rurales o de difícil acceso:** Debido a la existencia de zonas aisladas del SEP o de difícil acceso y con problemas técnicos, hace que no sea posible su alimentación por medio de la red de distribución, por lo cual se ven obligados a la utilización de otro tipo de fuentes de energía, para ello contribuye la GD, quien puede suplir la demanda de estas zonas y poder tener aplicaciones como la iluminación, calefacción, comunicación, pequeños procesos industriales, etc. [25]

2.1.4 Impacto de la Generación Distribuida sobre la Red de Distribución

Teniendo en cuenta que la GD tiene la posibilidad de ser conectada directamente a los clientes o al sistema eléctrico de potencia (SEP), se debe garantizar su correcta funcionalidad cumpliendo con los requisitos necesarios que permitan brindar el servicio con confiabilidad y calidad en cualquiera de los 2 escenarios de operación.

Por lo descrito anteriormente, en este capítulo se analizará el impacto que puede ocasionar la GD en las redes de distribución a las cuales se conecta, tomando como principal referente las siguientes características:

- a)** Corrientes de cortocircuito presentadas en la red de distribución con GD.
- b)** Servicios complementarios en la red de distribución con GD como: regulación de frecuencia, potencia, arranque autónomo, control tensión, reactivos en la red.
- c)** Pérdidas en la red de distribución con GD.
- d)** Operación y explotación de red de distribución con GD.
- e)** Seguridad del personal de mantenimiento con GD activa en la red de distribución.
- f)** Incentivos a las tecnologías de GD para su desarrollo (mecanismos regulatorios: primas, tarifas, certificados verdes).

Con el fin de obtener mayor comprensión sobre los impactos de la GD en la red de distribución se analizarán cada uno de los ítems mencionados anteriormente:

a) Corrientes de cortocircuito presentadas en la red de distribución con GD:

- Debido a la penetración de GD, se generan alteraciones en cuanto a las corrientes de corto circuito en el sistema de distribución, lo que se ve reflejado como grandes cambios en el sistema de protecciones de la red. [12]
- Las condiciones para ajustar los sistemas de protección, se ven afectadas ya que la red de distribución donde se va a instalar la GD dejará de ser un sistema radial, lo cual implicará cambios de las características de protección y aumentará la complejidad de la operación del sistema.
- Cuando se tiene una falla en la nueva configuración que presentará el sistema con GD, esta falla será alimentada por la subestación de la que estaba normalmente conectada y por otro lado también verá aportes de la nueva GD conectada en la red. “En algunos casos circulan corrientes de falla por tramos de la red donde no ocurre la falla.” [19] [12]

b) Servicios complementarios en la red de distribución con GD como: regulación de frecuencia, potencia, arranque autónomo, control tensión, reactivos en la red.

Los beneficios principales en la implementación de la GD en la red de distribución son:

- Aumento en la calidad de la onda eléctrica, mediante su estratégica localización y las características de la energía inyectada a la red. [9]
- Brinda estabilidad al sistema, ya que se puede utilizar como suministro de reserva de la energía necesaria en caso de eventos que causen desconexión del SEP. [9]

- Incrementa la seguridad y fiabilidad para las cargas más importantes del sistema. Esto se ve reflejado con el aumento de la calidad de la onda eléctrica. [9]

Sin embargo, existen posibilidades de no obtener los resultados esperados con la implementación de la GD, sobre todo si no se tiene una adecuada planificación, diseño y ubicación de la conexión a la red, se pueden generar problemas, tales como:

- Aumento de las pérdidas en la red de distribución, que inducen a mayores costos de explotación de la red para la empresa distribuidora.
- La conexión de la GD al SEP puede causar la inyección y propagación de armónicos en las señales de tensión y corriente, y otros tipos de perturbaciones. Estas perturbaciones en la red, dependen de la fuente de generación empleada, máquinas rotativas, inversores, variadores de velocidad y los elementos de interconexión con el SD. [9] [19]
- Presencia de huecos de tensión y sobretensiones. Al inyectar potencia activa por parte de la GD a la red de distribución se genera aumento de tensión donde se conectan. Este comportamiento altera las condiciones del sistema el cual está diseñado para flujos unidireccionales. [9] [15] [19] [12]
- La inyección de reactivos en el mismo punto donde se conecta la GD, esto es con el fin de lograr la normalización de la tensión. Debe ser aproximadamente el doble de la potencia activa inyectada por la GD, por lo cual se debe pensar en diferentes mecanismos de regulación de tensión, como la compensación pasiva, cambiadores de tomas en carga de transformadores, entre otros. [15] [19]
- Funcionamiento de manera aislada para sectores de la red de distribución. [13]

- Efectos contrarios sobre el comportamiento inicialmente previsto en los flujos de potencia. [9] [15]
- El uso de la tecnología GD – Eólica, y sus dispositivos electrónicos necesarios para operar, influyen en la calidad de potencia eléctrica generada. El viento es la fuente para crear energía, siendo variable y causando oscilaciones en el par y la potencia que se transmiten a la red. [19]

c) Reducción de pérdidas en la red de distribución con GD:

Uno de los beneficios en cuanto a pérdidas que trae el uso de GD, es contribuir en su minimización debido a la no utilización de redes de distribución y transmisión. Esto se logra por medio de la ubicación estratégica de los sistemas GD ya que se aprecia una disminución en el flujo de potencia lo que conlleva a la reducción de pérdidas energéticas y una mejora en el perfil de tensiones.

“La reducción de las pérdidas en el transporte y distribución de energía eléctrica aumenta la capacidad de distribución de la red eléctrica.” [9]

De acuerdo a las características de la GD en cuanto al tamaño y su ubicación en la red de distribución, se puede lograr una reducción significativa de las pérdidas. [19]

d) Operación de la red de distribución con GD:

La GD también ofrece beneficios en cuanto a la operación de la red de distribución:

- La GD tiene la posibilidad de ayudar con el suministro de energía a la demanda en horas pico y en los programas de gestión del consumo.

- Igualmente, puede contribuir en la confiabilidad y continuidad del sistema, debido a los diferentes puntos de la red donde se pueden instalar dichas tecnologías. No operan únicamente centralizada.
- Permite flexibilidad dentro del sistema eléctrico de distribución, teniendo en cuenta características como el tamaño y la localización en el sistema.
- Ya que los sistemas de GD son modulares, implica una instalación sencilla y en un corto período de tiempo. Además, proporciona una gran ventaja en el funcionamiento y en el mantenimiento del sistema, así como en la flexibilidad de su capacidad total, aumentando o disminuyendo el número de módulos. [9]

e) **Seguridad del personal de mantenimiento con GD activa en la red de distribución:**

La seguridad del personal de mantenimiento que está atento para el restablecimiento de las redes ante eventos que generen desconexión de la misma, debe contar con:

- Personal capacitado sobre el funcionamiento de la GD, y que conozca hasta qué punto de la red puede estar energizado el sistema mediante esta nueva alternativa de generación.
- Marcación en campo de las redes y sus posibles límites de energización.
- Tener la dotación necesaria y elementos que le permitan verificar presencia o ausencia de tensión para poder maniobrar la red.
- El personal que los dirige, es decir los operadores de centro de control, deben contar con las herramientas suficientes que les permita identificar que zonas estas alimentadas o no, y poder guiar con mayor seguridad a los grupos de mantenimiento en la red de distribución.

f) **Incentivos a las tecnologías de GD para su desarrollo (mecanismos regulatorios: primas, tarifas, certificados verdes).**

La GD contribuye de manera significativa en el uso de energías renovables con los cuales se reduce la emisión de contaminantes al medio ambiente. Con este tipo de sistemas, que emplean diferentes tecnologías de GD, los tipos de recursos energéticos y combustibles utilizados están diversificados. Por lo tanto, no hay más interés por un cierto tipo de combustible que por otro [9]

Las normas y regulaciones deben tener en cuenta incentivos para realizar el control de tensión en la red de distribución debido al ingreso de la GD, y garantizar calidad de tensión. [15]

Con el fin de evitar los problemas descritos y poder alcanzar todos los beneficios tanto técnicos como económicos que brinda la GD, es necesario realizar un estudio riguroso, una correcta planificación y gestión adecuada, adicionalmente tener en cuenta las características de los sistemas GD a implementar y el porcentaje de penetración en la potencia de la red, la tecnología y topologías a emplear, así como determinar el tamaño y ubicación de puntos óptimos.

Debido a esto y teniendo en cuenta los impactos que conlleva la implementación de GD, los cuales fueron descritos anteriormente, se debe definir una reglamentación clara y eficiente para el uso de GD, con el fin de garantizar su confiabilidad en la red y calidad del servicio que se entregará a los usuarios. Por lo tanto en la siguiente sección se expone la normativa, estándares y leyes que se debe tener presente ante la implementación de GD considerando normativas internacionales como nacionales.

2.2 Estándar IEEE 1547:

Teniendo en cuenta que cada vez aumenta en mayor porcentaje la adopción de GD con recursos energéticos distribuidos y que su proyección hacia el futuro es una tendencia exponencial, se debe contar y adquirir un conjunto de normas que guíen su implementación

en la red de distribución convencional y que proporcionen los lineamientos necesarios para cumplir con la fiabilidad, seguridad y costo en el sistema.

Por lo tanto surge la Norma IEEE Std 1547 2003, la cual es definida como una norma para interconectar recursos distribuidos con el SEP, su definición en Ingles corresponde a: *“Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems.”*

En este estándar se especifican los siguientes requerimientos técnicos mínimos, para la correcta conexión y operación al SDL:

- ✓ Requerimientos de tensión
- ✓ Requerimientos de frecuencia
- ✓ Requerimientos de reconexión
- ✓ Requerimientos de calidad de la potencia
- ✓ Requerimientos para la sincronización
- ✓ Coordinación de protecciones
- ✓ Compra y venta de energía de unidades de GD

Como complemento al estándar IEEE 1547, surgen a través del tiempo otras normas complementarias con el fin de abarcar más temas y dar claridad sobre la normativa inicial, estas normas complementarias se presentan a continuación:

- **IEEE 1547.1** publicada en 2005: describe las pruebas de interconexión con el fin de determinar si se ajusta o no a la norma.

Esta norma especifica el tipo, la producción y las pruebas de puesta en servicio que se realizan para demostrar que las funciones de interconexión y los recursos distribuidos cumplen con los requisitos de la norma IEEE 1547. Los procedimientos de las pruebas son necesarios para establecer y verificar el cumplimiento de dichos requisitos, de igual manera deben ser flexibles para dar cavidad a cualquier tecnología de recursos distribuidos. [38]

- **IEEE 1547.2** publicado en 2008: ofrece una formación técnica en el estándar.

Esta guía proporciona antecedentes y detalles de aplicaciones técnicas con el fin de aportar en la comprensión de la norma IEEE 1547. Facilita el uso de norma mediante la caracterización de las diversas tecnologías de recursos distribuidos y las cuestiones de interconexión asociadas a estos, incluye también los antecedentes y la justificación de los requisitos técnicos acerca de la operación de la GD interconectada con el SEP. [38]

- **IEEE 1547.3** publicado en 2007: detalla las técnicas para el control de los sistemas distribuidos.

Este documento proporciona directrices para el seguimiento, intercambio de información, interoperabilidad y control para GD interconectadas con el SEP, también se describe la funcionalidad, parámetros y metodologías para el monitoreo, intercambio de información y control de la GD interconectada.

En cuanto a las tecnologías de GD, se incluye sistemas como: la energía fotovoltaica, eólicas, micro turbinas, otros generadores distribuidos y sistemas de almacenamiento de energía. [38]

- **IEEE 1547.4** publicado en 2011: es una guía para el diseño, la operación y la integración de los recursos distribuidos en sistemas aislados con SEP.

Esta guía, proporciona diferentes enfoques y buenas prácticas para el diseño, la operación y la integración de los sistemas aislados de GD con el SEP, teniendo la capacidad de separarse y volverse a conectar a una parte del SEP mientras que proporciona energía a los SEP en modo isla. [39]

- **IEEE 1547.5** está diseñado para fuentes distribuidas mayores a 10 MVA

Da directrices sobre los requisitos técnicos, incluyendo el diseño, construcción, puesta en servicio pruebas de aceptación y mantenimiento, para la interconexión de las fuentes de energía eléctrica despachables con una capacidad mayor a 10 MVA a una red de transmisión. [39]

- **IEEE 1547.6** publicada en 2011: describe las prácticas de interconexiones de redes secundarias.

Da recomendaciones sobre criterios, requisitos, pruebas, y proporciona orientación para la interconexión de los tipos de sistemas de distribución de la red secundaria del área del SEP con recursos distribuidos, que proporcionan la generación de energía eléctrica en SEP locales; también incluye el funcionamiento, las pruebas, las consideraciones de seguridad y mantenimiento de la interconexión. [39]

- **IEEE 1547.7** publicado en 2013: ofrece estudios del impacto en distribución para la interconexión de recursos distribuidos.

Describe los criterios, el alcance, la metodología y los estudios de ingeniería sobre el impacto en el área del SEP debido a un recurso distribuido o estos interconectados a un SEP.

Como se vio en cada una de las guías pertenecientes a la norma IEEE 1547, es importante conocer las especificaciones técnicas y requisitos necesarios ante los recursos distribuidos y el SEP, las cuales se consignan en la siguiente tabla:

Tabla 3. Especificaciones técnicas y requisitos de la norma IEEE 1547. [39]

<i>Requisitos y especificaciones técnicas</i>	
<i>Requisitos Generales</i>	Regulación de Tensión
	Sincronización
	Integración con el SEP
	Energización inadvertida del SEP
	Monitoreo y control
<i>Respuesta del SEP antes condiciones anormales</i>	Fallas en el área del SEP
	Frecuencia
	Tensión
	Pérdida de sincronismo
	Coordinación de re cierre
	Reconexión al SEP

Requisitos y especificaciones técnicas

<i>Modo Isla</i>	Aislar el sistema de manera no intencional
	Aislar el sistema de manera intencional
<i>Calidad de la Potencia</i>	Limitación de inyección DC
	Limitación de los flickers de tensión inducida por los recursos distribuidos
	Armónicos

A continuación se exponen las normas técnicas nacionales e internaciones que contribuyen en los requisitos necesarios para la implementación de la GD, y que se deben tener en cuenta para el estudio de las redes de distribución operando interconectadas con GD o la GD operando de manera aislada.

Normas Técnicas Nacionales e Internacionales para la Generación Distribuida:

En las Figuras 5 y 6 se especifican las normas técnicas internaciones sobre la GD, correspondiente a IEC e IEEE que han sido revisadas y aprobadas, de igual manera se da una breve descripción sobre sus objetivos y aplicabilidad principal.

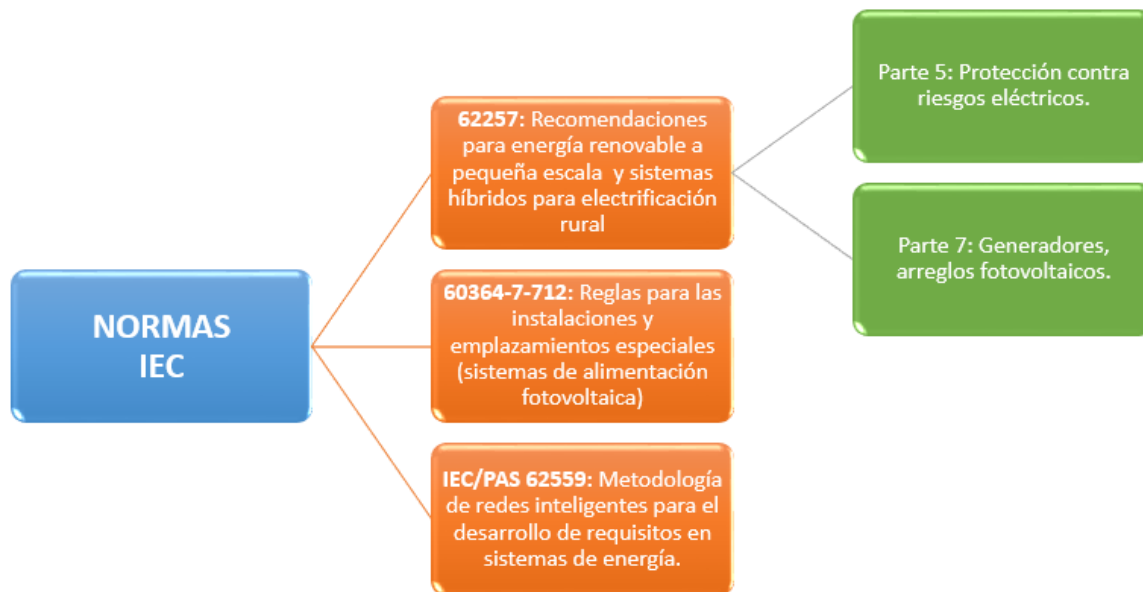


Figura 5. Normas IEC – Generación distribuida.

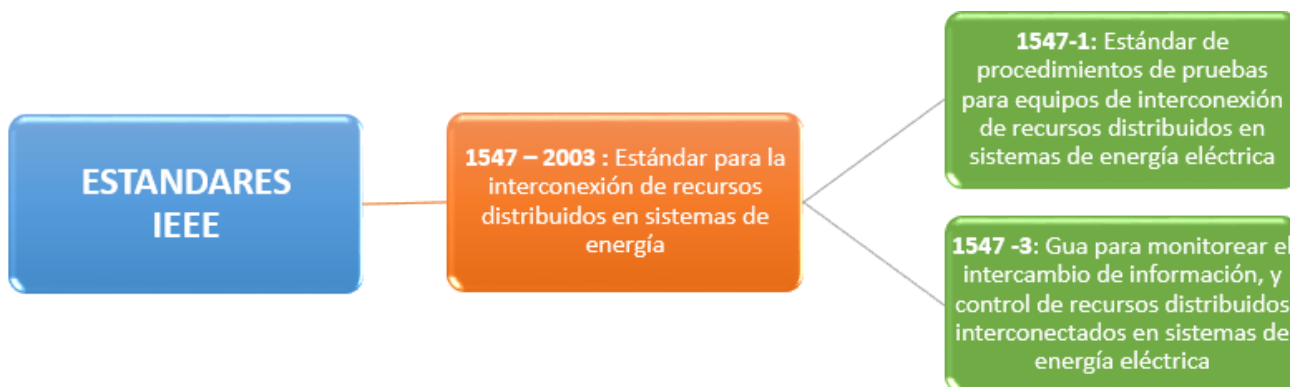


Figura 6. Estándares IEEE– Generación distribuida.

En la Figura 7, se consignan todas las normas Colombianas que se deben complementar y actualizar teniendo en cuenta la participación de la GD en la red de distribución actual, con el fin que los usuarios que pretendan realizar su propia implementación de GD, puedan certificarse y cumplir con la normativa necesaria:



Figura 7. Complemento a la normatividad nacional – Generación Distribuida.

En la Tabla 4, se consignan algunas diferencias y semejanzas entre la normativa IEEE e IEC referenciada anteriormente, respecto a la generación distribuida:

Tabla 4. Comparación normativa IEEE e IEC frente a la generación distribuida. [51 al 54]

ITEM	NORMATIVA – TABLA COMPARATIVA	
	IEEE	IEC
Objetivos	<p>La norma IEEE 1547 del 2003, tiene como objetivo verificar los requerimientos para conexión en el PCC de la fuente Generación Distribuida:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tensión • Frecuencia • Reconexión • Calidad de la potencia • Sincronización • Coordinación de protecciones • Compra y venta de energía de unidades de GD 	<p>La norma IEC 62.257-1 de 2013: da una metodología para la implementación de la electrificación rural utilizando pequeños sistemas de energía renovable híbridos autónomos. Proporciona las herramientas adecuadas para la gestión de proyectos de electrificación rural, así como:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hacer más fácil el trabajo de los desarrolladores de proyectos • Mejorar la calidad de los sistemas y el servicio prestado. • Mejorar la seguridad de los sistemas. • Proporcionar especificaciones técnicas básicas para los componentes y sistemas. <p>La norma IEC 60364: Indica los requisitos particulares y que son aplicables a las instalaciones eléctricas de la energía fotovoltaica, los sistemas de suministro de energía, incluyendo sistemas con módulos de AC.</p>

ITEM	NORMATIVA – TABLA COMPARATIVA	
	IEEE	IEC
Consideraciones básicas de la normativa	<p>La GD debe mantener los perfiles de tensión y sus límites, entre lo establecido por la norma ANSI C84.1.</p> <p>También deberá contar con un sistema de protección y medida, con el cual se pueda regular la frecuencia y la tensión en el PCC.</p>	<p>Cuando la tensión y la frecuencia de la instalación se desvían por fuera de las condiciones específicas de los sistemas fotovoltaicos deberá dejar de energizar la línea. IEC 61727</p>
	<p>La Unidad de GD debe sincronizar con el SEP sin causar fluctuaciones en el PCC + - 5% del voltaje operativo.</p>	<p>El sistema de recursos distribuidos debe operar en sincronismo con el sistema de distribución.</p>
	<p>Los recursos distribuidos y su sistema interconectado no deberá inyectar corrientes DC mayores al 0.5 % de la corriente de salida total del PCC.</p>	<p>El sistema de recursos distribuidos no debe inyectar corrientes DC mayores al 1% de la corriente nominal de salida del inversor hacia la interconexión AC del sistema bajo condiciones de operación.</p>
	<p>Las instalaciones de GD no deberán crear distorsiones desagradables a los usuarios en el área del SEP.</p>	<p>La operación del sistema de recursos distribuidos no debe causar distorsiones de tensión excediendo los límites establecidos.</p>
	<p>Se debe contar con un equipo de monitoreo, para la potencia activa en el PCC y dependiendo la tecnología de GD que se pueda medir de igual manera la potencia reactiva.</p>	<p>Deberá contar con un sistema de protección y medida con el cual se pueda regular la frecuencia y la tensión en el PCC.</p>
Normativa de apoyo	<ul style="list-style-type: none"> • IEEE 1547.1 de 2005 • IEEE 1547.2 de 2008 • IEEE 1547.3 de 2007 • IEEE 1547.4 de 2011 • IEEE 1547.5 de 2011 • IEEE 1547.6 de 2011 • IEEE 1547.7 de 2013 	<ul style="list-style-type: none"> • IEC 61727 • IEC 62257 • IEC 60364-7-712

En la siguiente sección se presentará la normativa que surgió en Colombia debido a la inclusión de GD en los últimos años, y en la que es de vital importancia aclarar todos los temas técnicos para cumplir con la calidad de energía requerida por los usuarios finales, evitando así que se presenten inconvenientes frente a su implementación.

2.3 LEY 1715 de 2014

Con la aprobación de la Ley 1715, se presentan una serie de desafíos en lo referente a energías alternativas y eficiencia energética, tales como:

- ✓ Reglamentación simple, clara y eficiente de la ley.
- ✓ Iniciar desarrollo de proyectos.
- ✓ Desarrollar empresas de servicios energéticos.
- ✓ Lograr entorno normativo para generar transferencia de tecnología y de conocimiento.
- ✓ Mejorar la percepción y la imagen en el uso de estas energías en la ciudadanía y autoridades regionales en general y en el sector financiero en particular.
- ✓ Priorizar su uso en las Zonas No interconectadas.
- ✓ Fomentar el desarrollo de proyectos ya identificados en el transporte, la industria, el comercio, sector rural, alumbrado público y sector residencial.
- ✓ Priorizar su uso para abaratar la factura energética y mejorar la competitividad de las empresas consumidoras. [4]

Para poder llevar a cabo los desafíos anteriormente especificados, se hace necesario que exista un compromiso por parte del sector público y privado, con el fin de promover una campaña permanente de eficiencia energética y el compromiso por parte de CCEnergía para la participación en los talleres de la UPME, la CREG y el Ministerio, con el fin de ejecutar exitosamente la Ley 1715 y obtener los múltiples beneficios que ofrece la misma.

Es de nuestro interés realizar los análisis respectivos en la operación de redes de distribución operando en modo isla, con el fin de dar cumplimiento a lo especificado por la Ley 1715 y contribuir al desarrollo científico, económico y sostenible del país.

LEY 1715 DE 2014: Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional.

Objetivo: La ley tiene por objeto promover el desarrollo y la utilización de las fuentes no convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovable, en el sistema

energético nacional, mediante su integración al mercado eléctrico, su participación en las zonas no interconectadas y en otros usos energéticos como medio necesario para el desarrollo económico sostenible, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la seguridad del abastecimiento energético. Con los mismos propósitos se busca promover la gestión eficiente de la energía, que comprende tanto la eficiencia energética como la respuesta de la demanda. (LEY 1715, 2014)

Finalidad de la ley: La finalidad de la ley es establecer el marco legal y los instrumentos para la promoción del aprovechamiento de las fuentes no convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovable, lo mismo que para el fomento de la inversión, investigación y desarrollo de tecnologías limpias para producción de energía, la eficiencia energética y la respuesta de la demanda, en el marco de la política energética nacional. [21] [22]

Para la implementación de la Ley 1715 se debe tener en cuenta la participación de la GD con las fuentes de energía renovables existentes.

Como se especificó anteriormente, una de las actividades que conforman el objetivo general de la ley 1715, corresponde a contribuir en las zonas no interconectadas (ZNI) por medio de la partición de GD, logrando así la mejora de las necesidades básicas y muchos más aspectos relevantes que estas zonas presentan, por lo cual se explica a continuación las implicaciones que conlleva la implementación de la GD en dichas zonas.

Se debe tener en cuenta que la aplicación de la GD en las ZNI, es un punto a favor que se puede obtener de este recurso después de realizar el análisis respectivo y comprobar los múltiples beneficios que trae a los usuarios finales, ya que se comportarían como zonas aisladas, las cuales son del interés de este documento.

Zonas No Interconectadas y la Generación Distribuida

Debido la integración de las minigríd con la GD, se deben realizar múltiples estudios tanto de la estabilidad de tensión (objeto de nuestro estudio) como de frecuencia, operando

conectada al SEP, de esta manera se ayuda a definir cuáles serían las afectaciones o las ventajas que se presentarían en la SEP debido a la penetración de este nuevo sistema y la GD.

Para lo cual se debe reforzar la condición en modo isla, y obtener resultados mediante estudios, análisis y simulaciones de la GD cumpliendo con la operación, límites de estabilidad y calidad del servicio, para suministrar la energía a los usuarios finales, ya que ante contingencias en la red estas serían el respaldo del sistema.

Por otro lado, si se logra tener unos lineamientos claros sobre la operación de la minigríd operando en modo isla, se puede contribuir en la prestación de servicio para la gran cantidad de Zonas no Interconectadas que se presentan en Colombia, Figura 8:



Figura 8. Zonas no Interconectadas en Colombia [20]

Colombia tiene las siguientes características en cuanto a las zonas no interconectadas:

32 departamentos hacen parte de la ZNI.

52% del territorio nacional.

Las Características del Zonas No Interconectadas son:

- Necesidades Básicas insatisfechas (NBI) mayores al 77%.
- Baja densidad poblacional (zonas dispersas).
- Bajo nivel de consumo promedio.
- Baja capacidad de pago.
- Altos costos de prestación del servicio de energía eléctrica.
- Bajo nivel de micro medición.
- Baja capacidad de gestión empresarial [20]

Teniendo en cuenta todas estas características de la ZNI, y la GD se puede concluir entonces que es conveniente la realización y el análisis del estudio y comportamiento de una red operando de manera aislada ya que esto servirá como insumo para su implementación en las ZNI y alejadas del sistema eléctrico nacional.

3. Capítulo 3

3.1 Estabilidad en el Sistema Eléctrico de Potencia

La estabilidad de un sistema de potencia puede ser definida como la propiedad que permite permanecer en estado estable al sistema, es decir, operando de manera equilibrada frente a condiciones normales de cargas y poder recuperar su estabilidad después de encontrarse bajo contingencias [30].

Se debe tener en cuenta que los sistemas de potencia son sistemas dinámicos incluso bajo condiciones normales de operación [29]. Esto debido a que en los sistemas de potencia se presentan diferentes cargas que son conectadas y desconectadas como clientes residenciales, comerciales, y los procesos de la industria, variando según sus necesidades, lo anterior genera que la estabilidad de un sistema de potencia en la teoría no se pueda observar de la misma manera que en la práctica, si no en un porcentaje de aproximación muy cercano [29].

La estabilidad de un sistema de potencia se clasifica en tres categorías

- Estabilidad de Ángulo
- Estabilidad de Frecuencia
- Estabilidad de Tensión

Dicha clasificación permite una mayor comprensión de los problemas que se puedan presentar en el SEP, en la Figura 9 se encuentra la explicación sobre las características de cada una de las categorías.



Figura 9. Análisis De Estabilidad En Un Sistema De Potencia

La estabilidad de ángulo está involucrada con: La máquina síncrona, Relación de Potencia – Ángulo, Estabilidad transitoria, pequeña señal, Oscilaciones. [30].

La estabilidad de frecuencia está relacionada con: Corto y Largo tiempo, Esquema de deslastre Automático de Carga (EDAC), Inercia, Regulación primaria y secundaria, Control Automático de Generación (AGC) [28]. La estabilidad de frecuencia está ligada a la capacidad del SEP para mantener de potencia entre la generación y la demanda, con el fin de conservar los valores de frecuencia nominales. [29]

La estabilidad de tensión está ligada a: Demanda de potencia reactiva, Grandes y pequeñas perturbaciones [30], SVC, Compensación, Generadores, Variaciones de carga, Taps. [28]

El interés de este documento es analizar y realizar los estudios y simulaciones con el fin de determinar el comportamiento frente a la estabilidad de tensión en la minigríd, por lo cual en la sección 3.2 se abarcará más a fondo el concepto de estabilidad de tensión y todos los elementos que la componen, lo cual servirá como insumo para el desarrollo del caso práctico.

3.1.1 Análisis del Sistema Eléctrico de Potencia

Existen diferentes razones por las cuales se quiera realizar un análisis sobre el sistema eléctrico de potencia, lo cierto es que siempre se deberá realizar un planeamiento operativo del sistema a largo, mediano y corto plazo, para esto se requiere conocer diferentes variables que ayudarán a obtener un modelo más preciso como son: la Demanda, la Topología de la red, la Generación y la Normativa.

Los procedimientos que se deben seguir para realizar una buena evaluación al SEP comprende los siguientes análisis: Estacionario, Transitorio y Dinámico, obteniendo como resultado todas las condiciones u alteraciones a las que puede estar sometido el sistema, algunos ejemplos son: límites de tensión, necesidades de compensación, tiempo de despeje de fallas, control de generación para regulación primaria y secundaria, entre otros. [28]

- **Análisis de Estado Estacionario:** el objetivo de este análisis es establecer los límites de seguridad para los SEP, en los cuales el sistema tiene una respuesta adecuada y aceptable de todos sus elementos como en generación, detectar problemas de regulación de voltaje, sobrecargas de las líneas y transformadores asociados. [28]
- **Análisis de Estado Transitorio:** Este análisis evalúa el periodo correspondiente a la contingencia, en el cual se pueden apreciar las variaciones en las variables del

sistema y que pueden llevar a inestabilidad del mismo, afectaciones de variables como: voltaje, corriente, potencia y frecuencia.

Algunos ejemplos de las perturbaciones que generan el estado transitorio son: Un aumento brusco de la carga, fallos en el sistema, desconexión de un circuito de líneas en paralelo, o por la combinación de un fallo y de aislamientos por desconexión de parte del sistema [31].

- **Análisis de Estado Dinámico:** Corresponde a una representación lineal de los elementos en torno a una condición de operación específica [28]. Tiene que ver con el análisis de la evolución de las trayectorias del sistema a partir de una condición inicial. [32]

En la Figura 10 se ilustra mejor las características de los análisis requeridos en el sistema eléctrico de potencia:

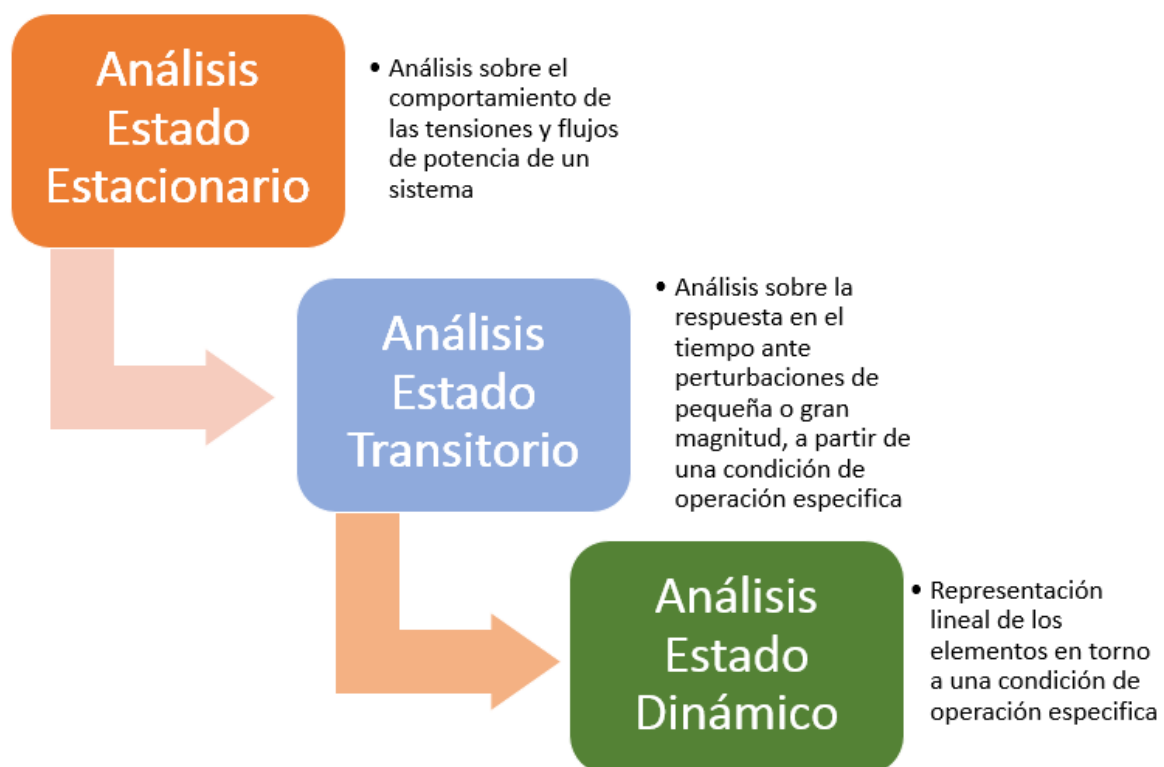


Figura 10. Análisis Estacionario, Transitorio y Dinámico de un SEP.

Se deben tener en cuenta los siguientes puntos para los cuales el SEP debe conservar la estabilidad:

- ✓ Ante la presencia de una falla en el sistema, la cual es despejada por la protección principal del elemento afectado y asumiendo la salida permanente de este, el SEP deberá continuar con estabilidad.
- ✓ Los elementos de protección deben ser selectivos ante el despeje de fallas, esto con el fin de no ocasionar salida de elementos adicionales y por lo tanto eventos en cascada.
- ✓ “En las barras principales del sistema, la tensión transitoria no debe estar por debajo de 0,8 p.u. durante más de 500 ms” [28].

3.2 Generalidades Estabilidad De Tensión

El buen funcionamiento de todos los equipos eléctricos conectados a la red y la calidad del servicio que se esté entregando, depende en gran proporción de un adecuado nivel de tensión, esto contribuye a que uno de los servicios complementarios más importante que tiene el operador del sistema es el control tensión-reactiva, que tiene como objetivo principal conseguir un nivel de tensión cerca de los nominales y la optimización de los flujos de reactiva en la red. [15]

Es de gran importancia garantizar el control de tensión, ya que con esto se generarán condiciones estables de operación para el sistema y se proporcionará buena capacidad de transferencia de potencia; adicionalmente cuando se presenten altos niveles de tensión en la red puede incurrir en el daño de equipos de potencia, como transformadores e interruptores, y cuando por el contrario se presentan bajos niveles de tensión se dañan los equipos de los usuarios finales como motores [28].

Se debe tener en cuenta que, el control de tensión realizado en niveles de tensión más altos, tiene mayor impacto que los realizados en niveles de tensión menores.

Los elementos de control empleados con el fin de optimizar los flujos de potencia y los niveles de tensión para la red de distribución del SEP son: Transformadores, Generadores, Capacitores, Líneas, y para la red operando de manera aislada son la GD y la reducción de demanda [11] [15], en el anexo B se da una explicación más profunda a cerca de cada uno de estos elementos.

En la Figura 11 se puede apreciar un resumen sobre como es el comportamiento (Entrega y Absorción) de la potencia reactiva, dependiendo del equipo de potencia utilizado y como puede contribuir en el control de tensión.

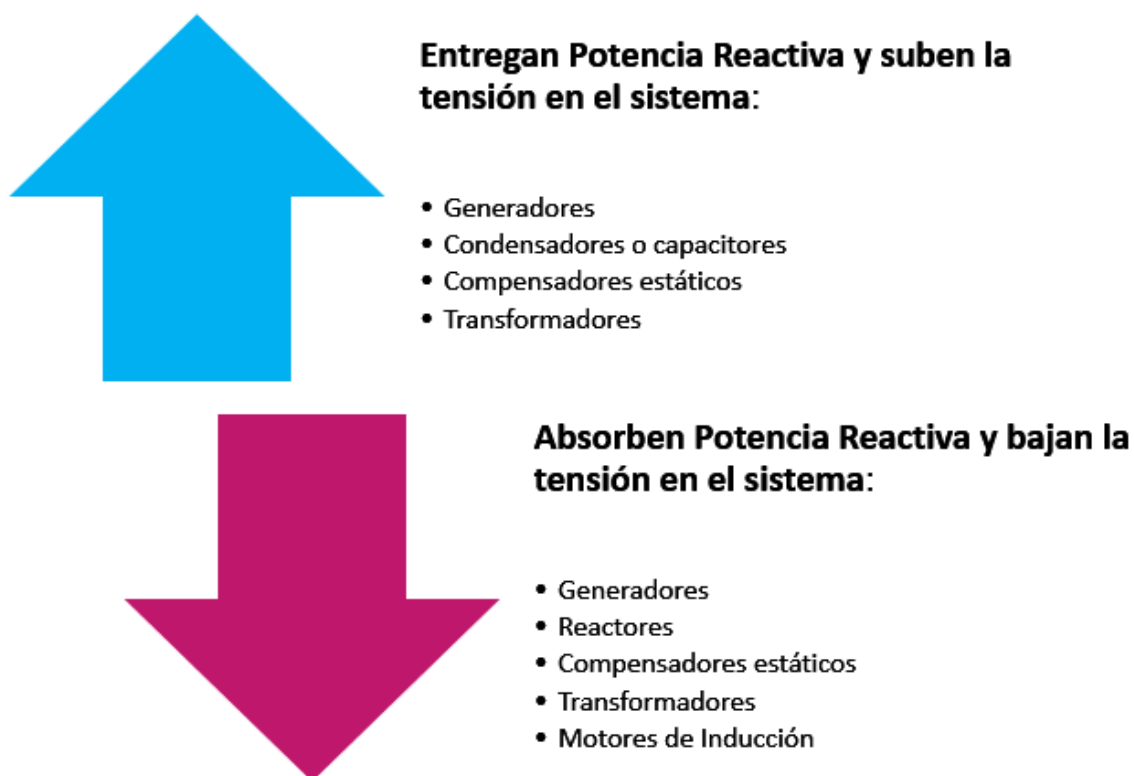


Figura 11. Equipos en el SEP que influyen en el control de tensión [28].

LÍMITES OPERATIVOS – RESOLUCIÓN CREG 025:

Se tienen las siguientes consideraciones en la normativa Colombiana para los límites de tensión aceptables de operación: [28]

1. Las tensiones no deben ser inferiores al 90% ni superior al 110% del valor nominal. Para nivel de tensión 500kV el voltaje máximo es 105%.
2. La potencia reactiva en las unidades de generación deberá permanecer dentro de los límites de régimen permanente declarados.
3. Para el control de voltaje se pueden emplear todos los elementos disponibles: Generadores, Condensadores, Reactores y Transformadores con Taps bajo carga.

Se debe recordar entonces que la pérdida de la estabilidad de tensión en el sistema es debida a varias condiciones, como por ejemplo: cuando se presenta una perturbación, se da un incremento en la demanda de la carga o un cambio en la condición de operación o topología, lo cual provoca una progresiva caída de tensión en todas las barras del sistema.

Por lo tanto la principal causa de inestabilidad de tensión es la incapacidad del sistema de potencia para satisfacer la demanda de potencia reactiva. [28]

3.2.1 Afectación de los perfiles de tensión en la red de distribución con la operación de GD

La Influencia que tiene la GD en la red de distribución frente al control de tensión, se ve determinada por el factor $k = (R/X)$ donde R es la resistencia y X la reactancia del conductor y la cual depende de la tensión y de la potencia suministrada, entre mayor sea el valor de la constante mayor será su aumento en el nivel de tensión, por el contrario para valores bajos de la potencia activa, esta no tiene ninguna influencia en los perfiles de tensión [12]. La Figura 12 se muestra dicho comportamiento.

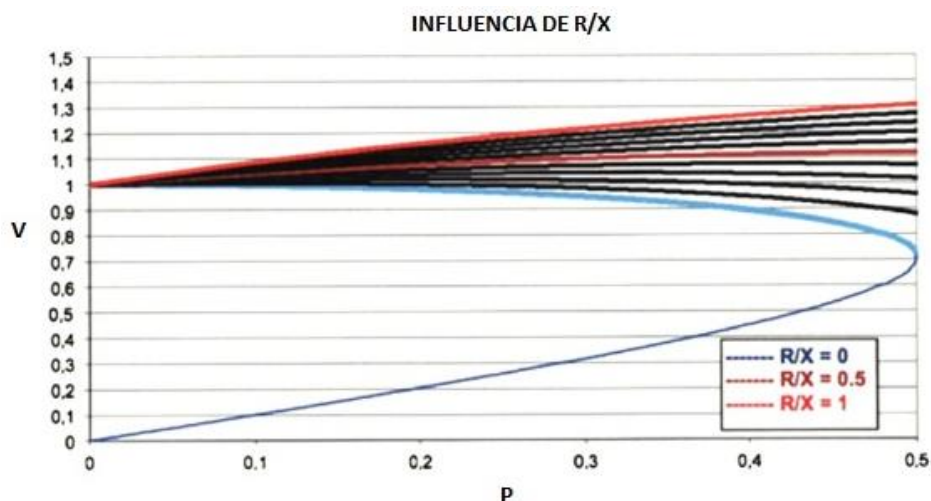


Figura 12. Característica Potencia – Voltaje para diferentes variaciones de K [12]

En la gráfica expuesta sobre el comportamiento de la curva P-V respecto a los cambios del factor k , se aprecia que entre más alto sea dicho factor, es decir, que la potencia activa aumente, se verán reflejados mayores cambios en los perfiles de tensión de la red (representado por la curva roja) y que ante pequeñas variaciones en los flujos de potencia no se verá afectada el nivel de tensión (representado por la curva azul).

La operación de la red con GD, genera que se incrementen los niveles de tensión ya que para las redes de media y baja tensión el factor R/X es mayor a 1 como se muestra en la Tabla 5. [12].

Tabla 5. Valores del parámetro K como función del nivel de tensión [12]

Nivel de Tensión	Factor $k = R/X$	$R(\Omega/\text{km})$	$K(\Omega/\text{km})$
400 V	4.44	0.400	0.090
20 kV (Subterráneo)	2.29	0.270	0.118
20 kV (Aéreo)	1.065	0.426	0.400
66 kV	0.31	0.119	0.386
132 kV	0.175	0.072	0.410
220 kV	0.146	0.046	0.315
400 kV	0.097	0.027	0.277

En la Tabla 5 se observa que para altos niveles de tensión, la GD no causa mayor efecto en los perfiles de tensión debido a que el factor k está por debajo de 1, lo cual ayuda a que la caracteriza P-V sea como la curva azul expuesta en la Figura 12, pero para redes de distribución en media y baja tensión será evidente presenciar incrementos en las tensiones por los altos valores del factor K .

Con el fin de compensar los altos niveles de tensión generados se debe contemplar la inyección de potencia reactiva a la red, la cual tiene como concepto la relación entre el cuadrado de la tensión del generador y la reactancia del conductor $\frac{V^2}{X}$.

Teniendo en cuenta que a niveles de tensión bajos el factor K es mayor se requiere mucha más potencia reactiva inyectada al sistema para poder realizar control de tensión, lo cual no es rentable. [12] [15].

Ya se tiene presente como es el comportamiento de una red con GD y las alteraciones en los perfiles de tensión que se pueden presentar, en la sección se revisará como es el comportamiento de una red de distribución operando de manera aislada y realizando el suministro de energía eléctrica por medio de GD.

3.2.2 Estabilidad de Tensión en una red operando de manera aislada

Si bien en los apartados 3.1 y 3.2 se dieron generalidades sobre los conceptos de estabilidad de tensión y los elementos que influyen sobre la misma, en el presente apartado se estudiará como es el comportamiento de la estabilidad de tensión en una red operando de manera aislada y los elementos que influyen en el control de tensión sobre esta.

Se tiene entonces que para cumplir con el propósito de mantener la estabilidad de tensión en la red de distribución operando de manera autónoma (después de presentarse la desconexión del SEP central), se requiere mantener la red en rangos de tensión aceptables, para lo cual se debe tener en cuenta, el comportamiento que asumirá la carga llegando a un acuerdo con los usuarios finales para realizar así el control de la demanda, lo que permitirá reducir su consumo, y de esta manera que la carga de los alimentadores

principales que en este caso corresponderían a los generadores distribuidos, también se disminuya y por lo tanto la caída de tensión en la red, puede ser compensada y conseguir un rango de operación entre los límites establecidos para conservar la estabilidad de tensión. [11]

Tener control de la carga generará un balance entre la potencia que demandan las cargas y la potencia inyectada por los generadores distribuidos de la red, lo cual es de vital importancia para cumplir con la estabilidad de tensión. [11]

Como se habló anteriormente, es de vital importancia la participación de la demanda para conservar la estabilidad de tensión en la red de distribución operando de manera aislada, por lo cual se tiene la respuesta de la demanda con el fin de contribuir al control de tensión en la red.

Se pueden presentar dos formas sobre la respuesta de la demanda, teniendo en cuenta que se debe llevar a cabo en tiempo real:

- **La respuesta de demanda programada:** este tipo de respuesta está ligada a aspectos económicos, ya que se proporcionan pagos de incentivos a los usuarios para reducir sus cargas durante eventos en el sistema, este tipo de contribución por parte de los usuarios es pactado con anterioridad, ya que el operador del sistema eléctrico ante la presencia de un evento, llama al comité de clientes para disminuir sus cargas, y su duración, esta última depende de la naturaleza del evento presentado. [11]
- **La respuesta de demanda ante eventos:** este tipo de respuesta se presenta en condiciones de emergencia. [11]

Una vez se tiene la respuesta de la demanda, se deben conocer los niveles de tensión¹ en cada una de las barras o nodos de la red, así como los límites de tensión que se van a establecer, con el fin de determinar cuándo debe entrar el sistema regulador de tensión.

¹ Para conocer los niveles de tensión a través de la red, se deben adquirir equipos que permitan registrar sus medidas como RTU, medidores inteligentes, sistemas de comunicación como PLC o GPRS y un concentrador de todas estas señales que permita realizar el análisis respectivo, por ejemplo SCADA. (Zakariazadeh et al, 2014) (ROMERO et al, 2014)

En un sistema típico de distribución, el mayor nivel de tensión se puede presentar en el generador distribuido y el mínimo valor de tensión se puede presentar en el nodo más lejano o entre los nodos de conexión de generadores distribuidos. [11]

Adicionalmente se debe tener en cuenta, que los niveles de tensión de la red se verán afectados principalmente por:

- La clase de red en la que se realiza el control de tensión teniendo GD, ya que esta varía de acuerdo a las diferentes clases de redes que se tienen por ejemplo: Rural, Urbana, Rural con grandes distancias o Mixtas.
 - El nivel y tipo de demanda.
 - La localización de la GD en la red de distribución y el nivel de penetración de GD.
- [12] [9]

Por el medio en el que se va a alimentar la red de distribución en modo isla, se debe garantizar de igual manera la confiabilidad y la calidad del servicio, por lo cual una de las alternativas que se pueden considerar para lograr esto, es la capacidad de almacenar energía por medio de baterías. [13]

3.3 EXPERIENCIAS INTERNACIONALES – GD

Con el fin que, el suministro de energía eléctrica sea más confiable para los usuarios finales aunque se presenten eventos en la red, contribuir a la no contaminación del medio ambiente y llevando energía a las zonas aisladas, se genera la implementación de la GD gracias a las investigaciones, estudios y análisis de las mismas, por lo cual a continuación se describirán varias experiencias internacionales acerca de la GD y sus aspectos técnicos:

1. **Generación Distribuida en Brasil:** El primer caso de GD en Brasil se da en el año 2004, donde su implementación se lleva a cabo con la tecnología Biomasa, y obtienen como resultado, una gran contribución en el perfil de tensión sobre las

pequeñas cargas localizadas en puntos distantes del sistema de distribución, las cuales sufrían anteriormente problemas de caída de tensión; la GD contribuirá con la mejoría del perfil de tensión en estos puntos.

Adicionalmente pueden suplir demanda en las regiones aisladas localizadas al Norte de Brasil, las cuales no estaban conectadas al Sistema Centralizado. [27]

2. **Gas Natural Fenosa en Europa**: Proyectos **SCALA** (Desarrollado en la población de Alcalá, Aranjuez y Madrid) y **PRICE** (Conjunto de Redes Inteligentes en el Corredor del Henares).

Es una compañía que le apuesta fuertemente a la transformación de sus redes de distribución de electricidad para convertirlas en redes inteligentes, por medio de medidores inteligentes y la automatización de su sistema; también trabaja sobre un proyecto llamado PRICE - GDI (Proyecto Conjunto de Redes Inteligentes – Generación Distribuida), que permitirá la integración de los recursos renovables en la red.

Expone que debido a la integración de la GD, se puede disminuir la demanda final y por lo tanto la disminución de la saturación del sistema, se obtienen redes más flexibles, pero se debe tener cuidado ya que, la GD puede contribuir negativamente a los sistemas de control de tensión, afectando el funcionamiento de los reguladores de tensión y baterías de condensadores, pero que si se hace la integración de una manera adecuada puede mejorar los perfiles de tensión en la red.

Otro aspecto se refiere a que la GD altera los flujos de energía, lo cual afecta las pérdidas que se producen. Si la GD se desarrolla a niveles moderados de penetración y concentración, se logra disminuir las pérdidas de energía, pero si por el contrario aumenta significativamente estas variables, las pérdidas podrían crecer.

En el proyecto también se trabaja sobre el Despacho de GD, con el fin de conocer el estado de la red de distribución sobre las congestiones y cargas de las líneas,

potencia activa y reactiva que deben entregar los generadores distribuidos, tensiones en los nodos y pérdidas en la red. El sistema empleado para el control de tensión corresponde al D-STATCOM (Distribution – Static Var Compensator) y Banco de Condensadores, conectado a la red de media tensión. [34]

3. **Proyecto AGDA - Aerogenerador de media potencia para Generación Distribuida y Autoconsumo - España:** El proyecto de innovación está siendo desarrollado por la empresa ARGOLABLE y es apoyado por El mecanismo Financiero del Espacio Económico Europeo, es de anotar que anteriormente instalaron otro aerogenerador el cual está operando desde el 2011 hasta la fecha, este fue instalado en el Parque Tecnológico de Álava y es el primer gran hito de la historia.

El proyecto AGDA consta de un aerogenerador más, de 100 KW que será puesto en servicio en Septiembre de 2015, para este segundo generador se cuenta con avances tecnológicos importantes, lo cual ha permitido hacer mejoras en la máquina y mantener la operación fiable, pero con una reducción de costes.

Con la implementación de estos equipos, la empresa ARGOLABLE apunta su negocio a empresas pequeñas, medianas y a grandes infraestructuras públicas como de tratamientos de aguas, depuración, bombeos, sistemas de calefacción en granjas avícolas, canteras. De igual manera afirman que la generación distribuida está siendo implementada principalmente en Reino Unido, Italia, Canadá, Suramérica [40].

4. **Proyecto Planta Solar fotovoltaica – Jordania, Asia:** La empresa ATERSA filial de ELEC NOR, finalizó la primera planta de energía solar fotovoltaica construida en Jordania, con un costo total de 4,4 millones de euros, tiene una capacidad instalada de 2,18 MW. Este proyecto ha sido promovido por el Ministerio de Energía y Recursos Minerales de Jordania (MEMR) con el objetivo de impulsar el uso de las energías renovables en el país.

La planta solar está ubicada en los alrededores de Azraq y esta conecta por medio de una línea de 11 kV a la subestación existente operada por NEPCO. Cuenta con una potencia pico de 2,18 MW y dos inversores de 1MW de potencia nominal cada

uno. Igualmente, dispone de 1MW de estructura fija y 1 MW con seguidor a un eje, conectado cada uno a un inversor.

La instalación está compuesta por 7.380 módulos fotovoltaicos de alta calidad y se han instalado 34 cajas de conexiones que facilitan el agrupamiento de series de paneles con protecciones y supervisión de la corriente de cada una de ellas. [41]

5. **Ciente auto generador, Hydro – Québec – Francia:** Esta empresa trabaja el tema de autoproducción y permite que los usuarios produzcan e inyecten energía a la red.

Los usuarios pueden producir energía sin importar cuál sea su fuente, lo cual implica que se puede implementar cualquier tipo de instalación según las necesidades, pero para inyectar su energía a la red, los interesados deben realizar la solicitud de conexión a la empresa, para ser auto generadores y posterior a esto esperar la autorización de Hydro – Québec, teniendo en cuenta que la producción sea mayor a sus necesidades. Esta alternativa que a hoy ofrece la empresa Hydro - Québec es sin compensación.

La facturación se realiza de manera convencional, presentando los detalles sobre la cantidad de energía que Hydro – Québec ha proporcionado, la empresa expone que si el usuario está autorizado para inyectar el excedente en la red, no se tiene derecho a ningún crédito.

Por otra parte, las condiciones de operación que se deben cumplir son: La instalación eléctrica debe ser diseñada, construida, conectada, protegida, realizar mantenimiento y permitir a Hydro - Québec administrar, operar y proteger la red, incluyendo los equipos de medida, no perturbar el funcionamiento de la red, no hacer daño a los demás clientes del servicio eléctrico, no poner en peligro a los delegados de prevención y a los clientes de Hydro-Québec.

Otras condiciones que se tienen establecidas son: Si es un cliente es residencial, debe ser el propietario y ocupante, si es dueño de un negocio, debe ser el operador,

y todos los cargos relacionados con la compra, instalación, mantenimiento e inspección de equipos son de la responsabilidad del usuario. [42]

6. Energía Solar – Estados Unidos: Las plantas de energía solar en EE.UU son a escala comercial, así como la generación distribuida local, la mayoría de los tejados están equipados con sistemas de energía solar fotovoltaica.

En septiembre de 2013, la energía solar generó 7,4 millones de MWh es decir el 0,18% del total de electricidad de los EE.UU, la instalación de energía solar más grande en el mundo es la llamada *Solar Energy Generating Systems* en California, que tiene una capacidad total de 354 (MW).

Los EE.UU. se encuentra entre los primeros países del mundo en electricidad generada y que tiene como fuente el sol, varias de las instalaciones de suministros energéticos más grandes del mundo se encuentran en el desierto del suroeste, es de anotar que Estados Unidos llevó a cabo muchas investigaciones al inicio de la energía fotovoltaica y de la energía solar concentrada.

Las bases militares y las comunidades remotas han construido y mantenido tradicionalmente la parte de las micro redes en los Estados Unidos, pero las ciudades, las comunidades y las instituciones públicas fomentarán la próxima ola de adopciones de micro redes. Según el informe más reciente de GTM Research, micro redes 2014: La capacidad de la micro red actual es de 1.051 MW y se prevé que llegará aproximadamente a 1.843 MW a finales de 2017. [43]

4. Capítulo 4

En este capítulo, se modelarán y se realizarán simulaciones en el software computacional DigSilent – Power Factory a una red de distribución operando de manera aislada, la cual fue seleccionada como base para el desarrollo del caso de estudio y adicionalmente cumple con los objetivos del documento.

Mediante estas simulaciones se pretende, modelar un caso práctico y observar los comportamientos y respuestas de la red de distribución ante la instalación de GD en la misma, validar los perfiles de tensión, flujos de carga y estabilidad de tensión con el fin de realizar los análisis respectivos frente a cada caso.

La red que fue elegida para modelar como el caso práctico de este estudio, es del municipio de Manizales - Departamento de Caldas, ya que en ella existen actualmente 3 circuitos nombrados como Municipal, Intermedia y Sancancio, y cada uno tiene su planta generadora (PCH), las cuales tienen como recurso principal el caudal del río Chinchiná, específicamente para las plantas Intermedia y Sancancio, luego se une al río Chinchiná el río Río Claro para continuar hacia la planta Municipal, adicionalmente se debe tener presente que la zona tiene la facilidad de implementar la GD – Fotovoltaica.

4.1 Diagrama unifilar

En la Figura 13 se representa el diagrama unifilar correspondiente a la red de distribución que se va a analizar para el caso práctico, el cual es del interés para este documento.

La red de distribución inicial, se modelará con diferentes configuraciones y topologías como se describen a continuación:

- 1) Un SEP el cual es equivalente a la alimentación principal del sistema.
- 2) Tres GD conocidos como Planta Municipal, Planta Intermedia y Planta Sancancio.
- 3) Las cargas asociadas a cada circuito (Circuito Municipal, Intermedia y Sancancio).

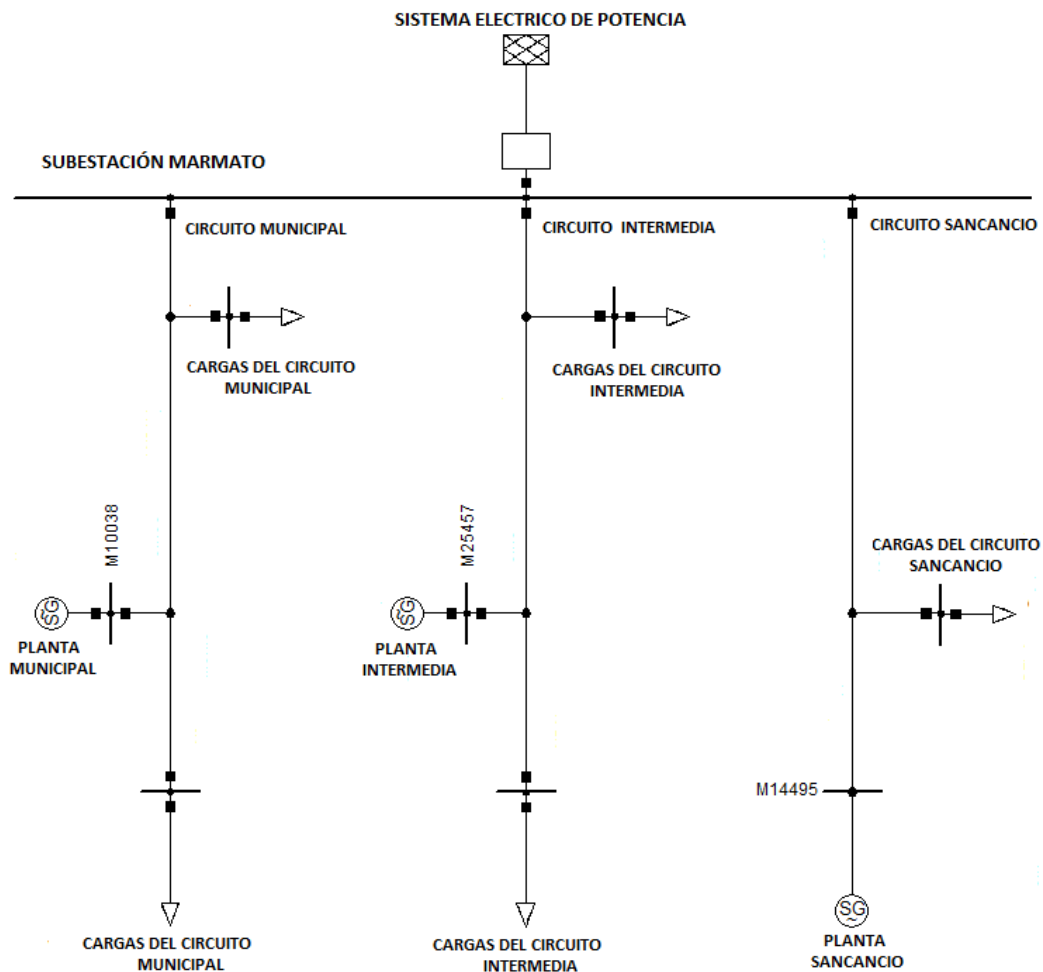


Figura 13. Diagrama Unifilar

4.2 Red de distribución detallada incluyendo GD

En esta sección se puede apreciar de manera más clara la topología de los circuitos seleccionados (Figura 14). Se relaciona la ubicación de las 3 plantas menores mencionadas anteriormente y las cargas asociadas a los circuitos, las cuales se encuentran en cada una de las ramificaciones y troncal principal de los mismos. Información suministrada por el operador de red CHEC.

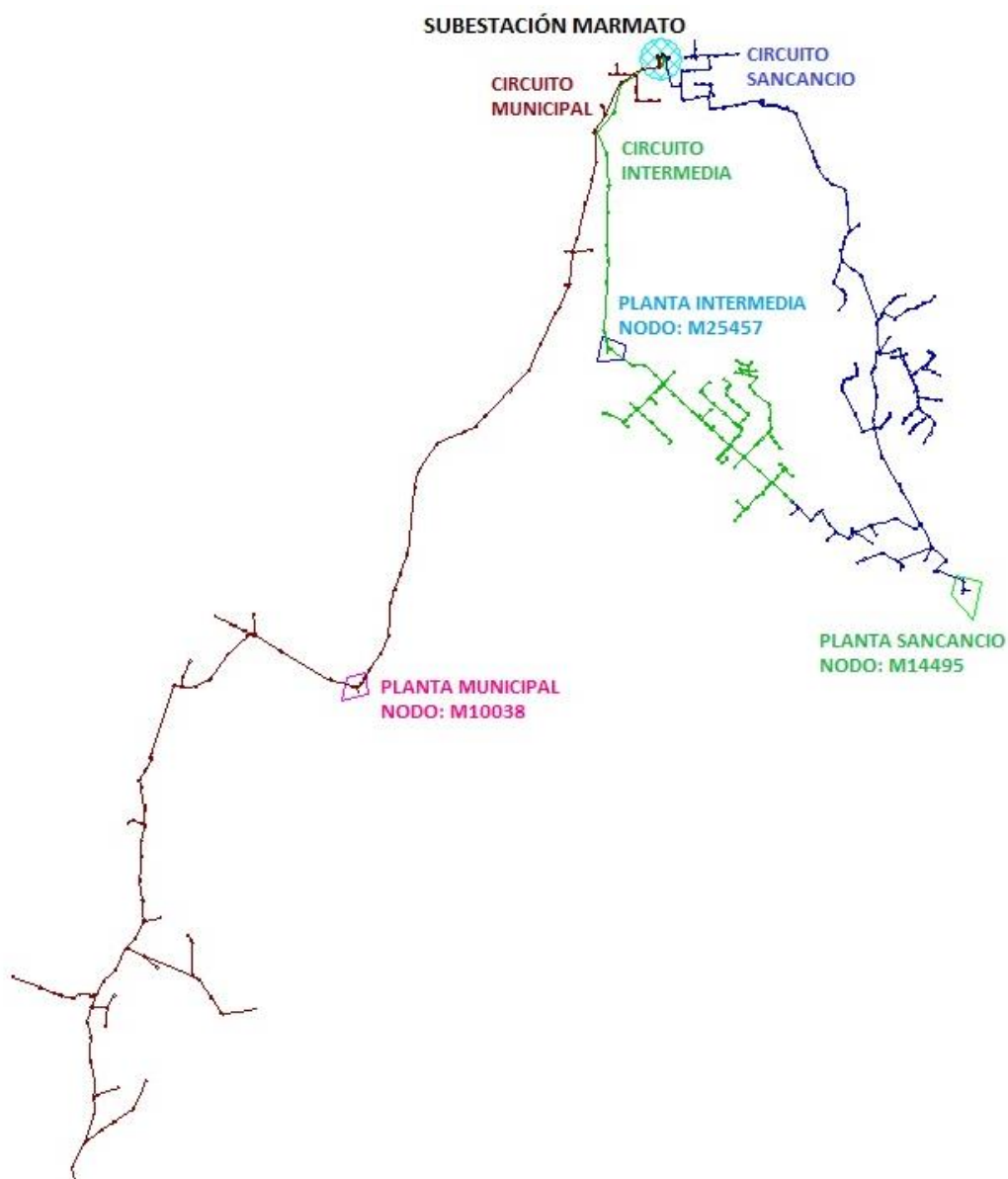


Figura 14. Red de distribución detallada para el caso de estudio.

A continuación se describen las características de la red de distribución a estudiar, las cuales se obtienen por parte del operador red CHEC quien administra dichos circuitos y las plantas menores de generación asociadas.

a. Características de la red de distribución:

Las redes a analizar de la Subestación Marmato en la ciudad de Manizales, son redes de media tensión correspondiente a 13,2 kV, con los conductores dispuestos de forma aérea. La red consta de 3 plantas menores distribuidas en cada uno de los circuitos Municipal, Intermedia y Sancancio, sus características serán especificadas más adelante.

Los circuitos corresponden a una configuración en mayor proporción Urbana y en algunas zonas Rurales pero con cargas concentradas, por lo cual será considerado como topología Mixta.

b. Características de los usuarios:

La mayoría de usuarios de la red a estudiar son de tipo residenciales por lo que tienen un comportamiento altamente resistivo. A continuación se especifica cuantos usuarios pertenecen a cada circuito y cuál es su consumo.

Circuito Municipal:

- ✓ Número de Usuarios: 1299
- ✓ Consumo: 221220 kWh

Circuito Intermedia:

- ✓ Número de Usuarios: 3950
- ✓ Consumo: 508525 kWh

Circuito Sancancio:

- ✓ Número de Usuarios: 4060
- ✓ Consumo: 615782 kWh

En la Tabla 6, se da una mayor descripción en cuanto a las características sobre el tipo de usuarios asociados a cada circuito.

Tabla 6. Clase de Usuarios asociados a cada circuito.

NOMBRE CIRCUITO	Total USUARIOS	TIPO DE USUARIOS									
		Áreas Comunes	Comercial Exenta	Comercial	Especial Asistencial	Especial Educativo	Industrial	Industrial Exenta	Servicios y Oficial	Provisional	Residenciales
MUNICIPAL	1299		2	59	3	3	4	1	3	2	1222
INTERMEDIA	3950	1	1	279	2	7	9		21	20	3610
SANCANCIO	4060	1	2	241		6	5	1	2	6	3796
TOTAL	9309	2	5	579	5	16	18	2	26	28	8628

De la Tabla 6 en la cual se especifica el tipo de usuarios, se evidencia fácilmente que el circuito Municipal tiene características tanto urbanas como rurales, y que los circuitos Intermedia y Sancancio son en mayor porcentaje de tipo urbanos. De igual manera el tipo de usuario común para los 3 circuitos corresponde a cargas residenciales que como se dijo anteriormente son cargas resistivas. Los datos expuestos fueron suministrados por parte del operador de red CHEC.

c. Características de los generadores PCH:

Las 3 plantas menores de generación PCH, se parametrizan de acuerdo a los ajustes que tienen ya establecidos en la empresa de energía CHEC, con el fin de ser lo más precisos posibles para su modelo en DigSilent.

Las características generales de las PCH a modelar y analizar en el desarrollo del proyecto son:

Planta Municipal:

- ✓ Tensión nominal: 13,2 kV
- ✓ Potencia Activa nominal: 1 MW

- ✓ Potencia Activa entregada: 0,685 MW

Planta Intermedia:

- ✓ Tensión nominal: 13,2 kV
- ✓ Potencia Activa nominal: 1 MW
- ✓ Potencia Activa entregada: 0,87 MW

Planta Sancancio:

- ✓ Tensión nominal: 13,2 kV
- ✓ Potencia Activa nominal: 2 MW
- ✓ Potencia Activa entregada: 0,55 MW

NOTA: Las demás características de las plantas menores de generación, se adjuntan en el Anexo C, con el fin de suministrar mayor información en cuanto a su modelado en la herramienta computacional DigSilent.

Para efectos de simulación, se deben tener presente los parámetros que se configura en cada planta y adicionalmente considerar que las plantas menores de generación modeladas, cuentan con la función de arranque autónomo, con el fin que cuando deban operar aisladas del SEP continúen entregando la potencia necesaria al circuito y garantizando una buena calidad del servicio, de esta manera no será necesario la presencia de tensión en la barra para que la planta pueda arrancar.

d. Características de la demanda para las simulaciones en DigSilent:

- ✓ Las simulaciones se realizarán con el escenario de demanda máxima para el operador de red CHEC, el cual fue presentado en el año 2013 para el periodo 20 del día 4 de Diciembre.
- ✓ Las cargas asociadas a cada uno de los circuitos, están modeladas con la característica de potencia constante.

- ✓ El SEP se modela por medio de una red externa, a la cual se asignan todos los equivalentes del sistema CHEC en la subestación Marmato, teniendo en cuenta el flujo de carga y el análisis de corto circuito. Los resultados obtenidos se introducen como parámetros de impedancias de secuencia positiva y cero, relación R/X, tensiones, ángulos y potencia de cortocircuito. Nota: Los parámetros necesarios y los datos con los que fue alimentada la red externa se adjunta en el Anexo C.
- ✓ Se debe tener presente que, los parámetros asociados en los modelos de la red externa y las plantas menores de generación que se están empleando para el caso práctico, son acordes a lo real visto por el SEP y por lo tanto sus parámetros corresponden a equivalentes de thevenin con impedancia reales, esto genera que, los perfiles de tensión para cada fase de un mismo circuito en el nodo principal o de inicio, no coincidan con el mismo valor de tensión en p.u. en cada fase si no que difieran un poco.

Si se realizaran las simulaciones, con la planta menor de generación o red externa ideales en el primer nodo se obtendrían la misma tensión para cada una de las fases.

Desde hace mucho tiempo atrás durante el desarrollo de los SEP, se ha visto la necesidad de mejorar la prestación del servicio de energía, partiendo desde el proceso de generación hasta el consumo del servicio en los clientes finales, esto ha dado pie para la creación de un objetivo primordial en las redes de distribución, el cual incorpora tecnologías que contribuyan a la optimización de los sistemas de GD tanto de su tamaño y ubicación, como de su configuración y condiciones de funcionamiento.

Con el fin de optimizar el tamaño y la localización en la red, se recurre a funciones técnicas y económicas dependientes en forma directa del tipo, funcionamiento y restricciones técnicas del sistema de GD. [9]

En base a este gran objetivo se realizará para este proyecto, el análisis sobre el comportamiento de la GD, se determinará la mejor localización y penetración en la red de distribución, de igual manera se debe tener presente que, estas especificaciones también

dependen del punto de vista que se tenga en cuenta para el estudio y las necesidades específicas de cada red de distribución.

El propietario de la planta de GD, busca la máxima rentabilidad en ella y el objetivo es vender la máxima cantidad de energía a bajo costo. Para la empresa distribuidora de energía eléctrica, comprometida con la calidad del producto, el enfoque será garantizar el suministro energético a bajo costo y la reducción de las pérdidas de energía que se producen en el transporte y distribución. [9]

Dado lo anterior, en los siguientes ítems se realizarán simulaciones en la red de distribución, con el fin de conocer su comportamiento en varios escenarios, como se nombran a continuación:

- Conectada al SEP (ítem 4.3)
- Ambos sistemas funcionando al mismo tiempo SEP y GD (ítem 4.4)
- La red operando de manera aislada (ítem 4.5), la cual se analizará por medio de simulaciones frente a los diferentes tipos de localización y penetración de GD en la red, así como su capacidad de suministrar la potencia requerida por la misma.
- Se tendrá en cuenta la implementación de GD con tecnología fotovoltaica en la red (ítem 4.6)
- Se realizará un análisis de estabilidad de tensión por medio de las curvas P-V (ítem 4.7).

En cuanto al análisis de los perfiles de tensión en la red, se ubicarán para cada caso los puntos máximos y mínimos de los valores obtenidos en el circuito, con el fin de determinar qué es lo más conveniente en cuanto a la calidad del servicio que se está suministrando a los usuarios, y de igual manera se revisarán también el tipo de curvas P-V de las cuales se puede apreciar el comportamiento de la tensión en una carga determinada ante el aumento de potencia activa, en la cual se analizará la estabilidad de tensión.

4.3 Características de la red de distribución conectada al SEP sin GD

Después de definir todos los parámetros de ajustes que tendrán los 3 circuitos y los elementos de potencia asociados a estos, se procede a modelar la red en el software DigSilent y a realizar posteriormente todas las re-configuraciones y cambio de topología que se quiera analizar.

Para dar inicio a las simulaciones, se tendrán los circuitos con las siguientes condiciones: circuitos alimentados a través del SEP y sin implementación de GD. En la Figura 15 se pueden ver las condiciones iniciales de dicha configuración las cuales se obtienen por medio de un flujo de carga.

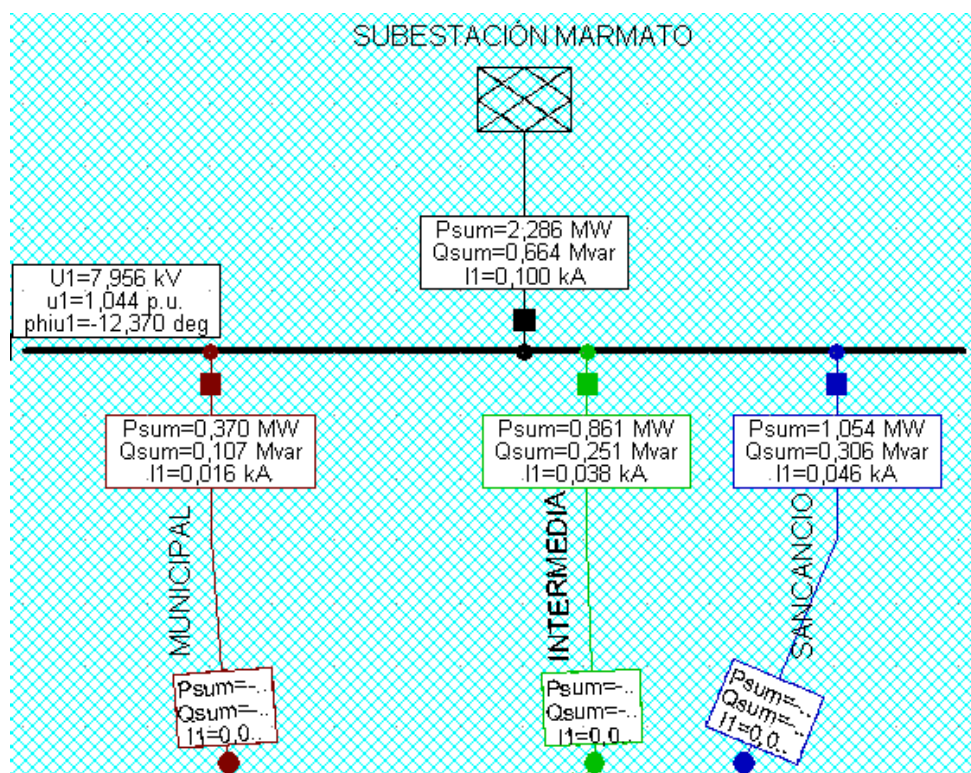


Figura 15. Flujo de carga - Red de distribución conectada al SEP sin GD

Como se puede ver en la Figura 15, el SEP alimenta los circuitos Municipal, Intermedia y Sancancio, identificados respectivamente (vino tinto, verde y azul). Los resultados del flujo de carga en el sistema evidencian el consumo de potencia y su equivalente en corriente

de lo que estaban consumiendo dichos circuitos el día de máxima demanda, la cual corresponde a la parametrización como se anunció en la sección 4.2.d

Los resultados del flujo de carga, también permiten evidenciar que la potencia total entregada por el SEP siendo 2,286 MW, es equivalente a la suma de lo que están consumiendo cada uno de los circuitos (0,370 MW + 0,861 MW + 1,054 MW). Por otro lado el nivel de tensión en la barra principal es tomado de la referencia del SEP el cual equivale a 1.044 p.u.

Teniendo presente el comportamiento del sistema de distribución convencional, se procede a realizar un análisis sobre los perfiles de tensión a través de todos los nodos y para cada uno de los circuitos. Los resultados obtenidos se representan en las Figuras 16, 17 y 18.

Con el fin de comprender mejor la distribución de tensiones a lo largo de la red, se incluyen también en estas gráficas, la ubicación de los valores de tensión máximos y mínimos en cada circuito.

- **CIRCUITO MUNICIPAL:**

- Menor nivel de tensión en el nodo M10095 correspondiendo a 1,039 p.u.
- Mayor nivel de tensión en el nodo M10741 correspondiendo a 1,044 p.u.

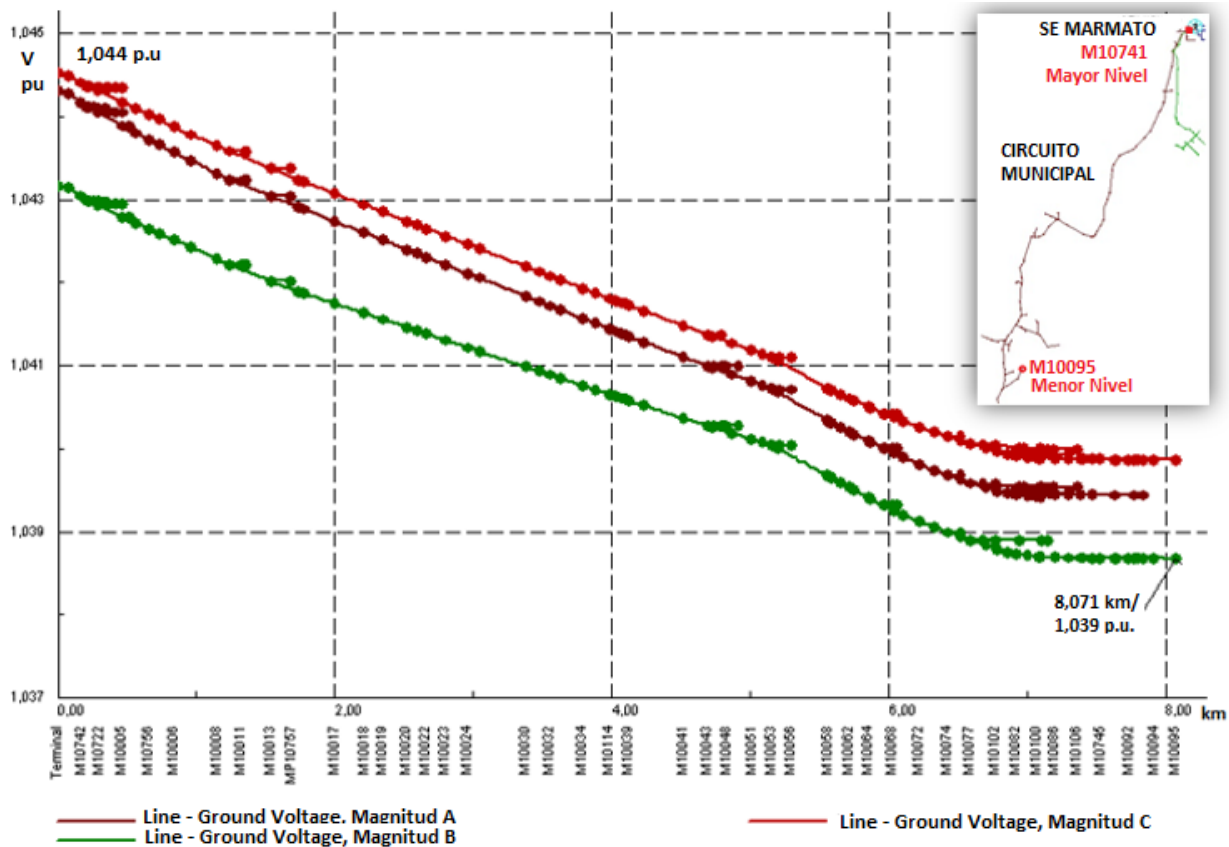


Figura 16. Perfiles de tensión Circuito MUNICIPAL – SEP sin GD

- **CIRCUITO INTERMEDIA:**

- Menor nivel de tensión en el nodo M24235 correspondiendo a 1,035 p.u.
- Mayor nivel de tensión en el nodo M13001 correspondiendo a 1,044 p.u.

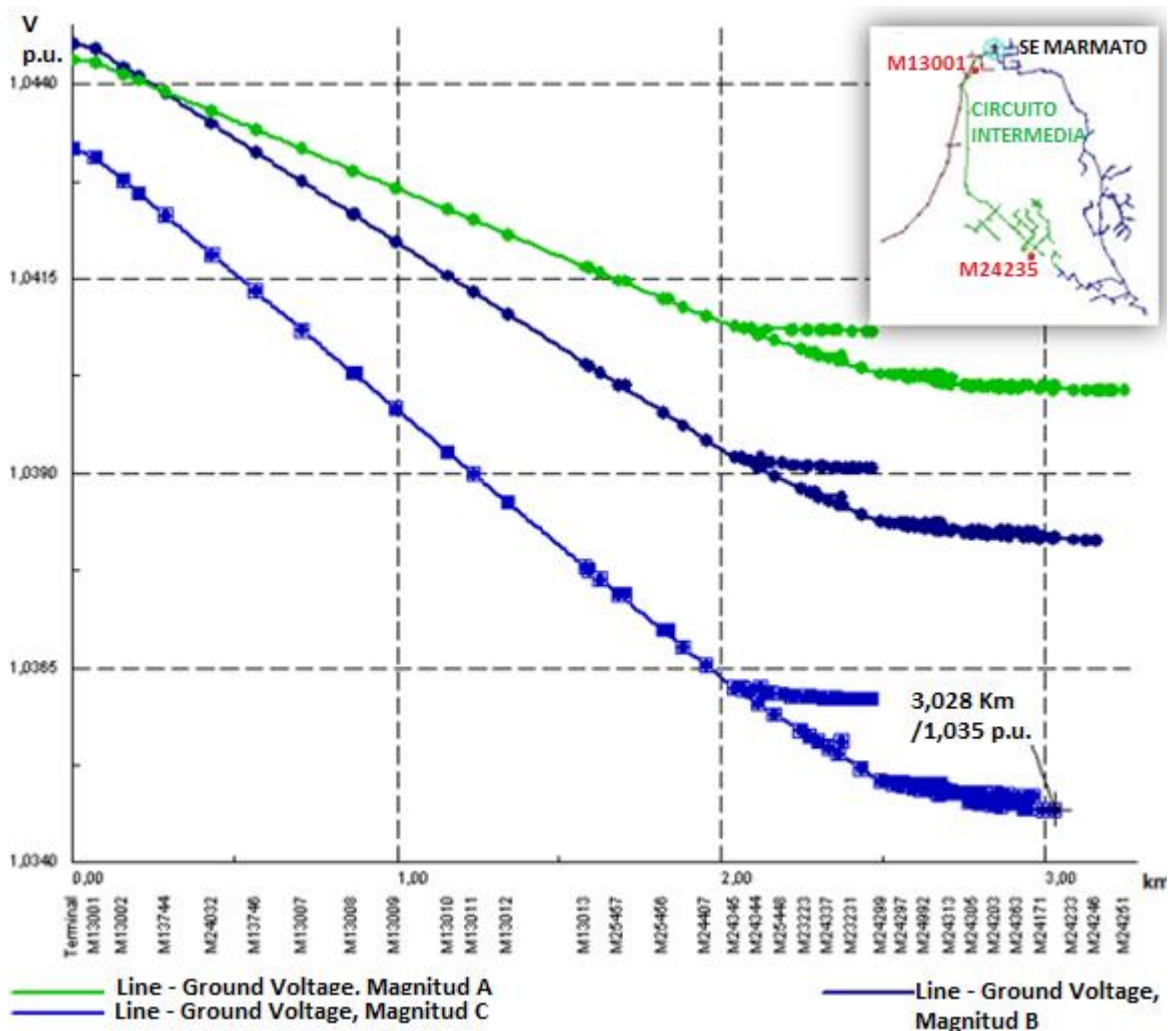


Figura 17. Perfiles de tensión Circuito INTERMEDIA – SEP sin GD

• **CIRCUITO SANCANCIO:**

- Menor nivel de tensión en el nodo M14455 correspondiendo a 1,038 p.u.
- Mayor nivel de tensión en el nodo M14301 correspondiendo a 1,044 p.u.

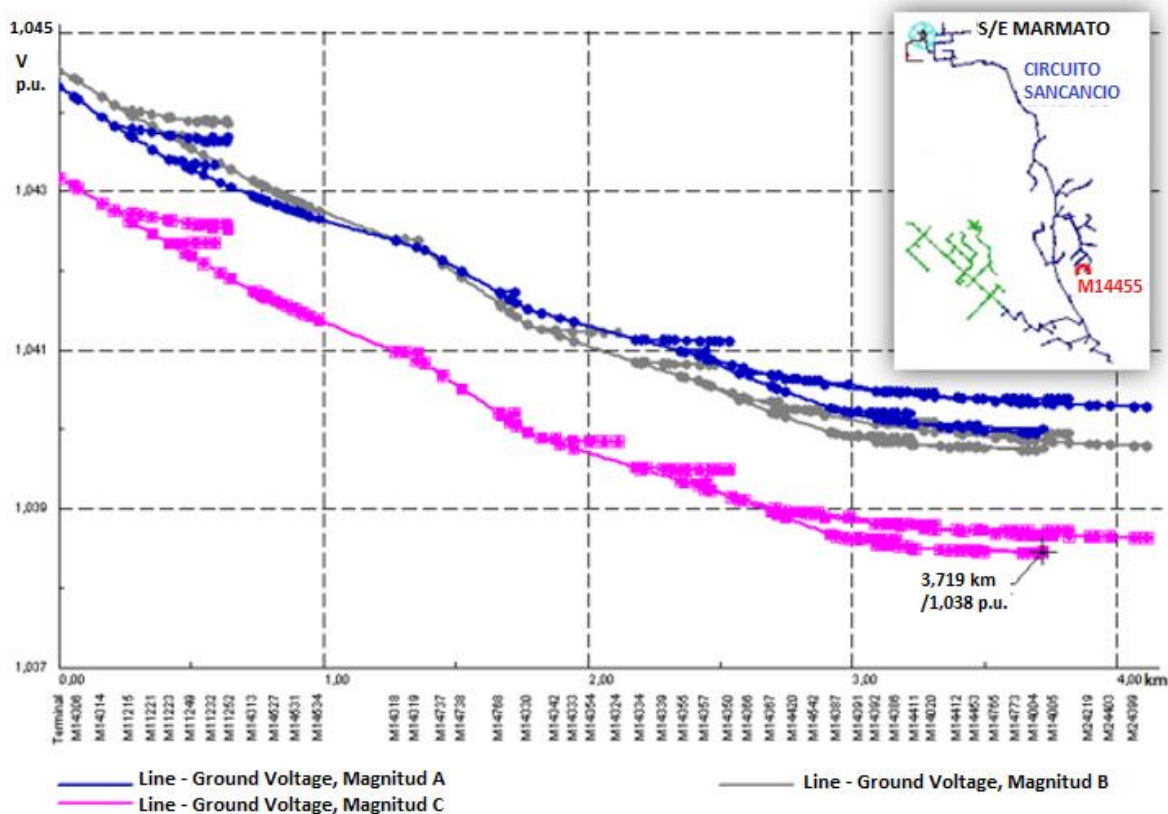


Figura 18. Perfiles de tensión Circuito SANCANCIO – SEP sin GD

Como se pudo apreciar en las Figuras 16, 17 y 18, las curvas que permiten ver los perfiles de tensión a través de la red comienza con un valor máximo el cual es equivalente a la tensión de la barra principal que está conectada al SEP (1,044 p.u.) y el resto de nodos aguas abajo de la barra principal empiezan a disminuir, en las gráficas se encuentra el valor de tensión en p.u. para todos los nodos asociados a cada circuito.

Fue común entonces para las 3 figuras correspondientes a cada circuito, encontrar el menor valor de tensión al final de la curva y el cual al graficarlo en la red de distribución se evidencio que equivale al nodo más lejano, este resultado es así debido a que la tensión cae de acuerdo a la distancia que hay, desde la fuente de alimentación a cada nodo, lo cual se refleja en un aumento de la impedancia de línea entre más lejos se encuentre el nodo.

Se recuerda que la diferencia presentada entre las tensiones de cada una de las fases del circuito en el nodo inicial, se debe al modelo empleado para la simulación el cual esta

parametrizado con valores reales del SEP, y en los demás nodos la diferencia se debe a que no todas las cargas son alimentadas de la misma fase, por lo tanto la red de distribución es desbalanceada y presentan diferentes longitudes e impedancias.

El efecto presentado en las simulaciones, es acorde con lo que pasa en las redes de distribución actuales, ya que presentan un desbalance el cual se evidencia debido a que en las fases consecutivas que componen la red, las tensiones y/o ángulos no son iguales. Esto se genera como consecuencia a:

- El cambio permanente de cargas presentes en la red que están en constante variación
- La conexión de cargas residenciales de naturaleza monofásica
- La distribución no homogénea de cargas
- La configuración de la red radial en la cual se evidenciará mayor nivel de desbalance que una red anillada, por ejemplo en redes de transmisión
- También se ve afectado por el tipo de cargas, por ejemplo, como Los hornos de arcos trifásicos, por su naturaleza de funcionamiento presentan desbalances de carga variable a lo largo del proceso de fundición. [44]

Las consecuencias de un sistema desbalanceado, se reflejan en las componentes de corriente de secuencia inversa y homopolar las cuales dan como resultado:

- Pérdidas de potencia y energía.
- Calentamiento de máquinas, lo cual limita la capacidad de carga nominal.
- Propagación de desbalance a otros nodos de conexión de la red.

4.4 Características de la red de distribución operando con GD

Para esta configuración se utiliza el sistema eléctrico del ítem 4.3, pero adicionalmente se ingresan en funcionamiento las plantas menores de generación (planta Municipal, planta Intermedia y Planta Sancancio) para los 3 circuitos correspondientes. De esta manera se realizan simulaciones sobre los perfiles de tensión con el fin de conocer cuál es el comportamiento de la red de distribución conectada al SEP y con el ingreso de GD.

Se debe tener en cuenta que, para cada uno de los circuitos analizados existe su GD correspondiente y los resultados serán mucho más interesantes ya que hay dos ubicaciones diferentes lo que ayudará a obtener diferentes resultados.

Las gráficas resultantes de las curvas sobre los perfiles de tensión incluyendo en SEP y GD, se muestra en las Figuras 19, 20 y 21 para las cuales se expone los perfiles de tensión obtenidos en cada nodo de la red y adicionalmente la ubicación grafica de los nodos en los que se presenta el mayor y menor valor de tensión:

- **CIRCUITO MUNICIPAL:**
 - Menor nivel de tensión en el nodo M10727 correspondiendo a 1,043 p.u.
 - Mayor nivel de tensión en el nodo M10038 correspondiendo a 1,048 p.u.

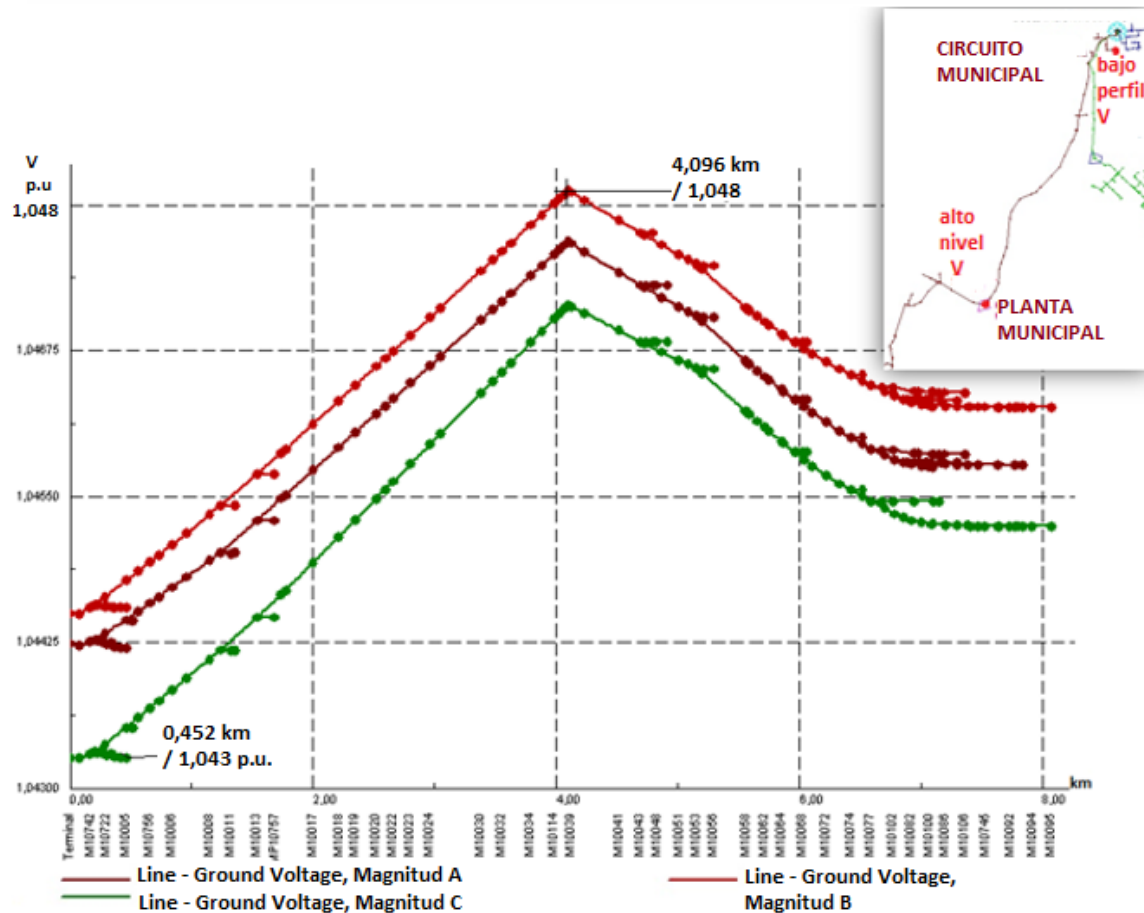


Figura 19. Perfiles de tensión Circuito MUNICIPAL – SEP y GD

- **CIRCUITO INTERMEDIA:**
 - Menor nivel de tensión en el nodo M24172 correspondiendo a 1,038 p.u.
 - Mayor nivel de tensión en el nodo M25457 y M13001 correspondiendo a 1,045 p.u. y 1,044 p.u.

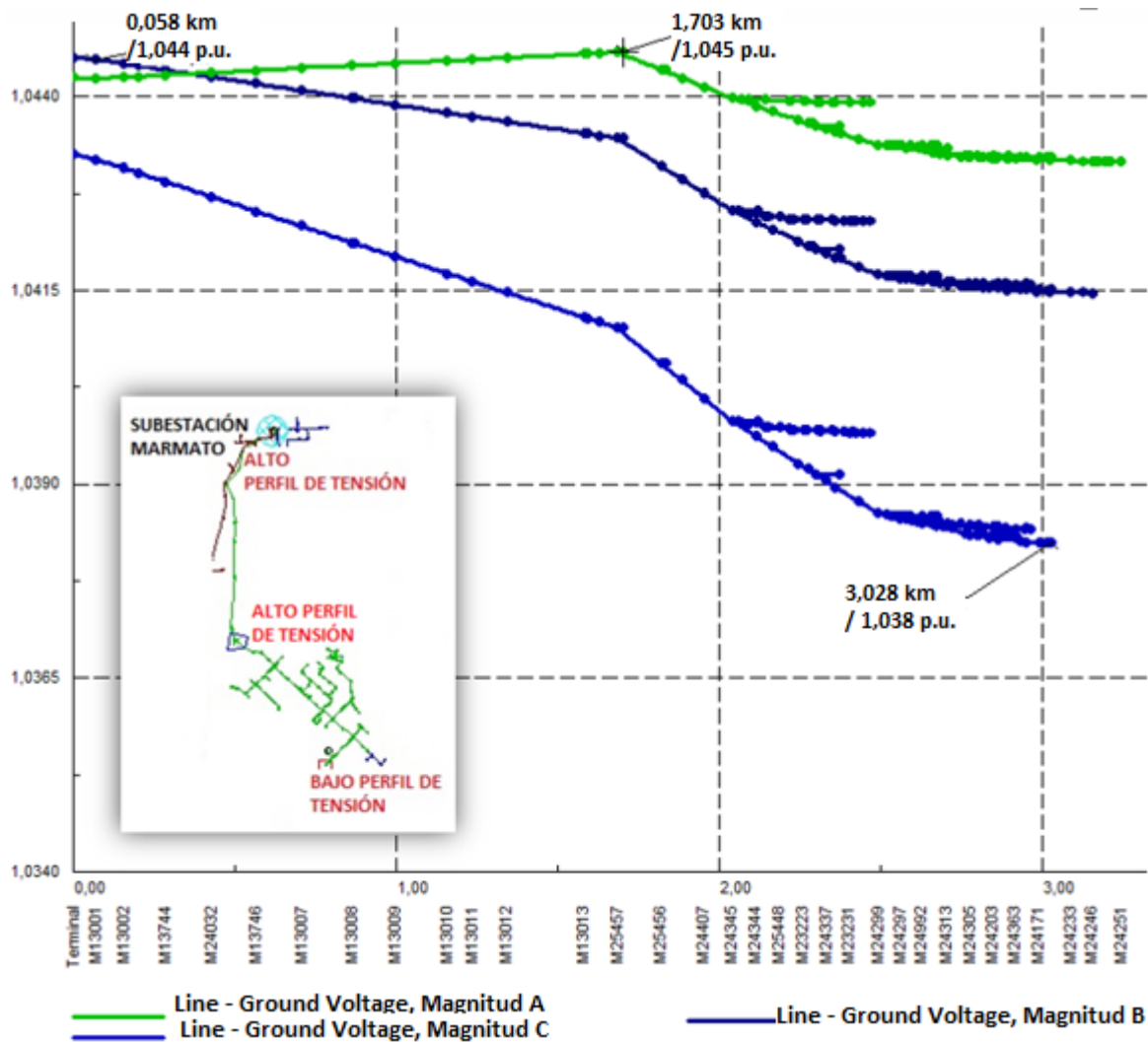


Figura 20. Perfiles de tensión Circuito INTERMEDIA – SEP y GD

- **CIRCUITO SANCANCIO:**

- Menor nivel de tensión en el nodo M14455 correspondiendo a 1,040 p.u.
- Mayor nivel de tensión en el nodo M14009 y M14301 correspondiendo a 1,044 p.u.

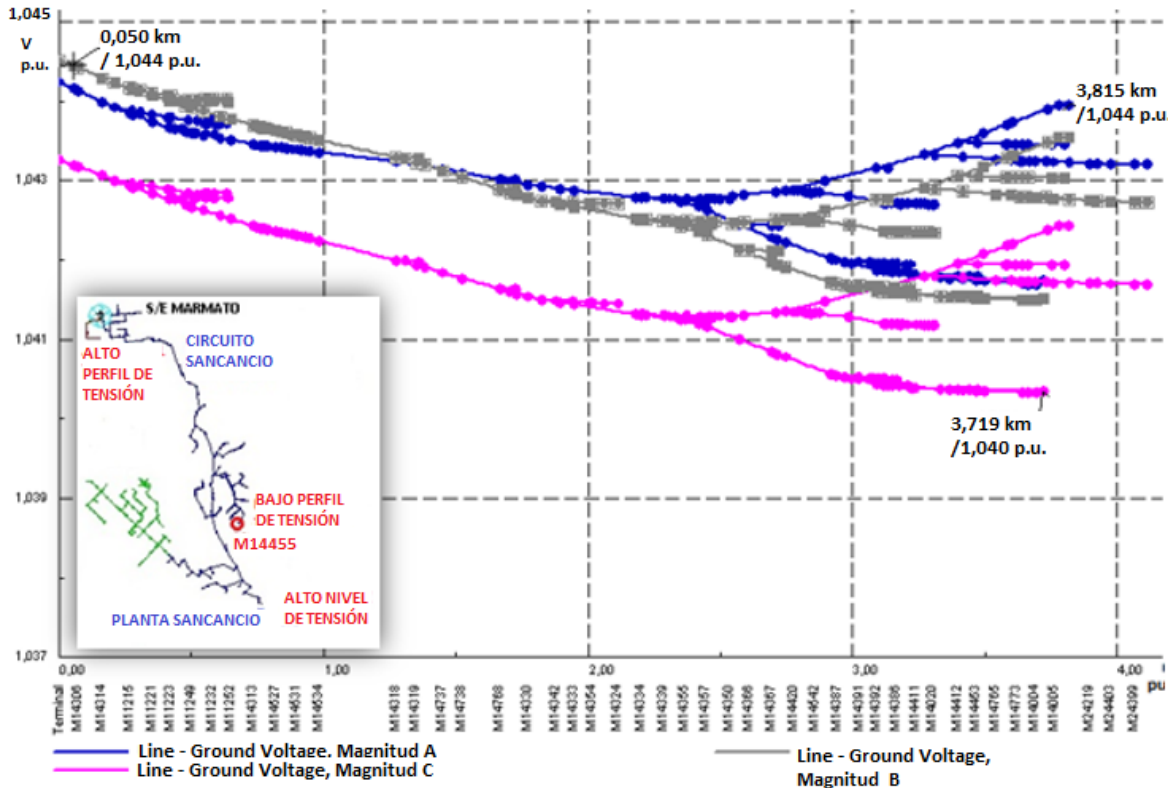


Figura 21. Perfiles de tensión Circuito SANCANCIO – SEP y GD

De los resultados obtenidos en las Figuras 19, 20 y 21 se puede observar que aunque el inicio de la curva corresponde a la tensión de referencia puesta por el SEP (1,044 p.u.), ahora la curva de los perfiles de tensión no es descendente como la del caso anterior, sino que para los circuitos Municipal e Intermedia presenta aumento de tensión en la mitad de la curva, y para el circuito Sancancio al final.

Debido a la variación de los perfiles de tensión presentados por las curvas y que el comportamiento es diferente en los 3 circuitos, se procede a identificar estos puntos en la red de distribución (también consignados en las Figuras 19, 20 y 21), lo cual da como resultado que para los circuitos Municipal e Intermedia quienes tienen instalada la GD en la mitad del circuito es allí donde se presenta el aumento de tensión por encima de la tensión reflejada en la barra principal aumentando de 1,044 p.u. a 1,048 p.u. y no solo modifica la tensión en el punto de conexión de la GD, sino que también los nodos adyacentes a esta pero en menor cantidad, dependiendo de la distancia a la que se encuentren del punto de conexión (entre mayor distancia menor tensión), este valor sería por ejemplo 1,0477 p.u. y 1,0476 p.u.

Por el contrario para el circuito Sancancio donde la GD se encuentra ubicada al final, es en este punto donde se presenta aumento de tensión, pero por estar ubicada al final las tensiones suben hasta llegar al mismo valor de la barra principal (1,044 p.u.).

El fenómeno presentado en los perfiles de tensión de la red para esta configuración debida a la inclusión de GD, fue descrito en el capítulo 2 donde se especificaban los impactos que conlleva la GD a la red y específicamente el aumento de tensión en el punto de conexión con el SEP.

Se consignan los resultados en la Figura 22, obtenidos de las simulaciones respecto a los perfiles de tensión de la red de distribución operando con GD.

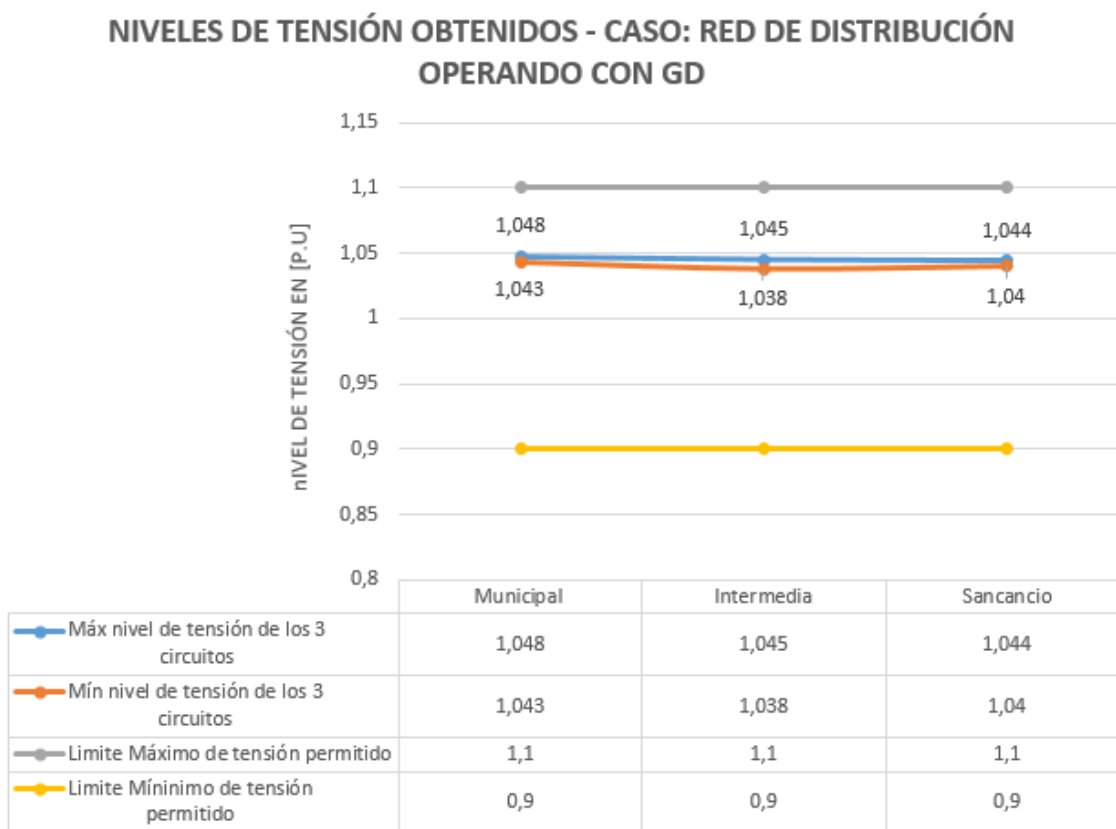


Figura 22. Perfiles de tensión obtenidos de la red de distribución operando con GD.

En la Figura 22 se evidencia que aún con el aumento de tensión que provocaron las plantas menores de generación (PCH) en la red, para este caso de estudio no presenta ningún inconveniente en cuanto a calidad del servicio y límites de seguridad, ya que aunque el

aumento de tensión en la red se puede percibir, es relativamente pequeño y no supera los límites permitidos por la normativa expuesta en el capítulo 3.

4.5 Características de la red de distribución operando de manera aislada

En la sección anterior se analizó el comportamiento de los perfiles de tensión del SEP con GD, ahora en esta sección se analizará la red de distribución operando de manera aislada es decir sin la alimentación del SEP solo con los GD de cada circuito.

Los circuitos seleccionados y las características de los generadores distribuidos mencionados anteriormente, permiten que ante una salida del SEP, estos continúen operando normalmente, ya sea de manera individual o los 3 en conjunto. En las siguientes graficas se muestran y analizan los resultados obtenidos:

En la Figura 23, se puede ver que el flujo de carga es nulo en la barra principal por la no existencia de conexión al SEP, la potencia que se ve reflejada en cada uno de los circuitos corresponde a parte de la suministrada ahora por la planta menor de generación PCH de cada circuito.

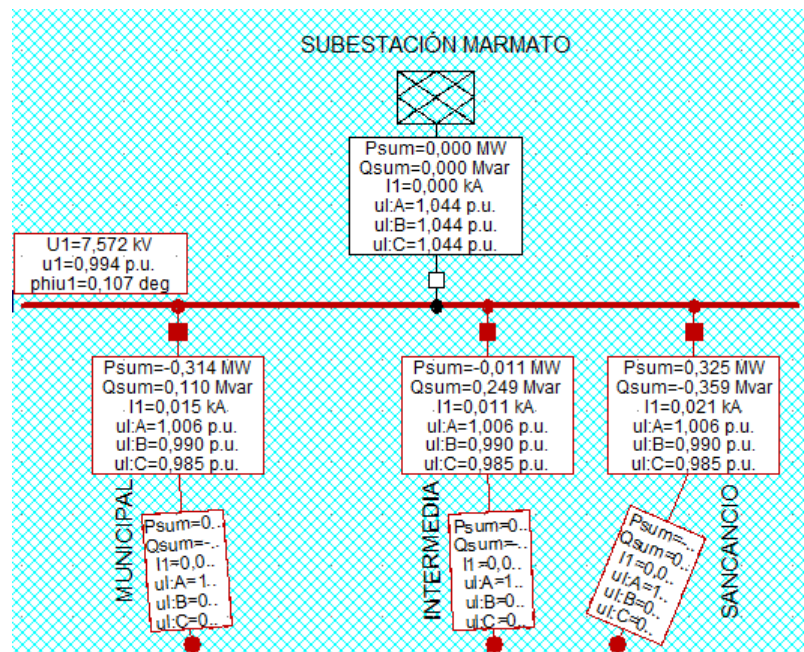


Figura 23. Flujo de carga solo con GD

Para este caso donde la red se encuentra aislada del SEP, las cargas de cada uno de los circuitos están siendo suplidas ahora por cada generador distribuido, la configuración que se realizó para estas simulaciones une los tres circuitos con sus 3 PCH.

Se revisa entonces la potencia entregada por cada PCH y así poder determinar el comportamiento de estas plantas al encontrarse operando de manera aislada:

- **Planta Municipal:** 0,685 MW y 0 MVAR
- **Planta Intermedia:** 0,870 MW y 0 MVAR
- **Planta Sancancio:** 0,731 MW y 0,665 MVAR

Por el valor de las potencias consignadas, se puede determinar que la planta Sancancio es quien controla los reactivos de la red, y es esta máquina ya que es la que cuenta con mayor potencia nominal correspondiente a 2MW, por lo tanto es asumida por DigSilent como la generación de referencia.

En cuanto a los perfiles de tensión en la red, ahora se comportan con un valor de tensión menor ya que solo están alimentados de los GD iniciando desde (1,008 p.u.). Como se tienen 3 generadores en la red para suplir los 3 circuitos se puede apreciar en la Figura 24 que los perfiles de tensión presentan aumento y disminución de la tensión a través de toda la curva, es decir, los nodos cercanos a los generadores presentan niveles de tensión altos pero a medida que se tienen nodos alejados del GD el nivel de tensión disminuye hasta encontrarse de nuevo con otro de los GD.

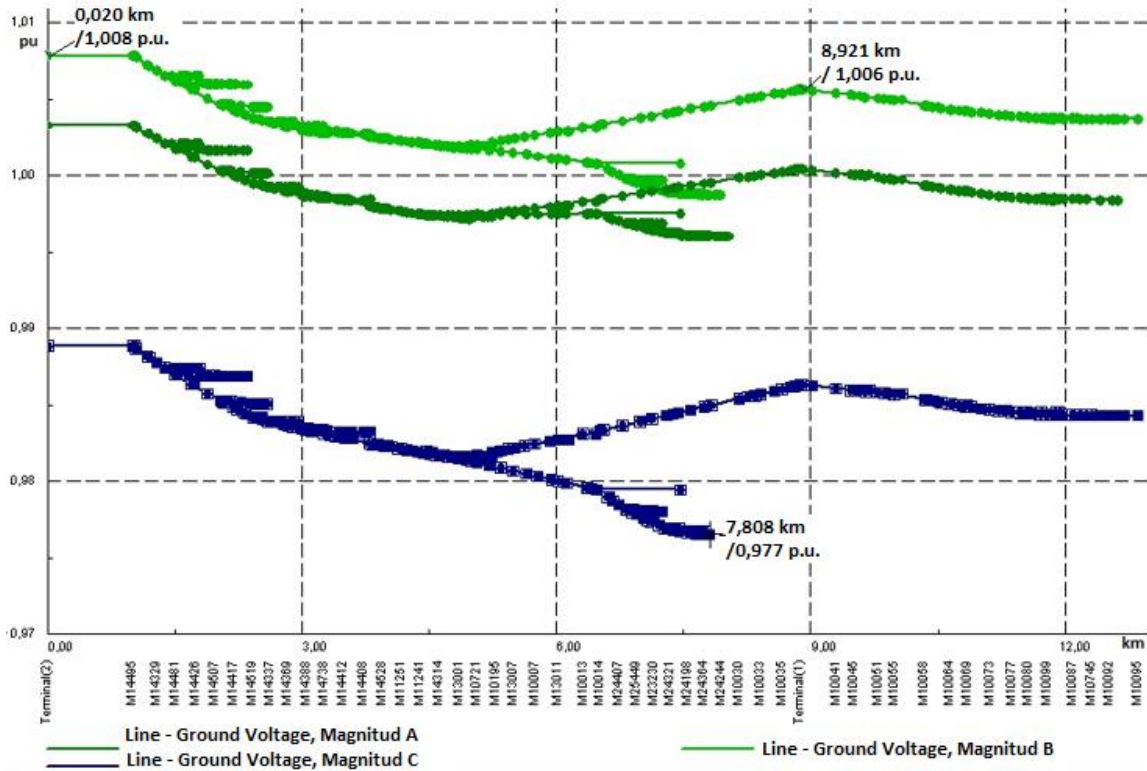


Figura 24. Perfil de tensión sobre la red operando de manera aislada.

En la Figura 24, también se puede apreciar como los perfiles de tensión comienzan con un nivel de tensión visto desde GD Sancancio considerado como la referencia y los demás nodos van disminuyendo su valor en tensión.

Ya que los generadores distribuidos se encuentran implementados en los 3 circuitos, aunque se presenta disminución de la tensión hasta 0,977 p.u. este valor no incumple los límites de tensión permitidos por lo que el servicio de energía se entrega sin problema a los usuarios de la red.

Como se mencionó anteriormente, para este caso los puntos de mayor y menor nivel de tensión que se presentan en la nueva red operando de manera aislada son equivalentes a (1.008 - 1.005 p.u.) y (0,977 p.u.), con el fin de brindar mayor análisis ante estos valores, se ubican físicamente en la red de distribución, los resultados se muestran en la Figura 25.

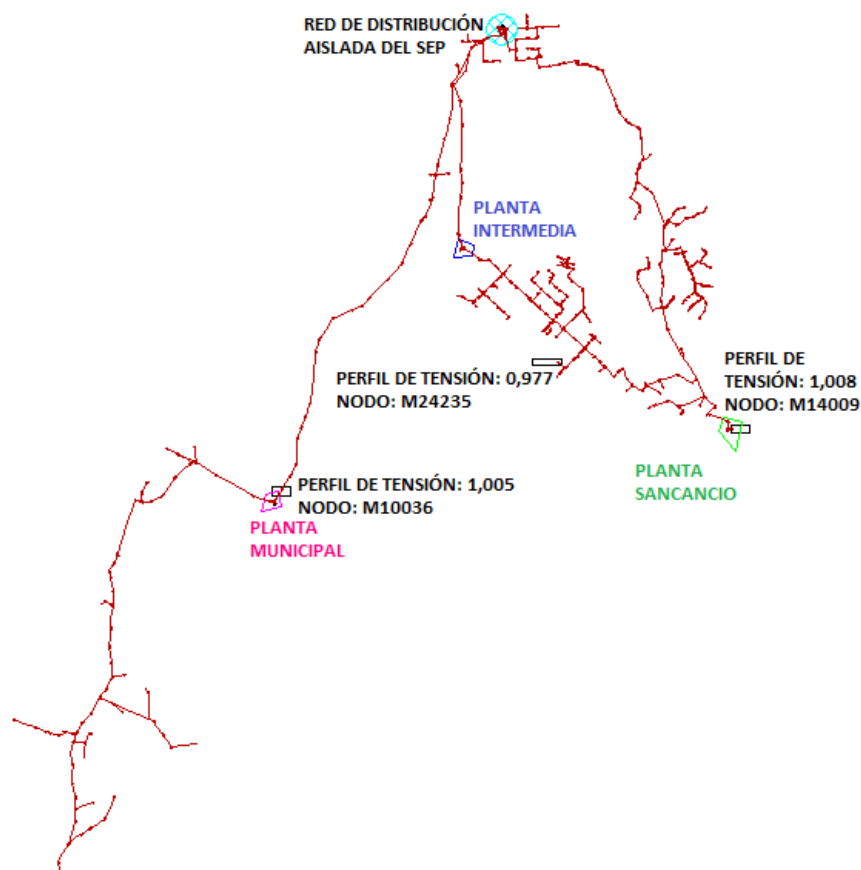


Figura 25. Ubicación perfiles de tensión en la red

Ante la ubicación de estos valores de tensión en los nodos correspondientes de la red, se identifica que el menor valor de tensión es registrado en el circuito Intermedia, esto se da debido a que en este punto se encuentran instaladas las cargas industriales para este circuito y dado su naturaleza inductiva, el factor de potencia es menor con respecto a las demás cargas del circuito las cuales corresponden a cargas resistivas, generando una mayor disminución de la tensión, que en otros puntos de la red.

Para efectos del desarrollo del trabajo que se está llevando a cabo, se realizarán simulaciones solo con un circuito operando de manera aislada con su propia GD, con el fin de observar como es el comportamiento en uno de ellos, el circuito que se eligió para analizar con la nueva configuración es el circuito Municipal, debido a la ubicación de la planta menor de generación ya que nos permite realizar un análisis más completo y que posee más cantidad de recursos distribuidos como el agua, ya que tiene dos ríos asociados a este del que se puede alimentar, lo cual facilita la instalación de demás plantas de generación.

4.5.1. Características de la red de distribución operando de manera aislada – Circuito Municipal

Para cumplir con la condición de tener solo un circuito operando de manera aislada, se desconectan los dos circuitos INTERMEDIA y SANCANCIO, y así se realizarán las simulaciones cuando solo el circuito MUNICIPAL este dependiendo solamente de su propio GD.

Para la nueva configuración, se realiza el estudio de flujo de carga presenciando que en la barra donde anteriormente estaba conectada el SEP y los otros dos circuitos ya no se presenta ningún consumo de potencia, pues ahora se comportan como el final de la línea. En la Figura 26 se consignan los resultados.

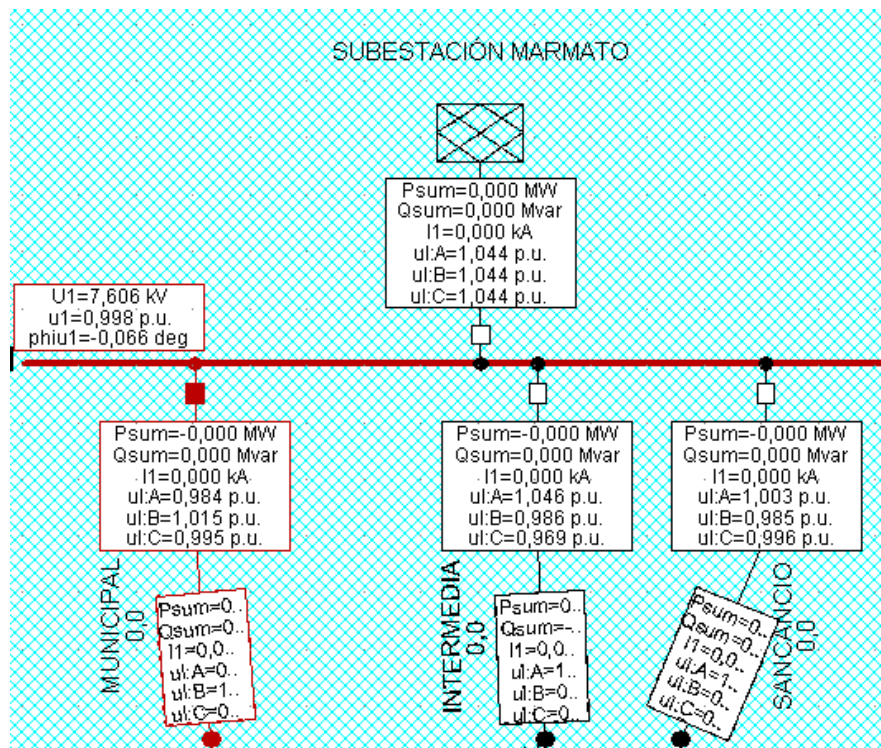


Figura 26. Flujo de carga – circuito Municipal operando de manera aislada con GD

Para este caso el generador asociado al circuito Municipal realiza un aporte al circuito en potencia de 0,370 MW y 0,107 MVAR, siendo en total la potencia activa y reactiva requerida por las cargas asociadas a este.

Debido a que ya es un solo GD es el quien debe ser la referencia y por lo tanto suplir las necesidades de la red, es por ello que inyecta tanto potencia activa como reactiva al circuito Municipal.

En la Figura 27, se registra la curva de los perfiles de tensión para el circuito Municipal operando de manera aislada.

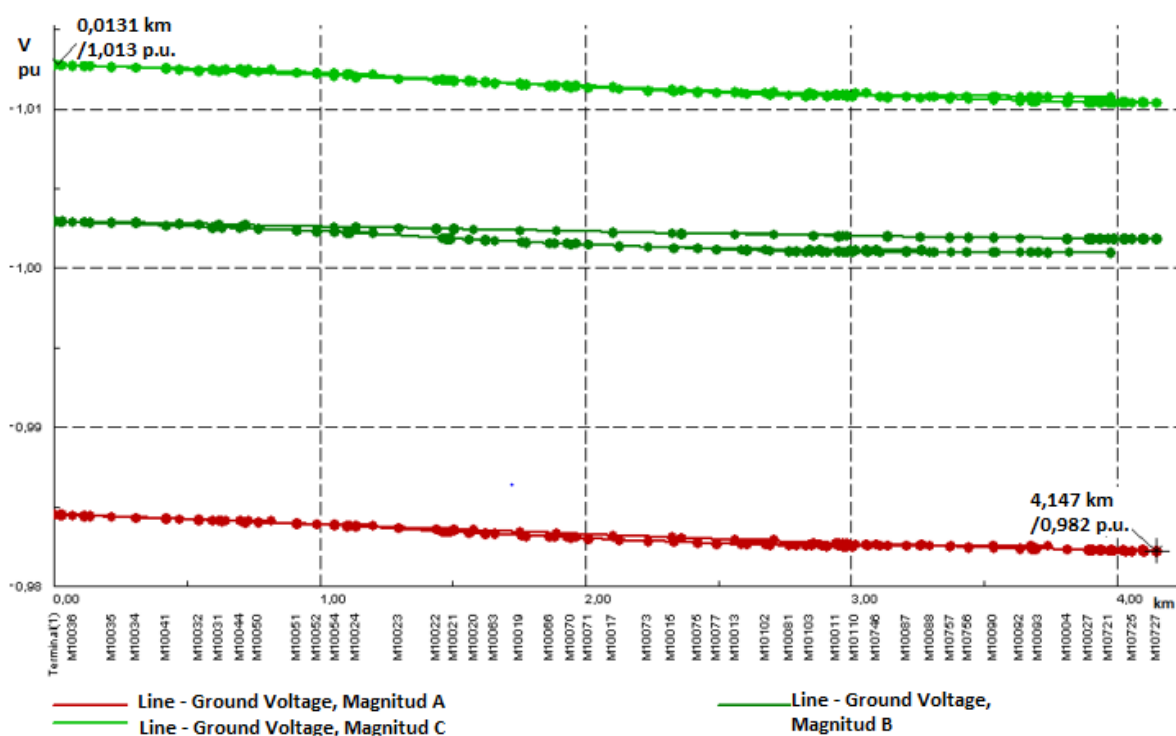


Figura 27. Perfiles de tensión – Circuito Municipal con GD

En cuanto al comportamiento de los perfiles de tensión en el circuito Municipal, es posible observar como primera medida que la longitud del circuito se reduce a la mitad ya que la GD está ubicada aproximadamente a 4 km de 8 km que tiene de longitud el circuito en total. Debido a esta ubicación los niveles de tensión comienzan con el valor de tensión asignado por el generador (1,013 p.u.) y va disminuyendo de acuerdo a la distancia de los nodos en la red, como el circuito municipal se divide entonces hacia arriba y hacia abajo

en la Figura 27, se puede ver que para cada fase tiene casi superpuestas dos curvas con aproximadamente los mismos valores de tensión, esto debido a que desde la mitad hacia los extremos se tendrá la misma distancia y por eso dicho comportamiento en los perfiles de tensión.

De igual manera se ubican los puntos de mayor y menor tensión en el circuito Municipal con el fin de dar más claridad al tema, Figura 28.

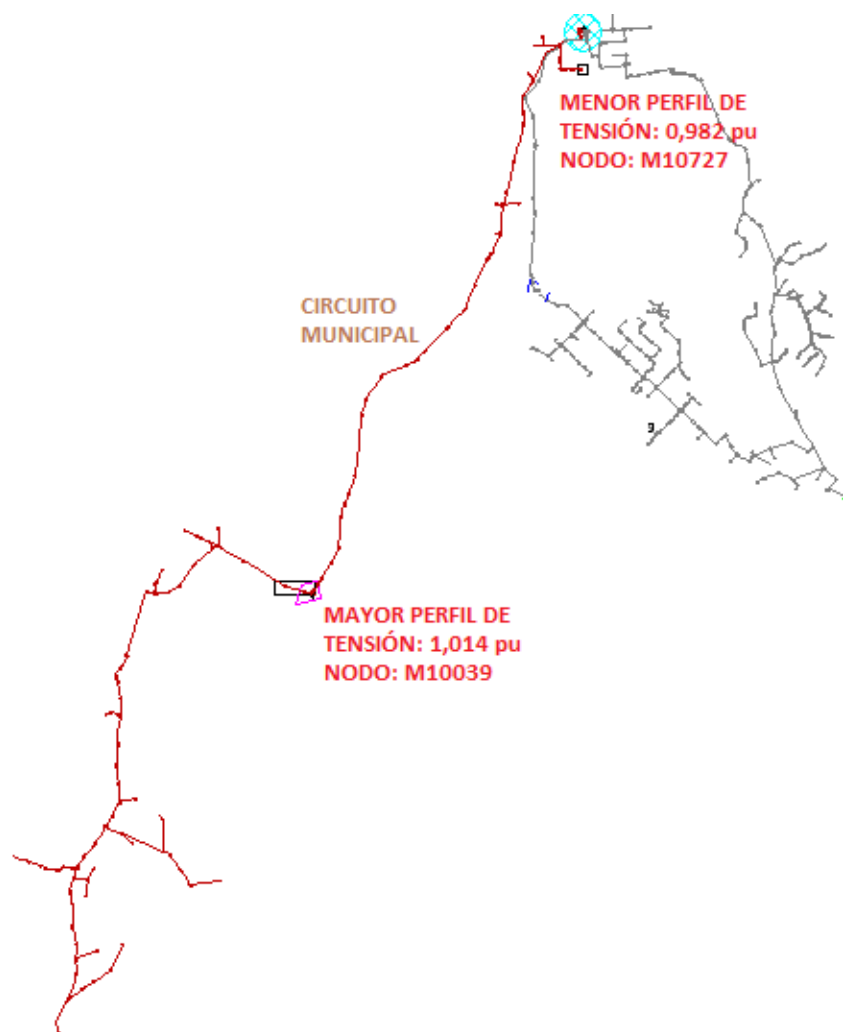


Figura 28. Ubicación del mayor y menor perfil de tensión para el circuito MUNICIPAL

Se puede ver que el mayor perfil de tensión, está ubicado donde se encuentra la planta menor de generación Municipal, y el menor valor de tensión en el extremo superior el cual es más alejado desde el punto de instalación de la GD.

Los perfiles de tensión se mantienen en los rangos permitidos siendo el mayor y el menor respectivamente 1,013 p.u. y 0,982 p.u., para este caso práctico en particular aun teniendo un solo circuito con GD puede suplir la carga que demanda la red. Se menciona que en los resultados fueron exitosos para este caso en particular ya que los resultados dependerán de cada configuración de red, lo que sí se debe tener en cuenta es que el GD deberá tener una capacidad acorde con lo requerido por la red para no presentar conflictos.

En la Figura 29 se puede ver la potencia entregada por el generador de la planta Municipal, y la cual es acorde al consumo del circuito con un factor de potencia de 0.96, correspondiendo a los resultados de las siguientes ecuaciones, donde se calcula el valor de potencia activa y reactiva que debe ser entregado a la red de acuerdo a su consumo en amperios.

$$I \text{ carga circuito Municipal} = \mathbf{16 \text{ Amp}}$$

$$S = \sqrt{3} * V * \frac{I_{carga}}{1000}$$

$$S = \sqrt{3} * 13,2 * \frac{16}{1000} = 0,3658 \text{ MVA}$$

$$P = S * fp$$

$$P = 0,3658 * 0,96 = \mathbf{0,3511 \text{ MW}}$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$$

$$Q = \sqrt{0,3658^2 - 0,3511^2} = \mathbf{0,1024 \text{ MVAR}}$$

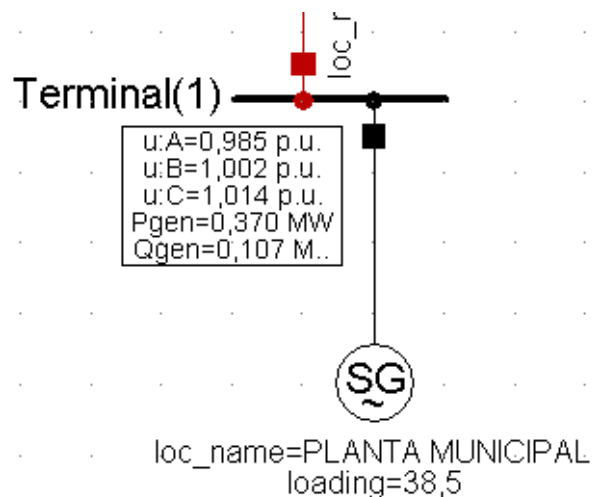


Figura 29. Potencia entrega por la Planta Municipal

Debido a que el generador del circuito municipal puede soportar toda la carga del mismo, se realizará la simulación donde la planta Municipal alimente los demás circuitos: Municipal, Intermedia y Sancancio con el fin de apreciar sus variaciones de acuerdo a la potencia suministrada a la red.

4.5.2. Características de la red de distribución operando de manera aislada – Planta Municipal soportando los circuitos Municipal, Intermedia y Sancancio

Se debe tener en cuenta que la nueva configuración de la red, hace que la planta Municipal sea quien de la referencia al sistema por lo tanto aunque su potencia nominal es 1 MW para efectos de simulación ella entrega lo requerido por la red, pero muestra el porcentaje de sobrecarga al que se ve enfrentado para poder suplir la potencia requerida. La Figura 30, da mayor claridad sobre el comportamiento del generador planta Municipal.

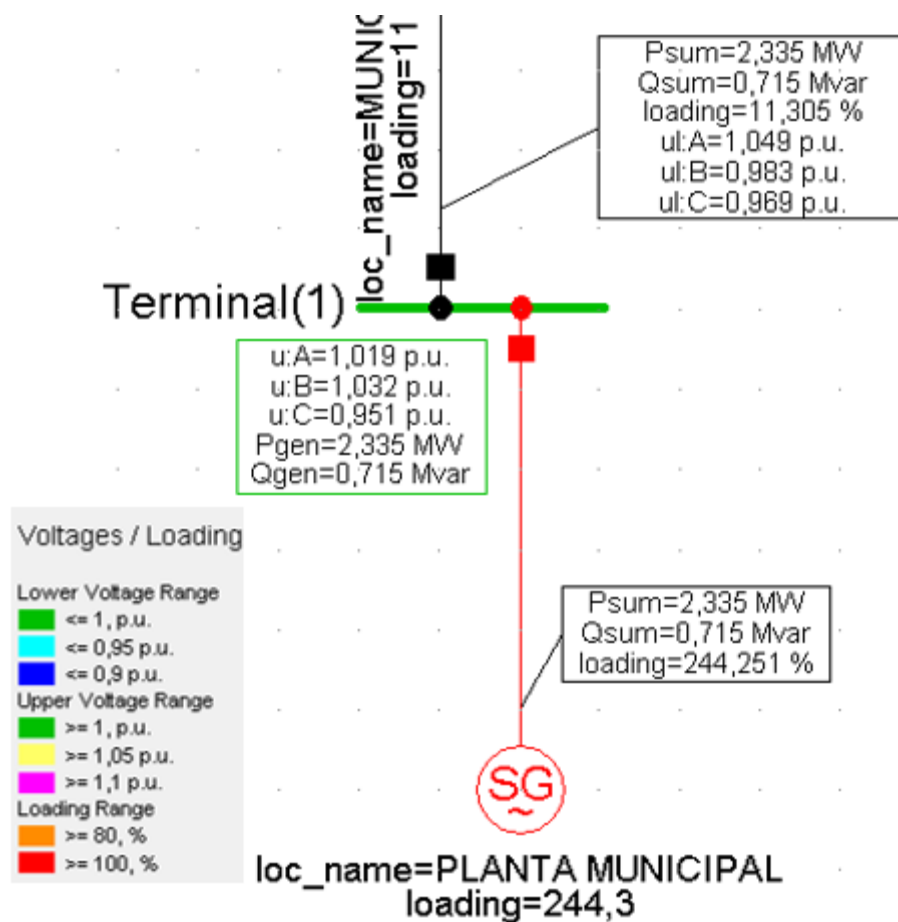


Figura 30. Cargabilidad 244% de la Planta Municipal soportando los 3 circuitos.

En la Figura 30, se evidencia que para dar servicio a los 3 circuitos, el generador de la planta Municipal tendría una sobrecarga del 244% y por lo tanto el color del GD es rojo, ya que supera el rango de cargabilidad permitido (el cual es parametrizado en DigSilent), la sobre carga presentada equivale a que el generador planta Municipal supe toda la carga conectada y por lo cual presenta los siguientes valores de potencia entregada a la red: 2,335 MW y 0,715 MVAR.

Teniendo la configuración donde se alimentan desde un solo generador los 3 circuitos, se analizan los perfiles de tensión en la red y los resultados obtenidos se pueden ver en la Figura 31.

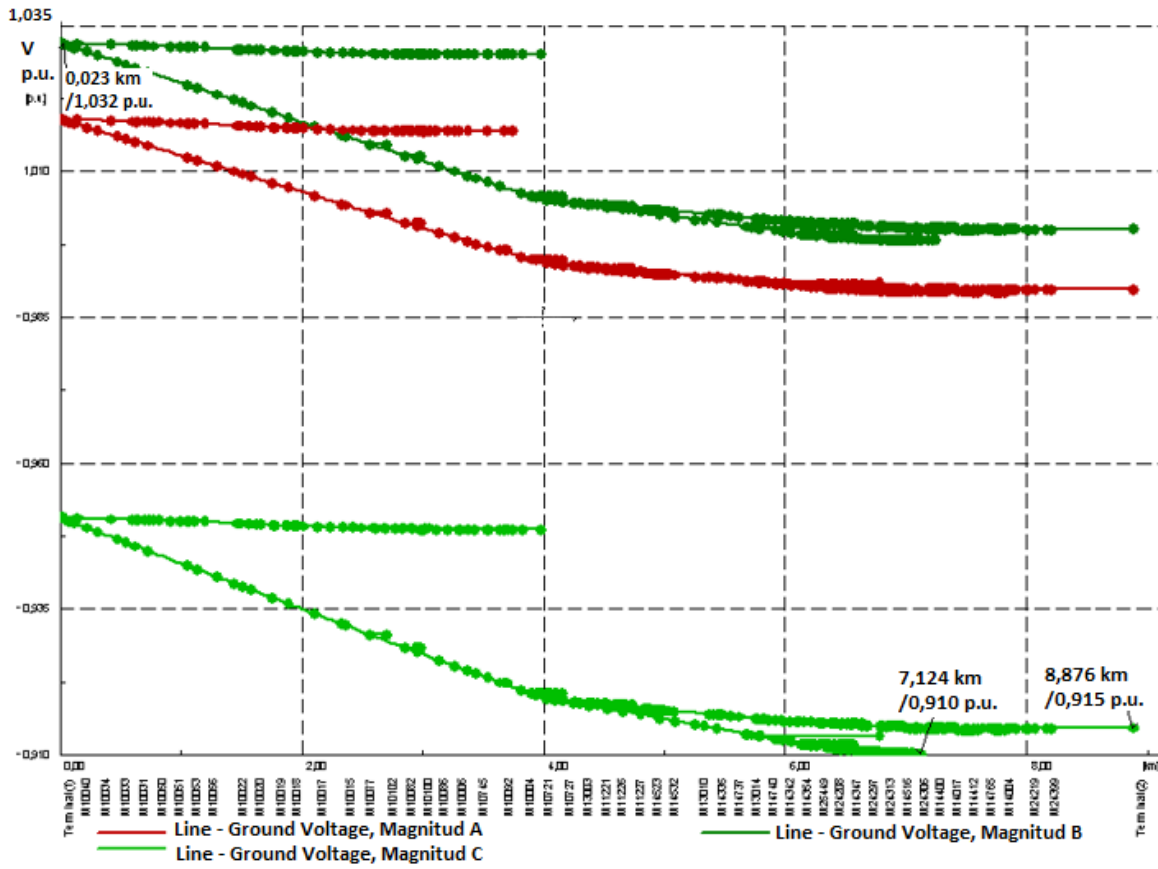


Figura 31. Perfiles de tensión planta Municipal supliendo los 3 circuitos.

Debido a que los 3 circuitos están alimentados solo por una fuente de generación, se puede apreciar en la Figura 31 que los perfiles de tensión toman como tensión de referencia la del generador planta Municipal (1,032 p.u.) pero de ahí en adelante para los demás nodos de la red se presenta disminución de tensión, el comportamiento de la red es correcto y similar en el expuesto para el ítem 4.3, ya que cuenta con un solo alimentador.

De igual manera, se ubican las variaciones de los perfiles de tensión en la red, valor máximo de tensión 1,032 p.u. y valor mínimo de tensión 0,910 p.u., de los valores de tensión obtenidos se puede apreciar que en 0,910 p.u. se encuentra en el límite mínimo permitido para encontrar la red en una buena operación.

Este comportamiento de perfiles de tensión se ve reflejado en la red como lo indica la Figura 32:

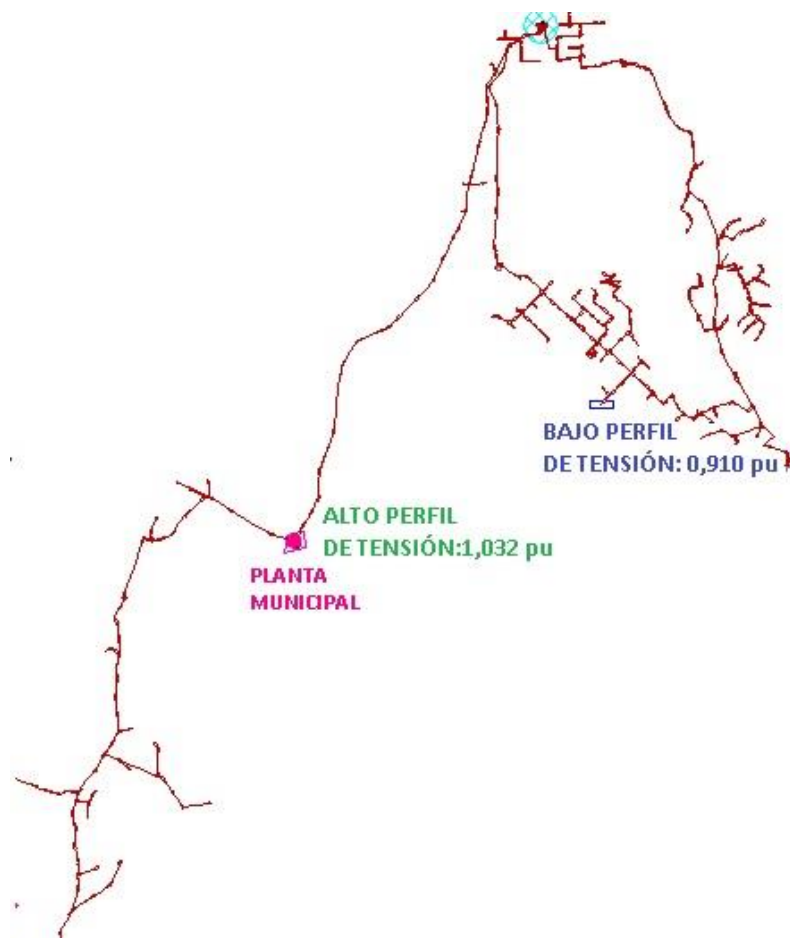


Figura 32. Ubicación perfiles de planta Municipal alimentando los 3 circuitos – Sobrecarga

Dado que para alimentar los 3 circuitos desde un solo generador se tendría alta cargabilidad de la planta Municipal, se debe realizar load shedding² o desconexión de carga en la red con el fin que la cargabilidad de la planta de generación no se vea afectada y por lo tanto se mejoren los perfiles de tensión anteriormente obtenidos, para la siguiente simulación se desconecta carga de tal manera que el consumo de la planta Municipal sea aproximadamente del 99%, de esta manera se pueden conservar los perfiles de tensión en los rangos permitidos y sin presentar sobrecarga.

² Se debe tener en cuenta que el proceso de **Load shedding** es empleado para interrumpir el servicio de energía en algunas zonas, cuando no hay suficiente generación para satisfacer la demanda de la red, pero se hace de forma programada, no como una desconexión de carga común generada por otras razones además, esta es una de las opciones que existen para evitar el colapso total de la red y no dejar sin servicio a todos los usuarios.

Su implementación en la red debe realizarse de una manera planificada y controlada, se desconectan áreas por tiempos determinados y que anteriormente fueron pactados con los usuarios finales, sin embargo estos se verán sujetos a la duración del evento. [45] [46]

En la Figura 33 se consignan los resultados obtenidos en cuanto a potencias entregadas del generador.

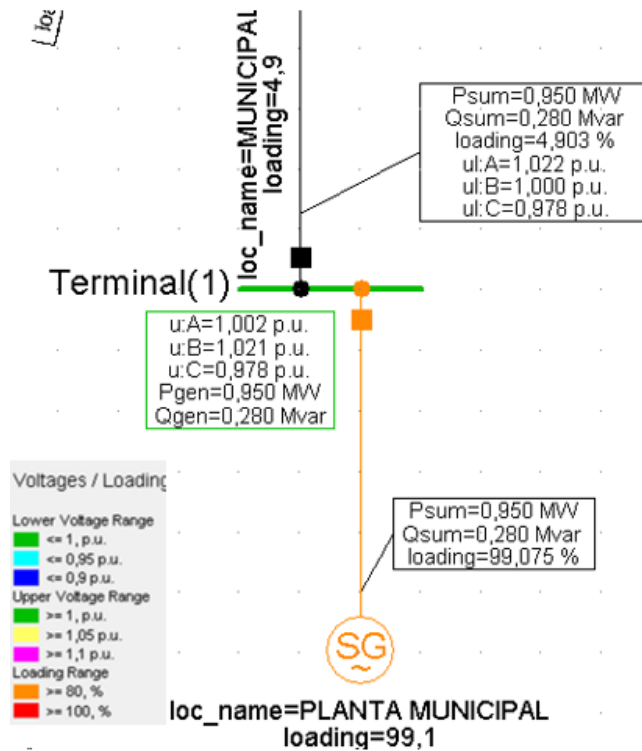


Figura 33. Cargabilidad 99% de la Planta Municipal soportando el circuito Municipal y parte del circuito Intermedia.

Realizando load shedding en la red (teniendo en cuenta las especificaciones en la nota de pie 2) y supliendo ahora solamente el circuito Municipal y parte del circuito Intermedia por medio de la planta Municipal, se consigue un porcentaje de cargabilidad del 99% aproximadamente en el generador planta Municipal, por lo cual en la Figura 33, se puede apreciar que ahora su color es naranja debido a que está entre el rango de 80% y el 100% correspondiente a los siguientes valores: 0,950 MW y 0,280 MVAR.

Los perfiles de tensión máximos y mínimos después de realizar load shedding están entre 1,021 y 0,96 p.u. lo cual cumple con los límites permitidos para el nivel de tensión, los resultados obtenidos se pueden apreciar en la siguiente grafica junto con su localización en la red. Figura 34.

Se debe tener presente que la curva de los perfiles de tensión, toma como valor de referencia la del generador planta Municipal (1,021 p.u.) pero de ahí en adelante para los demás nodos de la red se presenta disminución de tensión, el comportamiento es correcto y similar en el expuesto para el ítem 4.3 y 4.5, debido a que la red es alimentada por un solo generador (PCH).

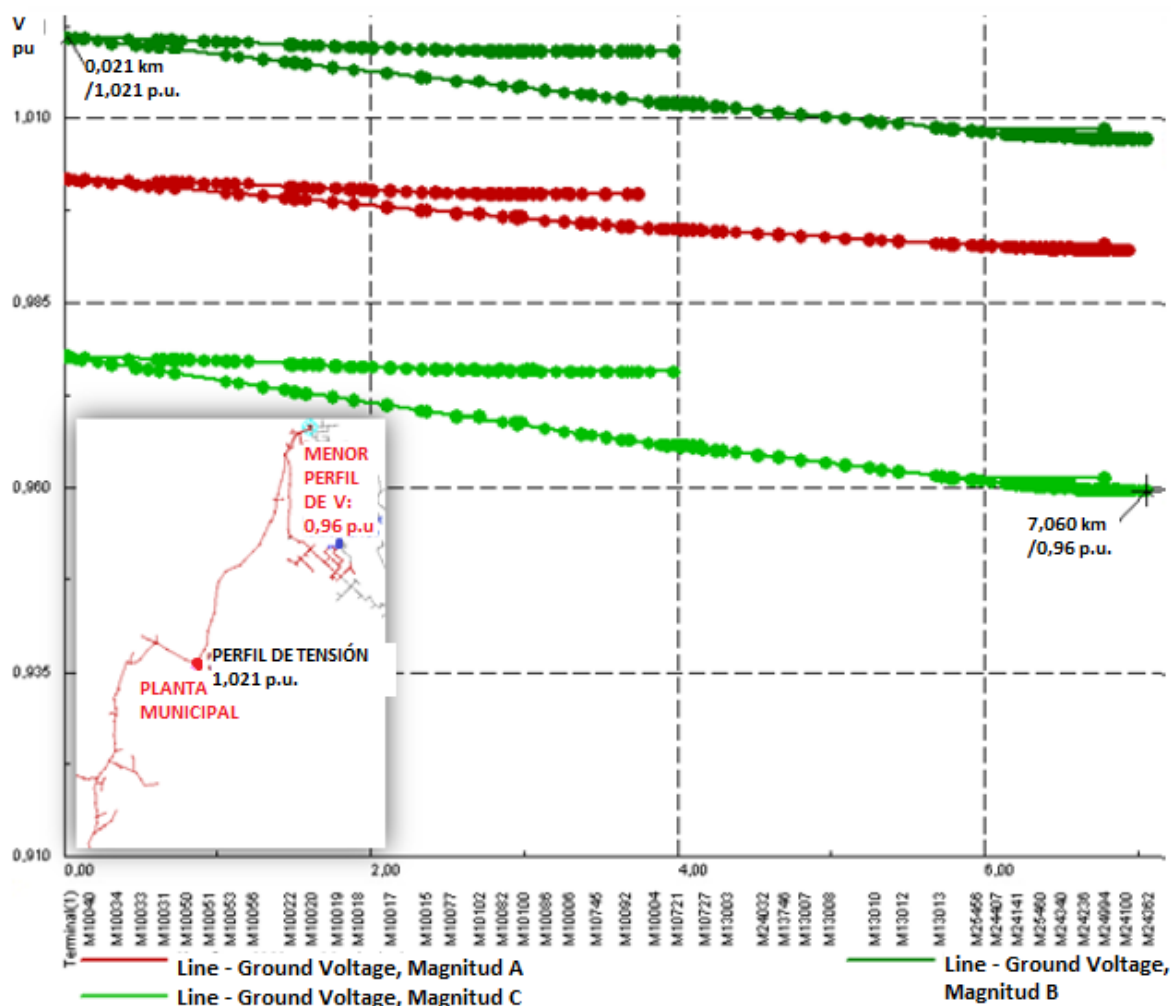


Figura 34. Perfil de tensión – Planta Municipal con circuito Municipal y una parte de Intermedia

Se puede concluir entonces que para obtener un buen desempeño en la red frente a los perfiles de tensión, se debe analizar la capacidad del generador distribuido que se implementaría en la misma, con el fin de que no sea subutilizado ni sobrecargado, y tener presente la cantidad de carga que este puede soportar para no obtener una fuerte disminución en los perfiles de tensión y no sobrecargar los elementos.

Lo anterior es entendido entonces como una buena planeación de la red de distribución operando de manera aislada, lo cual no traerá traumatismos a los usuarios finales ni al operador de red ante su ejecución.

4.5.3. Características de la red de distribución operando de manera aislada, ante diferentes puntos de localización de la GD

Recordando lo expuesto en la sección 4.4, donde se consideraban los cambios que inducía la generación distribuida a la red operando en conjunto con el SEP, se tenía que para esas simulaciones habían dos plantas de GD, una en la mitad del circuito y otra en el final, en cada uno de los casos se presencié un aumento de tensión en el punto en el que estaban conectadas las plantas de generación al SEP y por ende las barras adyacentes, sin importar su localización, ver figuras 19 y 21.

Los resultados obtenidos para el SEP con GD fueron:

- **Circuito Municipal – GD localizada en la mitad del circuito:**
 - Menor nivel de tensión en el nodo M10727 correspondiendo a 1,043 p.u.
 - Mayor nivel de tensión en el nodo M10038 correspondiendo a 1,048 p.u.

- **Circuito Sancancio – GD localizada al final del circuito:**
 - Menor nivel de tensión en el nodo M14455 correspondiendo a 1,040 p.u.
 - Mayor nivel de tensión en el nodo M14009 y M14301 correspondiendo a 1,044 p.u.

En esta sección, se analizará el impacto que genera la localización de la GD en diferentes nodos de la red correspondiente a un mismo circuito y operando de manera aislada.

Para realizar las simulaciones se empleará la configuración del circuito Municipal y se implementarán plantas de GD en diferentes puntos de la red, para cada una de las configuraciones se hará el análisis respectivo:

- **Ubicación de la planta Municipal en la mitad del circuito:**

Se referencian las Figuras 27 y 28, donde se pueden apreciar los perfiles de tensión con esta localización de la GD y la ubicación en la red de los puntos obtenidos en cuanto el máximo y menor valor de tensión.

Para este caso, los mayores perfiles de tensión se dan en la salida de la conexión de la planta es decir en el nodo M10038 con 1,013 y el nodo más lejano desde esta ubicación de la planta da en el nodo M10727 con 0,982 p.u. para este último, coincide que el nodo más alejado es ahora cerca de donde antes esta la alimentación de la SEP.

- **Ubicación de la planta Municipal al final del circuito:**

En esta ubicación el generador entrega la misma potencia a la red, equivalente a 0,371 MW y 0,107 MVAR y los perfiles de tensión tienen el siguiente comportamiento: el nodo donde existe mayor tensión es M10109 con 1,014 y el menor es M10727 con 0,977 p.u., en la figura 35 se puede apreciar los datos del generador y la ubicación en cuanto a los perfiles de tensión.

En la figura 35, se evidencia que el menor valor de tensión siempre dará en el nodo más lejano, tomando como referencia desde la conexión de la planta de generación al último nodo del circuito.

Para la figura 36, se muestra la curva de perfiles de tensión con el generador al final del circuito, en la cual se consignan los valores de tensión en cada uno de los nodos asociados al circuito.

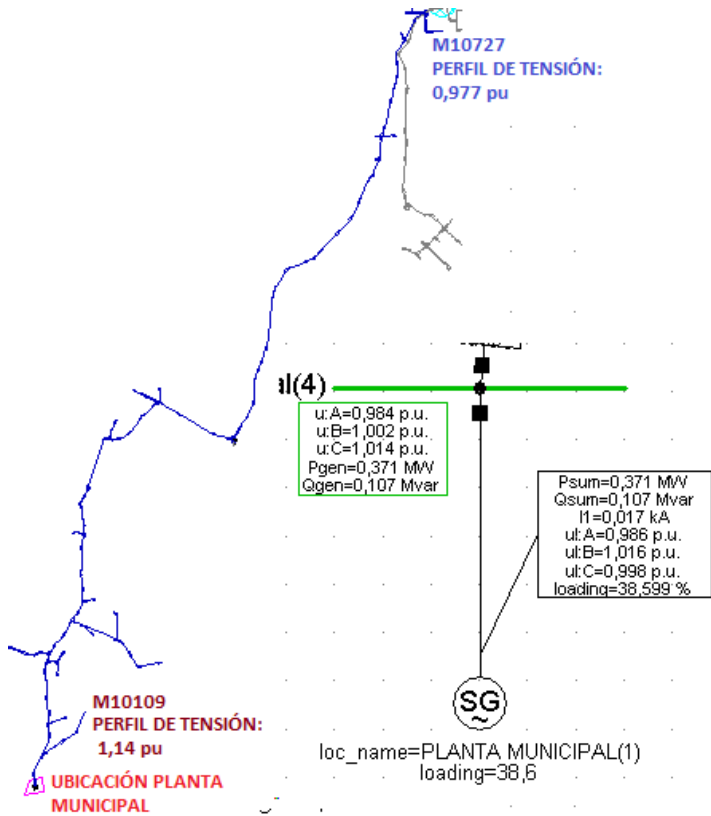


Figura 35. Ubicación de los perfiles de tensión GD al Final del circuito y comportamiento de la planta Municipal.

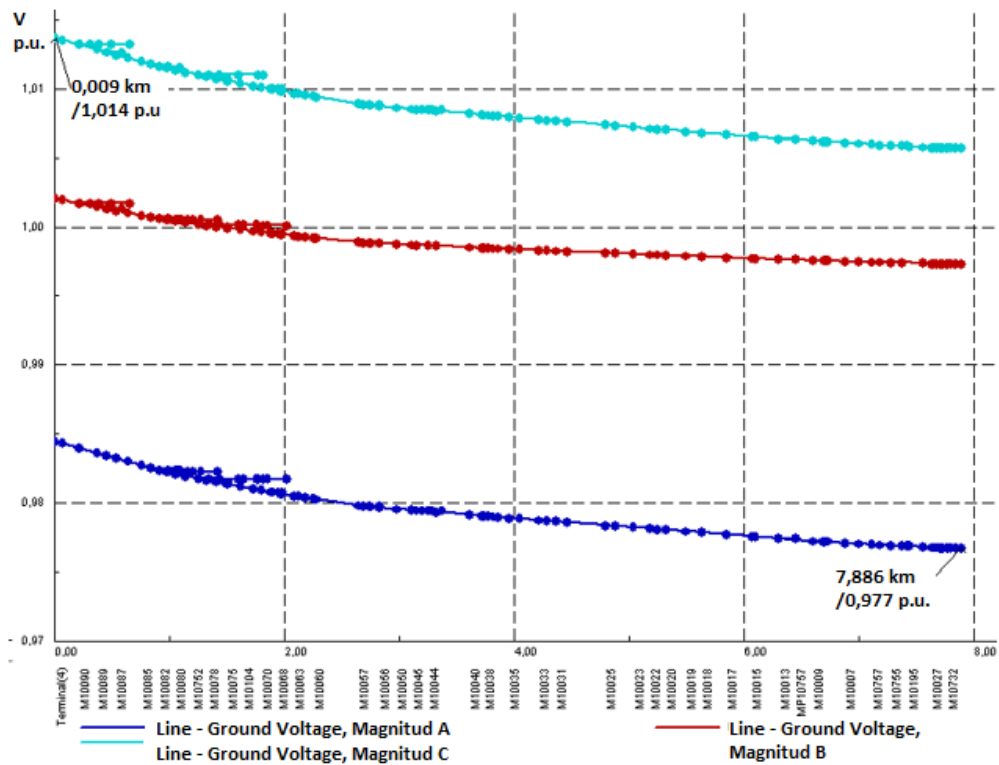


Figura 36. Perfiles de tensión - Planta Municipal ubicada al final del circuito

- **Ubicación de la planta Municipal al inicio del circuito:**

En esta ubicación el generador entrega la misma potencia a la red equivalente a 0,371 MW y 0,107 MVAR y los perfiles de tensión ahora presentan el siguiente comportamiento: el nodo donde existe mayor tensión es MTO23L12 con 1,014 y el menor es M10109 con 0,977 p.u. el cual corresponde en esta nueva localización de la GD al final del circuito. En la Figura 37 se pueden apreciar los datos del generador y la ubicación en cuanto a los perfiles de tensión en la red, para la Figura 38 se muestra la gráfica de perfiles de tensión con el generador al final del circuito.

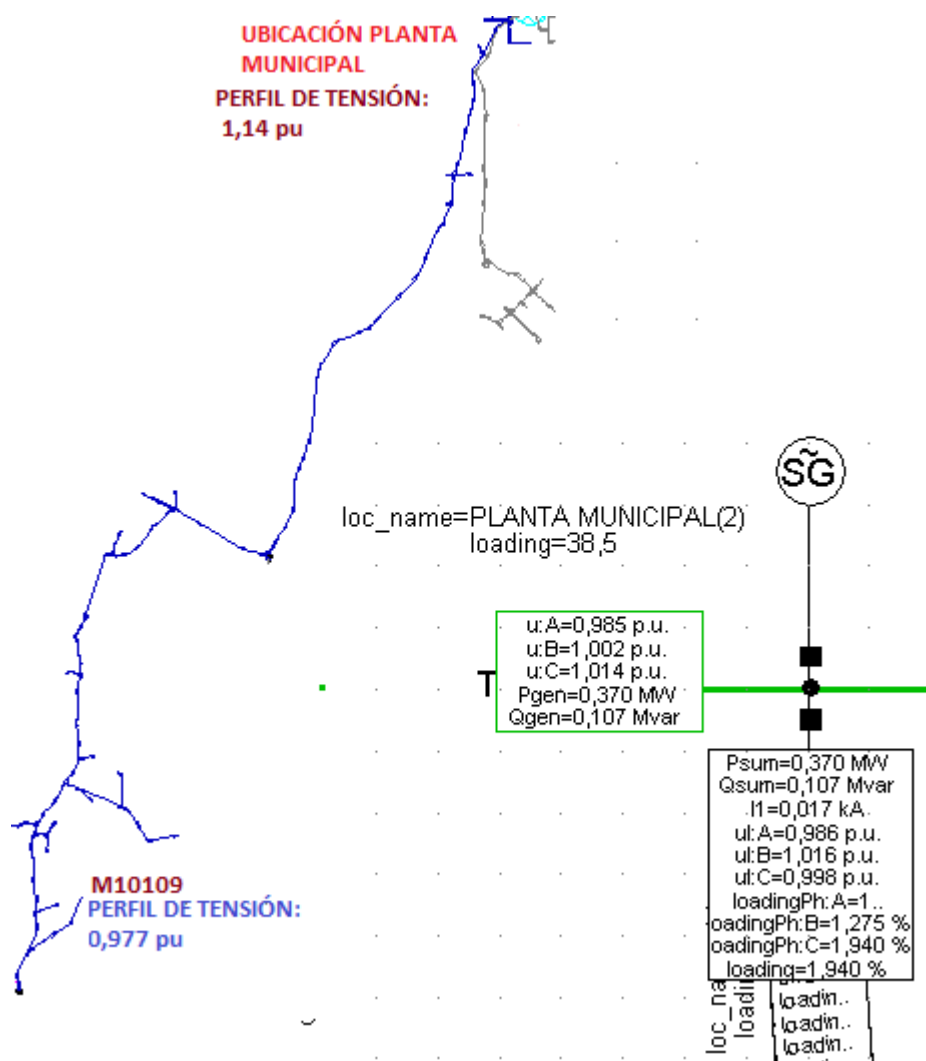


Figura 37. Ubicación de los perfiles de tensión GD al Inicio del circuito y comportamiento de la planta Municipal.

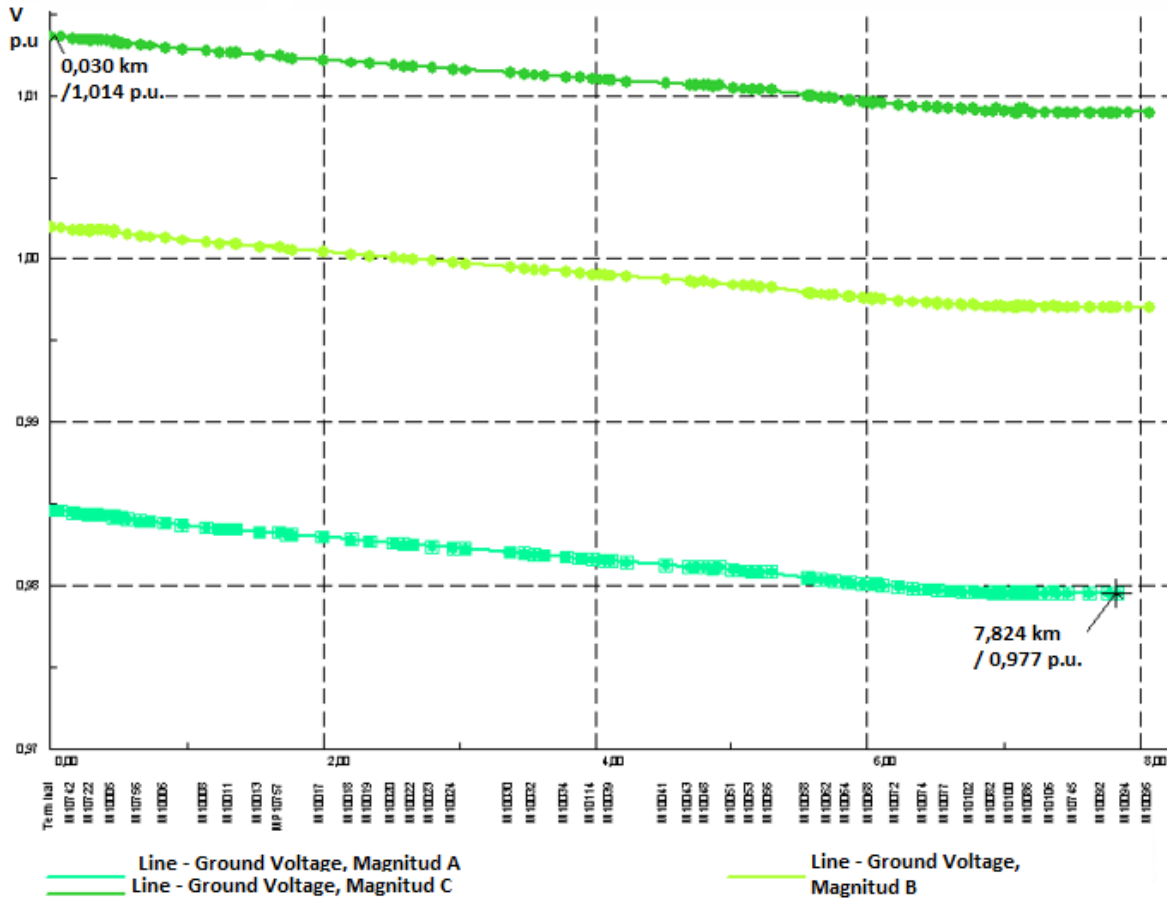


Figura 38. Perfiles de tensión - Planta Municipal ubicada al Inicio del circuito

Teniendo como insumo tres puntos diferentes de localización de GD en la red de distribución operando de manera aislada, se da como conclusión frente a las simulaciones realizadas que, sin importar el punto donde se instale la GD, siempre entregará la misma potencia requerida por el circuito y los reactivos necesarios para conservar los perfiles de tensión en la red.

En cuanto a los perfiles de tensión obtenidos con diferente localización de GD, siempre tendrá su mayor valor de tensión en el punto donde se realice su conexión y en los nodos adyacentes, después empieza a disminuir los valores de tensión entre más lejos se encuentren.

Para los casos de localización de la GD realizados al inicio, fin y mitad del circuito, se tiene que para el Inicio y Fin la distancia total del circuito que se considera es aproximadamente 8 km por lo cual la caída de tensión en el nodo más lejano es la misma de 0,977 p.u. para

los dos casos, lo contrario a lo que sucede cuando la GD está ubicada en la mitad del circuito ya que su distancia máxima hasta el nodo más lejano se reduce a la mitad siendo aproximadamente 4 km por lo cual la caída de tensión mínima en el nodo más lejano es 0,982 p.u. Se tiene entonces que es más beneficioso instalar la GD en la mitad del circuito ya que no tendrán problemas por bajas tensiones en los nodos más lejanos.

También se puede apreciar de las simulaciones realizadas en la sección 4.4 que la localización de la GD en un circuito operando de manera conectada al SEP, se tienen perfiles de tensión altos tanto en el punto de conexión de la SEP como en el punto de localización de la GD, se debe tener en cuenta que en este caso la GD ubicada en la mitad del circuito hace elevar las tensiones a 1,048 p.u. (Figura 19) mientras que la localizada en el final del circuito eleva las tensiones en este punto a las mismas tensiones de la SEP siendo 1,044 p.u. (Figura 21).

4.5.4. Características de la red de distribución operando de manera aislada, ante mayor penetración de GD. En un solo circuito MUNICIPAL

En esta parte del trabajo, se quiere analizar como es el comportamiento de una red de distribución operando de manera aislada ante la penetración ascendente de generación distribuida y el comportamiento de cargabilidad para cada uno de los GD y los nuevos perfiles de tensión de la red. Análisis para la cual se incluirán más generadores distribuidos y se modelará su comportamiento en la red, para desarrollar las simulaciones se escoge como base el ejercicio del ítem 4.5.2 donde la planta Municipal presenta un porcentaje de generación del 100% con el fin de suplir la carga del circuito Municipal y parte del circuito Intermedia.

Se realizaran entonces las siguientes simulaciones con diferentes niveles de penetración en la red:

1. RED OPERANDO DE MANERA AISLADA CON 1 GENERADOR DISTRIBUIDO:

Los resultados sobre esta configuración se pueden apreciar en las figuras 33 y 34 donde el generador Planta Municipal 1 está suministrando a la red 0,950 MW y 0,280 MVAR, adicionalmente los perfiles de tensión son 1,021 y 0,96 p.u. máximos y mínimos respectivamente, se debe tener en cuenta que está planta se encuentra ubicada en la mitad del circuito.

2. RED OPERANDO DE MANERA AISLADA CON 2 GENERADORES DISTRIBUIDOS:

Se agrega una nueva planta de generación al circuito Municipal, la cual tiene las mismas características de la planta ya existente.

Los resultados para de la configuración se pueden apreciar en la Figura 39, donde el generador Planta Municipal 1 está suministrando a la red 0,270 MW y 0,284 MVAR y el nuevo generador instalado Planta Municipal 2 está suministrando a la red 0,685 MW y 0 MVAR.

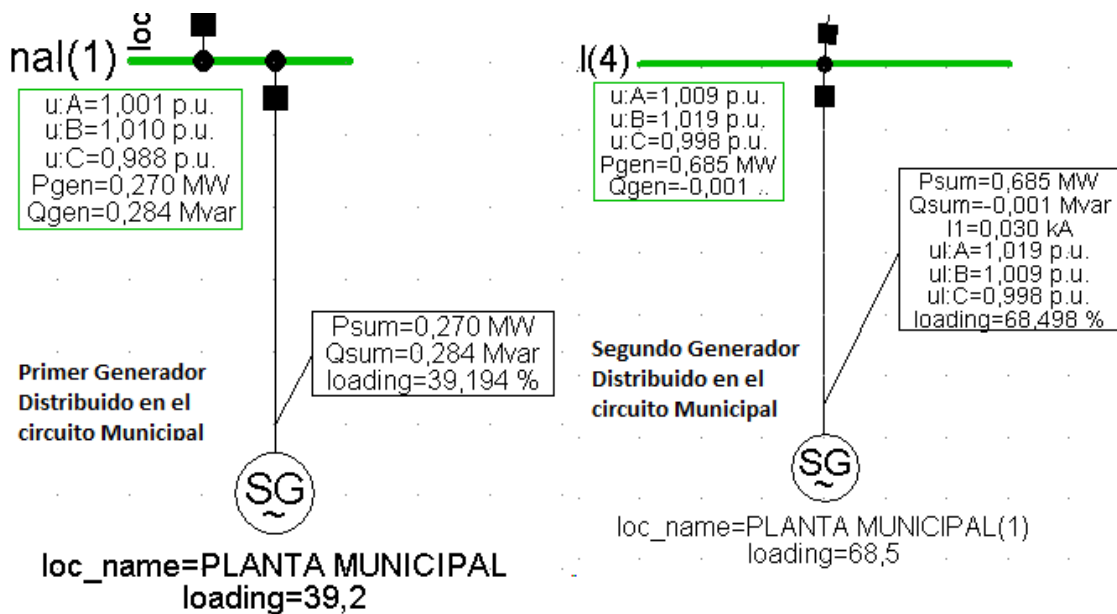


Figura 39. Comportamiento de los 2 generadores en el circuito Municipal

Se puede ver que entre las dos plantas están aportando la potencia activa requerida por el circuito y uno de ellos considerado como la referencia de la red aportara los reactivos necesarios, siendo en este caso Planta Municipal 1.

Los perfiles de tensión para esta configuración son 1,019 y 0,970 p.u. máximos y mínimos respectivamente, en el segundo GD conectado también se presenta el mismo fenómeno en el cual se aumentan los perfiles de tensión de la red.

La curva característica de los perfiles de tensión cuando se incluyen 2 GD en la red, se puede ver en la Figura 40 y 41, junto con la ubicación de los perfiles de tensión en la red.

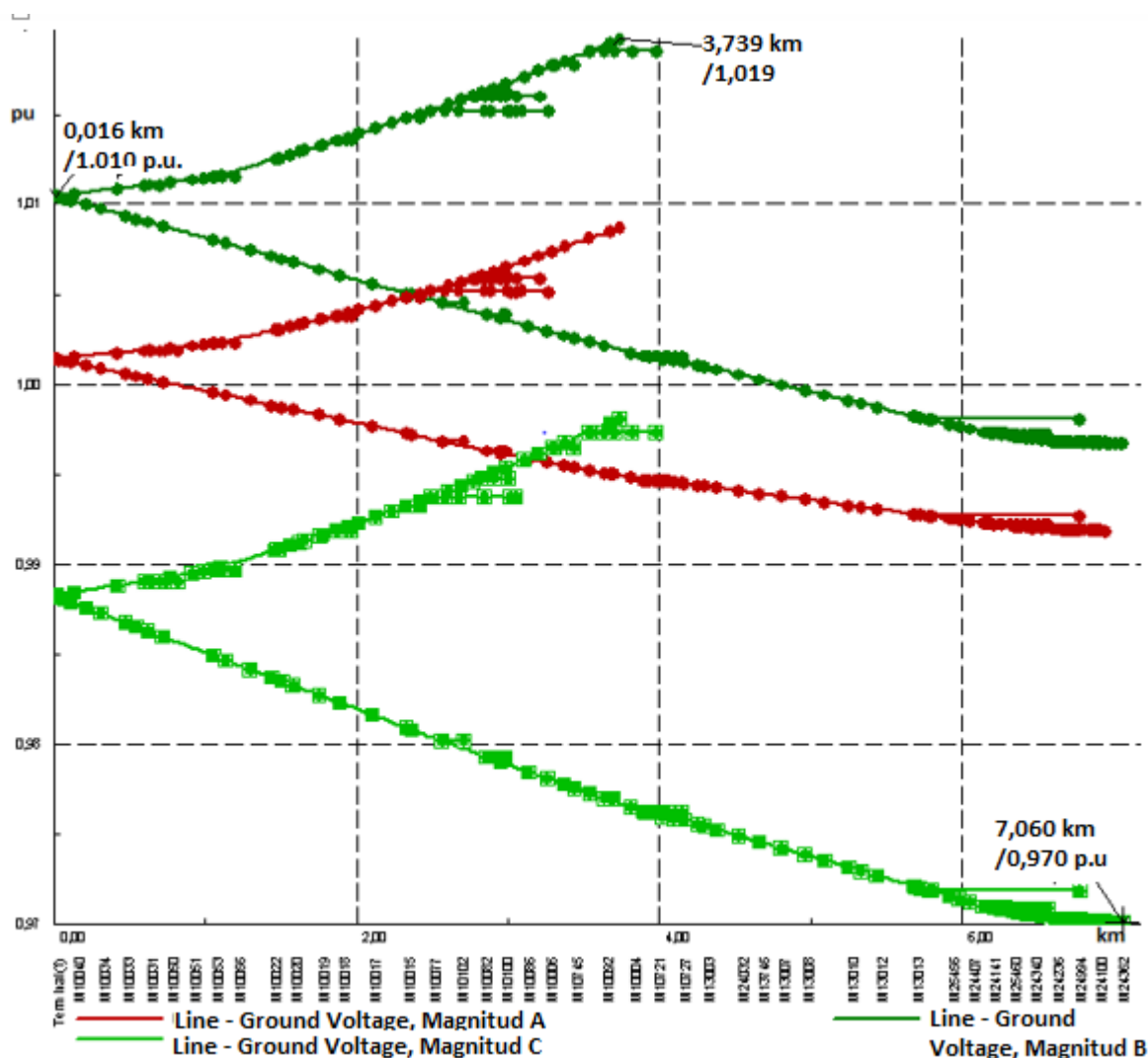


Figura 40. Perfiles de tensión – 2 generadores en el circuito Municipal ubicados a la mitad y final.

En la Figura 40 los perfiles de tensión son tomados desde la planta municipal 1, y es desde donde comienza la curva con un valor de tensión de (1,01 p.u.), se ve que los perfiles de tensión van aumentando debido a que todo este trayecto corresponde de la parte de la mitad del circuito hacia abajo, ya que fue al final donde se instaló la nueva planta de generación y por ello el aumento de tensión en estos nodos, hacia la parte de arriba del circuito las tensiones empiezan a disminuir ya que no cuenta con ninguna planta de generación para este lado y adicionalmente es donde se presenta mayor distancia entre la planta de generación y los nodos. La ubicación de estos puntos en la red de distribución se puede ver en la Figura 41.

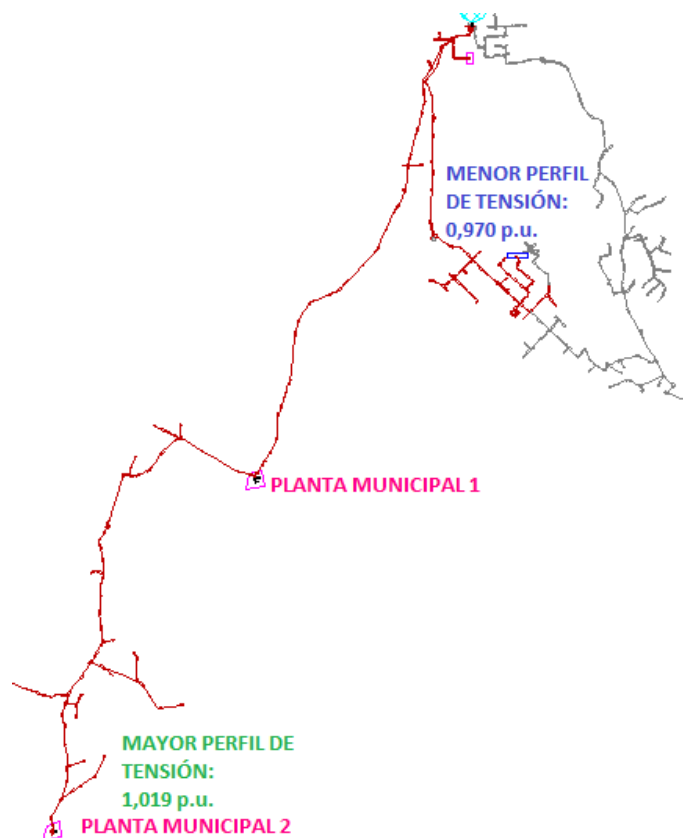


Figura 41. Ubicación de los perfiles de tensión con GD a la mitad y al final del circuito.

3. RED OPERANDO DE MANERA AISLADA CON 3 GENERADORES DISTRIBUIDOS:

Se agrega una nueva planta de generación para el circuito municipal, la cual tiene las mismas características de las 2 ya existentes.

Los resultados para esta configuración se pueden apreciar en la Figura 42 donde el generador Planta Municipal 1 está suministrando a la red 0,420 MW y 0,278 MVAR, el generador instalado Planta Municipal 2 está suministrando a la red 0,685 MW y 0 MVAR y la nueva Planta Municipal 3 suministra a la red 0,110 MW y 0,168 MVAR, se puede ver que entre las tres plantas están aportando más de la potencia activa requerida por el circuito y dos de ellos aportan más de los reactivos necesarios.

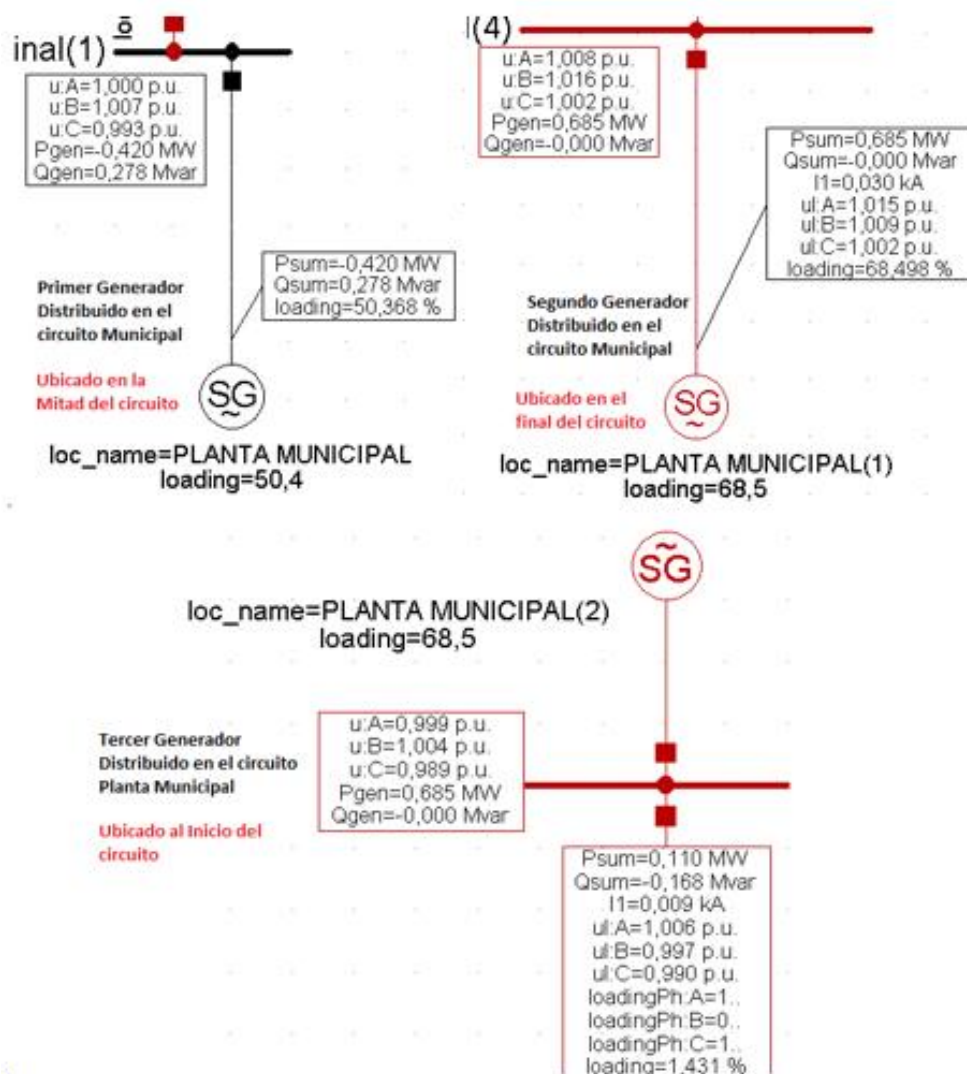


Figura 42. Comportamiento de los 3 generadores en el circuito Municipal al Inicio, Final y Mitad.

El aumento de la potencia suministrada a la red, teniendo 3 GD instalados en la misma, se debe al que en este caso se presentaría mal dimensionamiento de la red, y por lo cual se entrega mayor potencia de la que necesita la red de distribución generando pérdidas en el sistema.

Los perfiles de tensión para esta configuración son 1,016 y 0,983 p.u. máximos y mínimos respectivamente, en el tercer generador distribuido conectado también aumentan los perfiles de tensión de la red. Este aumento de tensión en el nodo más lejano en el cual que para los casos anteriores siempre era el de menor valor, es debido a la integración del tercer generador cerca a este punto y por lo tanto contribuye al aumento de tensión en este y los nodos adyacentes.

La curva característica se puede ver en la Figura 43 y 44 junto con la ubicación de los perfiles de tensión en la red.

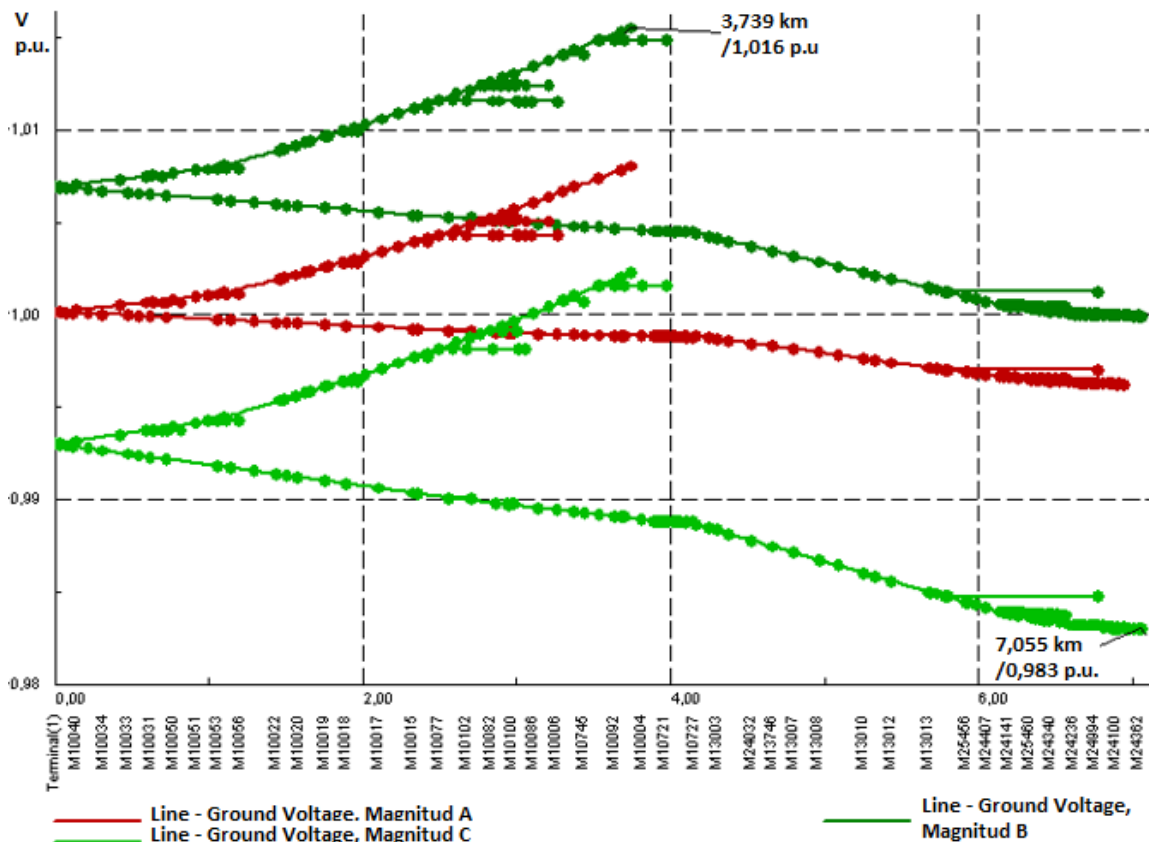


Figura 43. Perfiles de tensión – 3 generadores en el circuito Municipal ubicados al inicio, mitad y final de la red.

Aunque para este caso el mayor nivel de tensión también se aprecia en la planta Municipal 2 ubicada al final y el menor valor en el nodo M24362 que fue el mismo valor de tensión obtenido en el ejemplo anterior, en esta ocasión es mayor lo que quiere decir que con 3 generadores se pueden mejorar los perfiles de tensión en los nodos más lejanos de la red. Siempre y cuando se dé una buena distribución a través de la red de los generadores a instalar, para cumplir esto se debe validar los puntos donde los perfiles de tensión estén bajos y cerca de estos implementar la planta de GD.

La Figura 44, explica de una mejor manera el comportamiento de la red.

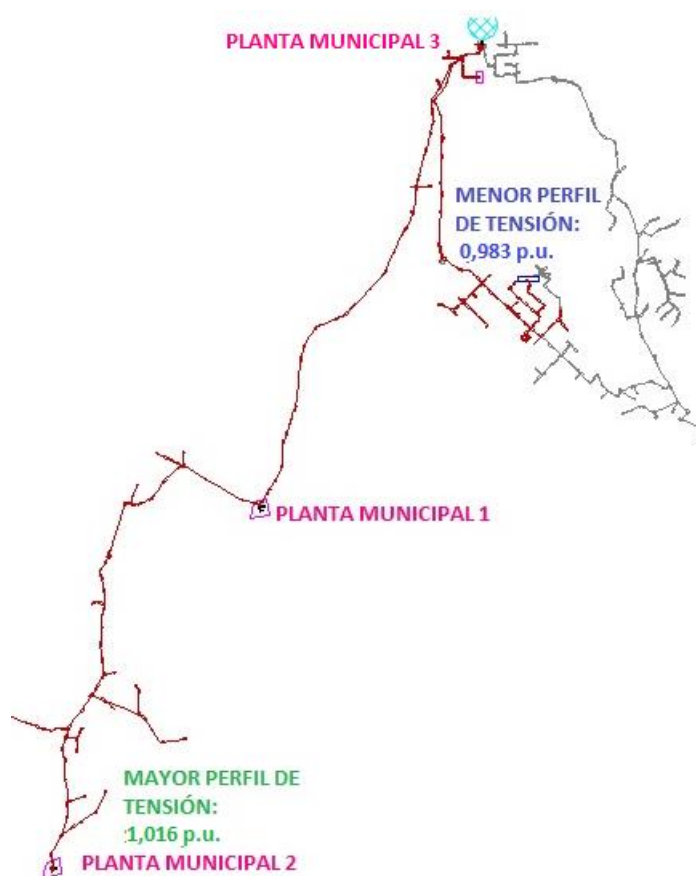


Figura 44. Ubicación de los perfiles de tensión con GD al inicio, mitad y final del circuito.

4. RED OPERANDO DE MANERA AISLADA CON 3 GENERADORES DISTRIBUIDOS CERCA:

Se agregan ahora 3 plantas de generación en el circuito municipal pero en la misma zona de conexión teniendo las mismas características técnicas que se han utilizado anteriormente.

Los resultados para esta configuración se pueden apreciar en las Figura 45, donde el generador Planta Municipal 1 está suministrando a la red 0,420 MW y 0,280 MVAR, el generador instalado Planta Municipal 2 está suministrando a la red 0,685 MW y 0 MVAR y la nueva Planta Municipal 3 suministra a la red 0,685 MW y 0 MVAR, se puede ver que entre las tres plantas están aportando más de la potencia activa requerida por el circuito y una de ellas aporta los reactivos necesarios a la red, definida como el generador de referencia.

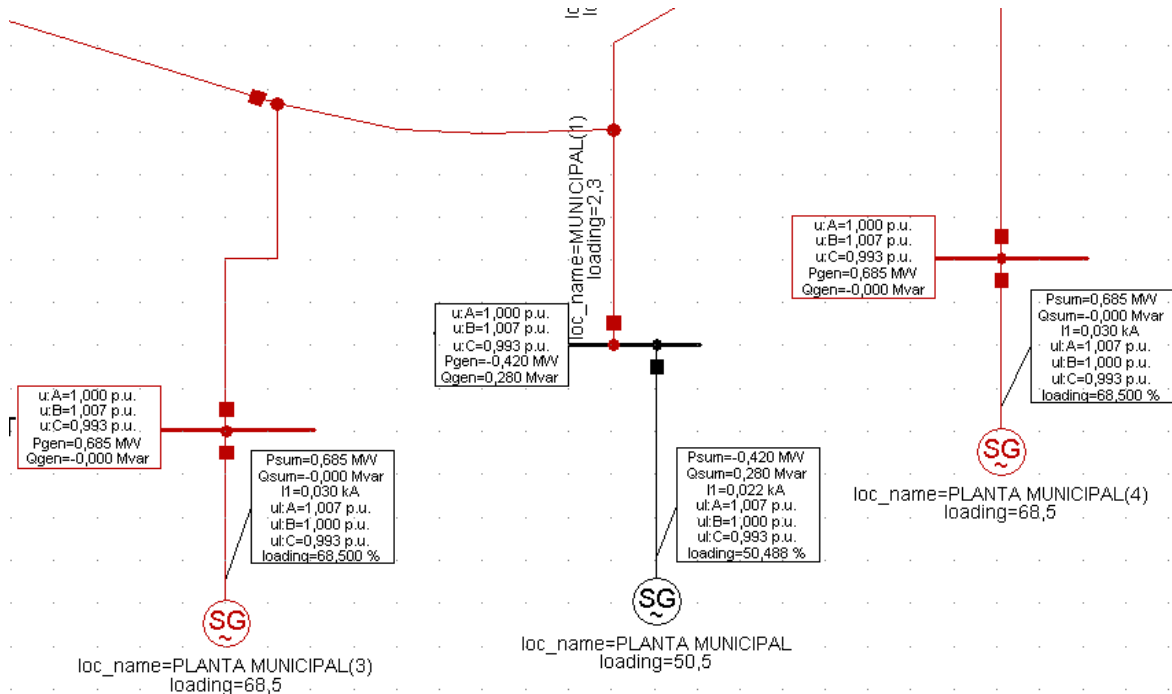


Figura 45. Comportamiento de los 3 generadores en el circuito Municipal – En un mismo punto

En la Figura 45, se puede ver que los dos generadores que no son considerados como la referencia, entregan al sistema la potencia nominal con la cual fueron configurados inicialmente siendo 0,685 MW y 0 MVAR.

Los perfiles de tensión para esta configuración son 1.007 y 0.975 p.u. máximos y mínimos respectivamente, todos los generadores distribuidos aumentan los perfiles

de tensión de la red ya que anteriormente en el nodo final con un generador alimentando la red (primer ejemplo de esta sección) se tenía una tensión de 0,96 p.u.

La curva de los perfiles de tensión, con 3 GD concentrados, se puede ver en la Figura 46.

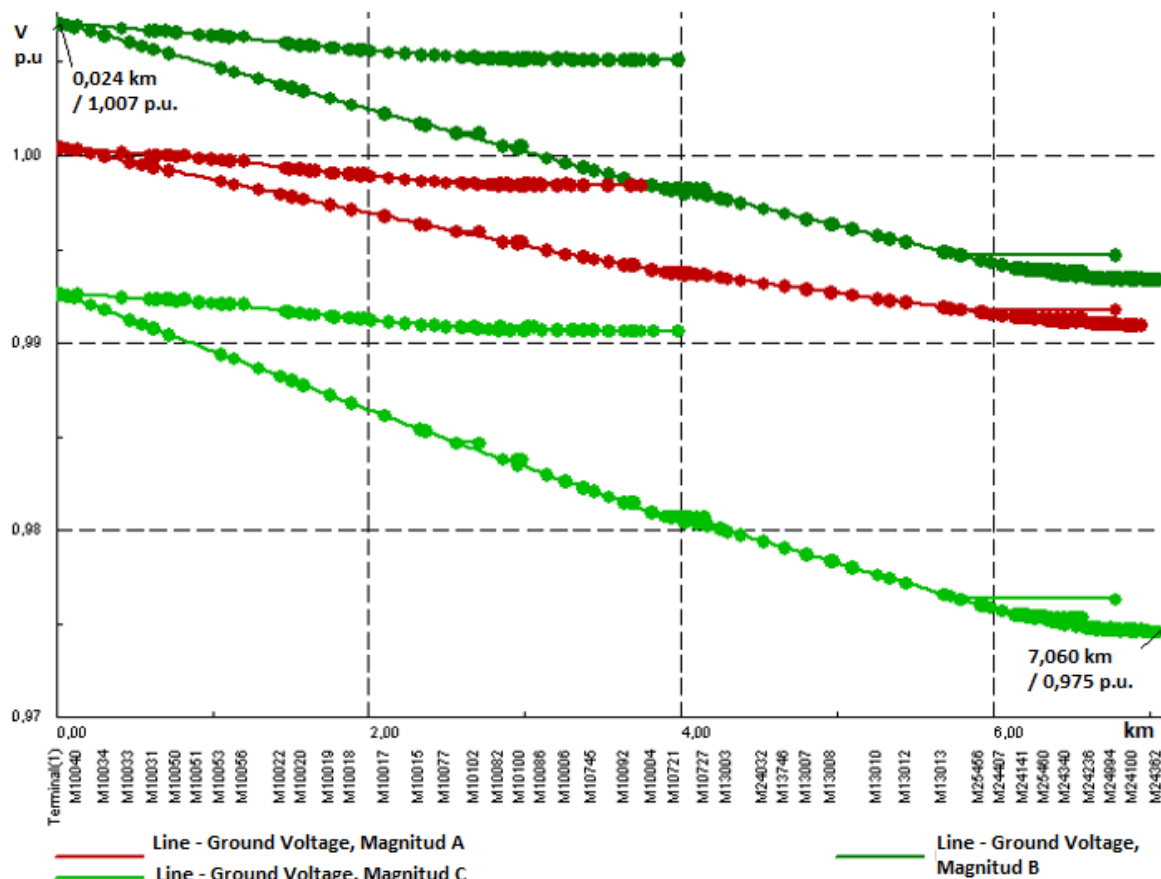


Figura 46. Perfiles de tensión – 3 generadores en el circuito Municipal ubicados en la misma zona

Sobre la ubicación de los perfiles de tensión en la red operando de manera aislada y con 3 generadores concentrados, el mayor valor se encuentra a la salida de los generadores y el menor valor de tensión se encuentra para el mismo punto más lejano del circuito M24362, validado anteriormente pero es de anotar que ahora con un valor un poco km mayor que antes.

Para esta configuración, los perfiles de tensión empiezan a disminuir dependiendo de la distancia que se vaya presentando hasta cada uno de los nodos, el comportamiento es similar como si se tuviera la red conectada al SEP.

Como conclusión para las simulaciones realizadas sobre la penetración de GD en la red de distribución operando de manera aislada, se tiene que ante mayor penetración en la red, se logran mejores perfiles de tensión en los nodos más alejados del sistema pero con una buena distribución en la red, por lo cual es conveniente la instalación de GD al final de los trayectos más largos con el fin de garantizar buenos niveles de tensión.

Es menos óptimo para la red si se concentran todos los GD en un solo punto, pues aunque se mantienen valores aceptables de tensión en el punto de conexión, la tensión en los nodos más lejanos disminuye más que si se tuvieran los GD distribuidos por toda la red.

4.6 Características de la red de distribución operando de manera aislada, ante combinación de GD con tecnologías PCH y fotovoltaica

En esta sección del documento se expone la red de distribución operando de manera aislada con solo un generador (PCH) en la red, pero ahora incluyendo la GD de tecnología fotovoltaica con el fin de poder apreciar su comportamiento en el sistema.

Se debe tener en cuenta que, el punto que se elige para la ubicación de la generación fotovoltaica, depende de las necesidades de cada proyecto y las características topológicas de la red a analizar, para este caso de estudio se determinó su ubicación al final del circuito donde se tiene la carga con menor perfil de tensión y poder verificar las variaciones que se tendrán en la red.

Es de aclarar que el modelo presentado en la Figura 47, se utiliza por medio del software computacional DigSilent y que entre sus propiedades tienen la posibilidad de utilizar diferentes tipos de generadores por ejemplo como lo son fotovoltaicos, eólicos y sistemas

de baterías, los cuales ya tienen su modelo incluido al utilizar este elementos. A continuación se describe el modelo implementado:

El generador estático en el software DigSilent es un modelo diseñado para cualquier clase de generador no rotativo ya sea monofásico o trifásico, las aplicaciones de este modelo son las siguientes: [48]

- Generadores fotovoltaicos
- Celdas de combustible
- Dispositivos de almacenamiento
- Compensación de Potencia Reactiva
- Generadores eólicos

El modelo empleado para el generador fotovoltaico, es parametrizado de acuerdo a las siguientes características:

- **Potencia nominal** = 0,5 MW a la cual se variara su potencia de operación que le entregará a la red.
- **Transformador elevador** = de 0,480 kV a 13,2 kV.
- **Quien dará la referencia a este sistema fotovoltaico** es la planta de generación Municipal analizada anteriormente.

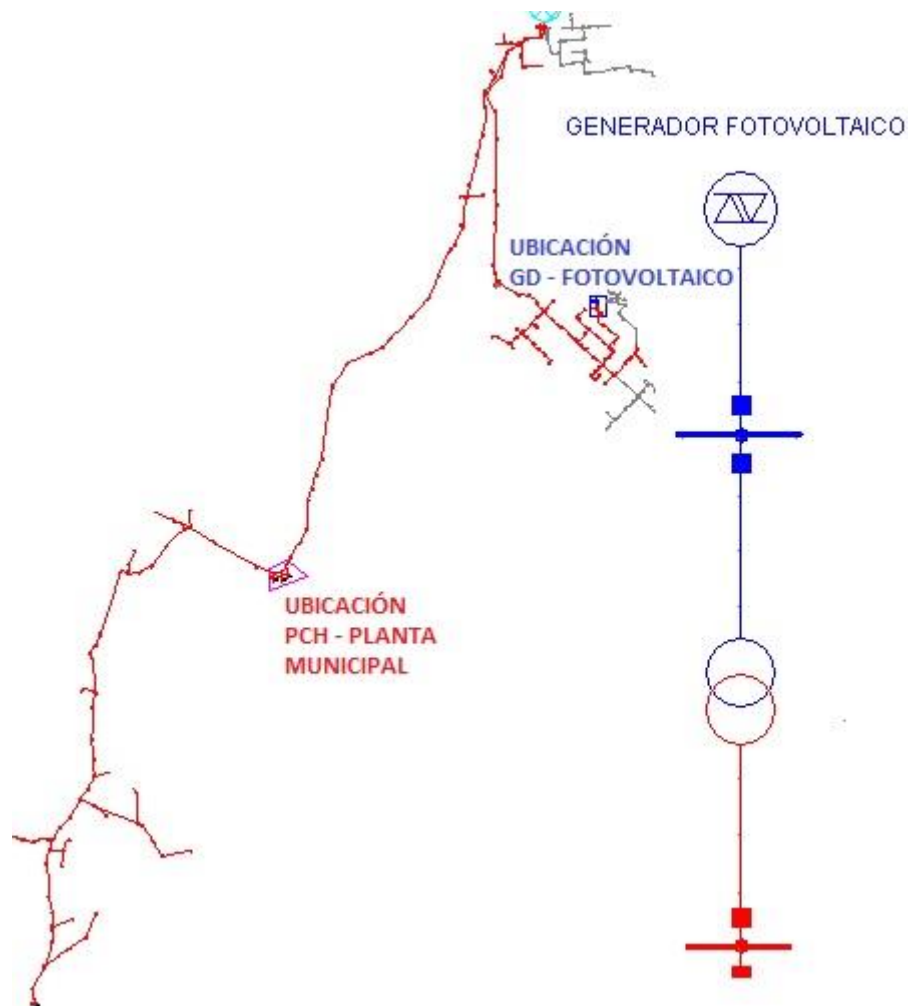


Figura 47. Generador Fotovoltaico en una red operando de manera aislada.

Con el fin de realizar los análisis correspondientes, se referencian las Figuras 33 y 34 como caso base, en las cuales se puede ver que el nivel de tensión en el nodo elegido para la conexión de la GD – Fotovoltaica corresponde a 0,96 p.u y la potencia entregada por la PCH son 0,950 MW y 0,280 MVAR.

- a) **La primera simulación** que se realizará con la GD fotovoltaica es entregando a la red 0,010 MW, y el transformador a capacidad nominal siendo de 0,2 MW. Los resultados obtenidos se pueden apreciar en la Figura 48, donde se consigna la potencia entregada por la GD fotovoltaica y la reacción en potencias de la planta de generación PCH.

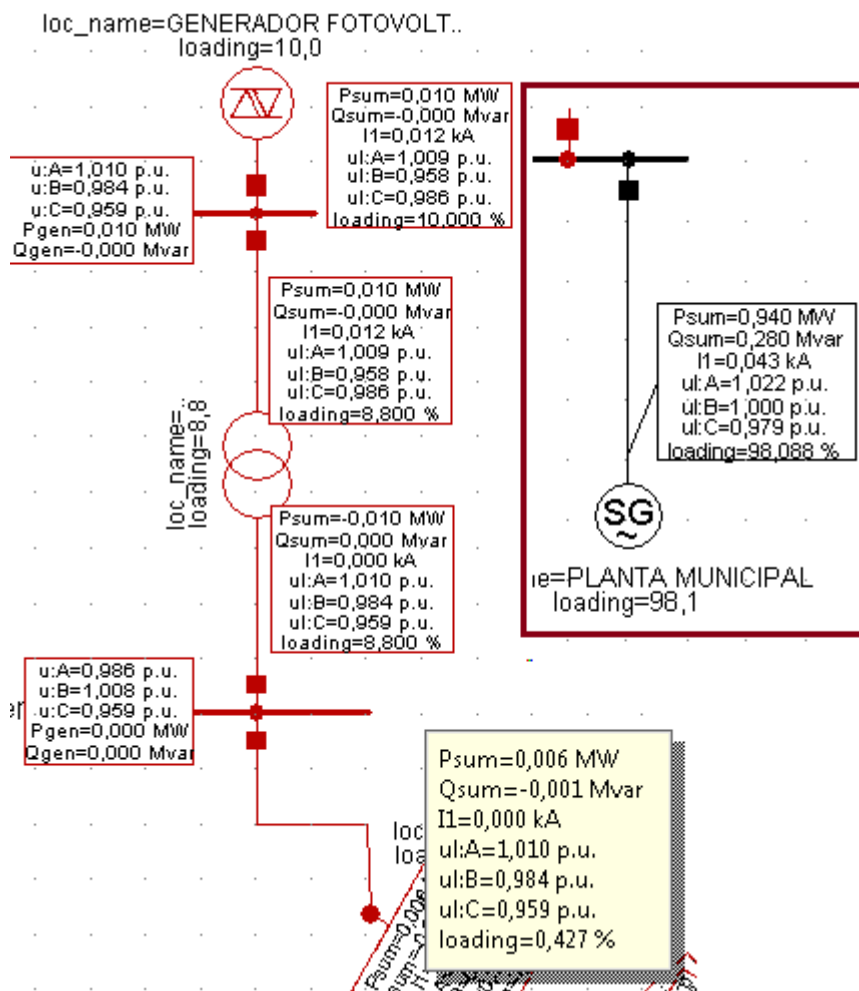


Figura 48. GD – Fotovoltaica entregando a la red 0,01 MW

En los resultados obtenidos se puede apreciar que los niveles de tensión en el nodo que se pretendía analizar no presentan ningún cambio, lo contrario que sucede para el generador de la planta Municipal en el cual se reduce la potencia entrega a 0,940 MW y disminuyendo su cargabilidad a un menor porcentaje.

Con el fin de ver el impacto de la instalación de GD en la red de distribución operando de manera aislada, se continúan realizando variaciones sobre la potencia entregada de la GD – Fotovoltaica y así poder determinar los cambios reflejados en la planta de generación, para lo cual se consignan los resultados en la Tabla 7.

Para obtener mejores resultados, se aumenta la capacidad del GD – fotovoltaico a 0,5 MW.

Tabla 7. Resultados de las simulaciones aumentando la potencia entregada por el GD-Fotovoltaico

CASOS	Potencia Entregada por GD Fotovoltaico [MW]	Nivel de tensión Nodo analizado [p.u.]	Potencia Activa Planta Municipal [MW]	Potencia Reactiva Planta Municipal [MVAR]
Base	0	0,96	0,95	0,28
1	0,01	0,959	0,94	0,28
2	0,025	0,957	0,925	0,28
3	0,05	0,953	0,899	0,28
4	0,075	0,95	0,874	0,28
5	0,1	0,946	0,849	0,282
6	0,2	0,93	0,748	0,291
7	0,3	0,912	0,649	0,308
8	0,4	0,893	0,55	0,333
9	0,5	0,871	0,453	0,365

De la Tabla 7, se observa que con la integración de GD – fotovoltaicos de baja potencia a la red operando de manera aislada, no altera de manera significativa los perfiles de tensión en el punto de conexión de la red, pero si se puede apreciar la disminución de la potencia activa que se debe entregar por el generador de la Planta conectada al circuito (PCH), en este caso planta Municipal.

Por otro lado se puede concluir que, para este caso de estudio en particular se comienzan a presentar cambios significativos en la red, a partir de una potencia de 0,2 MW, por lo cual se determina que entre mayor sea la potencia que se suministre por la GD - Fotovoltaica al circuito, los perfiles de tensión en el nodo conectado se reducen debido a que son cargas resistivas y se ven altamente afectadas por la potencia activa.

Adicionalmente en cuanto al comportamiento del generador planta Municipal (PCH) ante el aumento de la potencia de la GD – Fotovoltaica, se disminuye la potencia activa entregada a la red pero genera el aumento de la potencia reactiva en la misma, esto con el fin de tratar de mantener los perfiles de tensión en la red.

Con el fin de entender mejor el comportamiento de la red ante la inclusión de mayor potencia activa por medio de la GD – Fotovoltaica, se grafican los perfiles de tensión para el último caso analizado correspondiente a 0,5 MW. Figura 49.

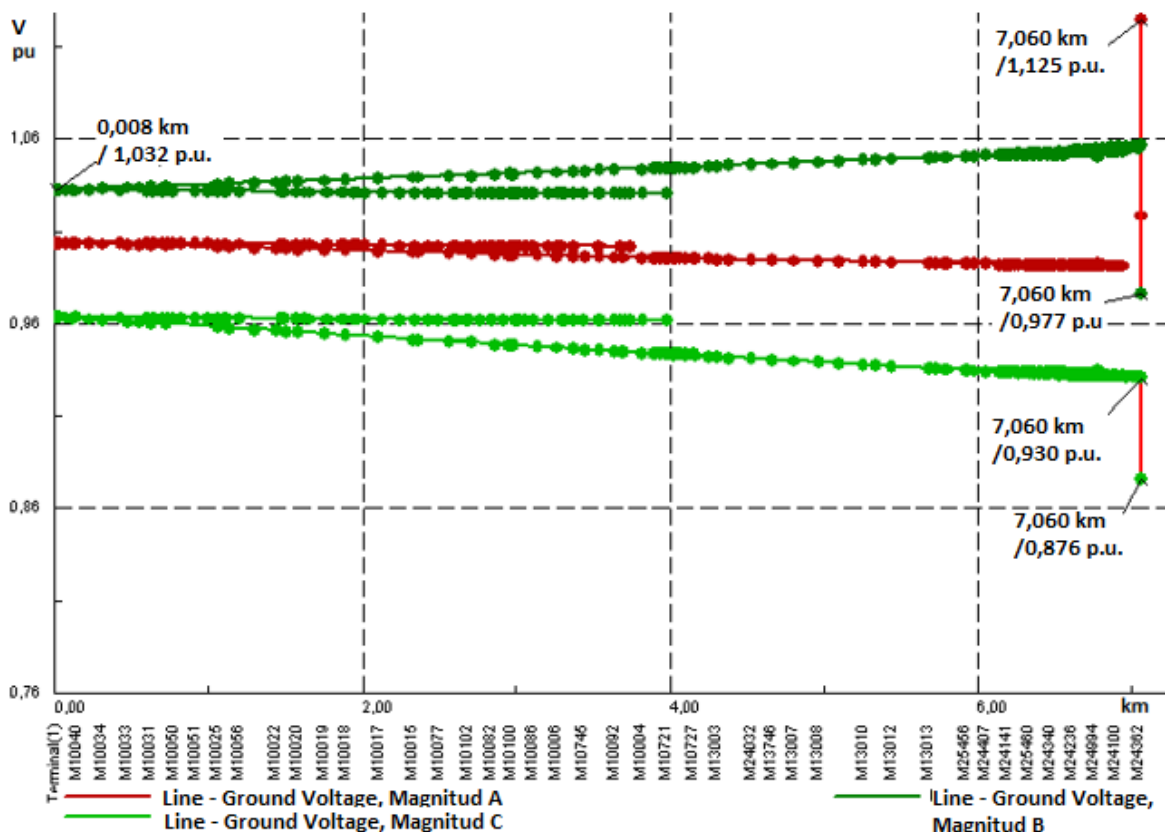


Figura 49. Perfiles de tensión GD – Fotovoltaica inyectando 0,5 MW a la red operando de manera aislada.

Debido al comportamiento de la red operando de manera aislada, mientras se aumenta la potencia entregada por el GD - Fotovoltaico, caso para el cual disminuyen las tensiones en el nodo final y adyacentes donde fue conectado el GD – fotovoltaico, se perderá la estabilidad de tensión en la red, debido al aumento de la potencia activa a tan elevados valores.

Por lo tanto cuando se decida conectar GD – Fotovoltaicos a la red, deben ser de pequeña potencia para no alterar el comportamiento del sistema y las cargas donde se van a instalar, más aún cuando las cargas son resistivas pues la potencia activa la afecta directamente y se puede generar colapso de tensión en la red.

4.7. Curvas P-V sobre la red de distribución operando de manera aislada

Las curvas P-V son de gran importancia para analizar la estabilidad de tensión de los sistemas de potencia o en redes de distribución operando de manera aislada. Estas curvas se obtienen a partir de aumentar la potencia activa de la carga o cierto número de cargas conservando el factor de potencia constante. Se aumenta la potencia de la carga o las cargas hasta que el flujo de potencia no converge para ningún otro cambio de potencia, y de esta manera se puede determinar el punto donde colapsaría el sistema.

Para esta sección se pretende, validar las curvas de potencias contra tensión (P-V) para la red de distribución operando de manera aislada, se realizará un análisis sobre las cargas ubicadas en los nodos más alejados de la red y con las cuales se puede revisar su comportamiento frente a la estabilidad de tensión, por medio del aumento de potencia activa y validando los cambios en los niveles de tensión de la barra a la que se encuentra conectada; teniendo que para una pequeña variación en la carga (aumento) de potencia activa, responda con un cambio notable de la tensión (disminución), lo cual indicará que llegó al límite para el colapso de tensión.

En las Figuras 50 y 51 se indica la carga que será analizada, y el comportamiento de la misma tanto en condiciones normales como después de realizar la simulación y graficar la curva P-V de esta carga en el circuito Sancancio.

Para esta sección se tomó como referencia el circuito Sancancio, con una planta menor de generación llamada Planta Sancancio de 2 MW, y la carga a analizar se escogió como la más alejada de donde está la GD, ya que es en este punto en el cual se podrá apreciar de una mejor manera el comportamiento de la curva P-V ante la estabilidad de tensión.

En la Figura 51 se puede verificar como el comportamiento normal de la carga es un consumo de 0,012 MW y después de hacer el análisis P-V sube hasta 1,984 MW, lo cual indica que hasta este valor de aumento de potencia, el flujo de carga converge y se conserva estabilidad de la red.

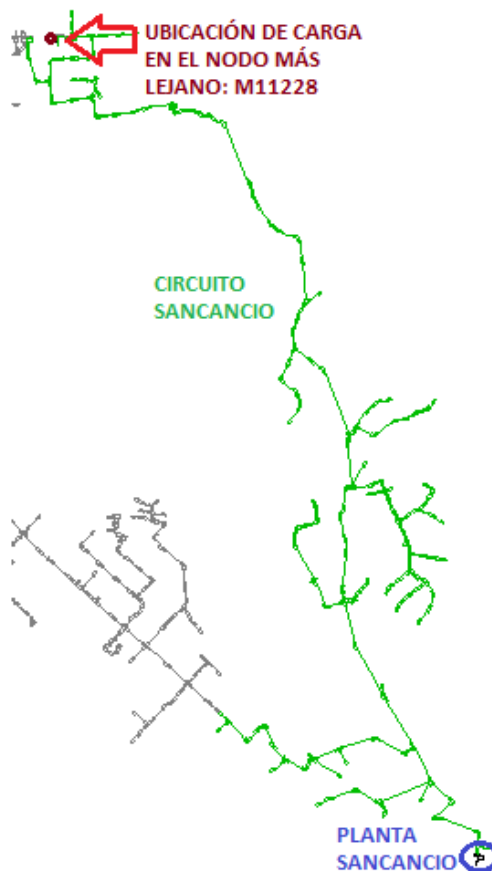


Figura 50. Análisis de la curva P-V – Circuito Sancancio nodo lejano M11228

COMPORTAMIENTO INICIAL	RESULTADO DEL INCREMENTO DE CARGA PARA LA CURVA P-V
<p> $P_{sum}=0,012 \text{ MW}$ $Q_{sum}=0,003 \text{ Mvar}$ $I_1=0,002 \text{ kA}$ $ul:A=1,002 \text{ p.u.}$ $ul:B=0,985 \text{ p.u.}$ $ul:C=0,996 \text{ p.u.}$ $=$ </p>	<p> $P_{sum}=1,984 \text{ MW}$ $Q_{sum}=0,571 \text{ Mvar}$ $I_1=0,447 \text{ kA}$ $ul:A=0,622 \text{ p.u.}$ $ul:B=1,249 \text{ p.u.}$ $ul:C=1,080 \text{ p.u.}$ $=$ </p>
<p>CARGA FINAL - CIRCUITO SANCANCIO NODO: M11228</p>	<p>CARGA FINAL - CIRCUITO SANCANCIO NODO: M11228</p>

Figura 51. Comportamiento de la carga en el nodo M11228 ante análisis curva P-V.

La Figura 52, corresponde a la simulación realizada sobre las curvas P-V en el nodo más lejano del circuito Sancancio equivalente a M11228, y como se mencionó anteriormente el último punto de la curva se grafica para 1,984 MW que sería lo que es posible aumentar de la carga sin perder estabilidad de tensión en el sistema.

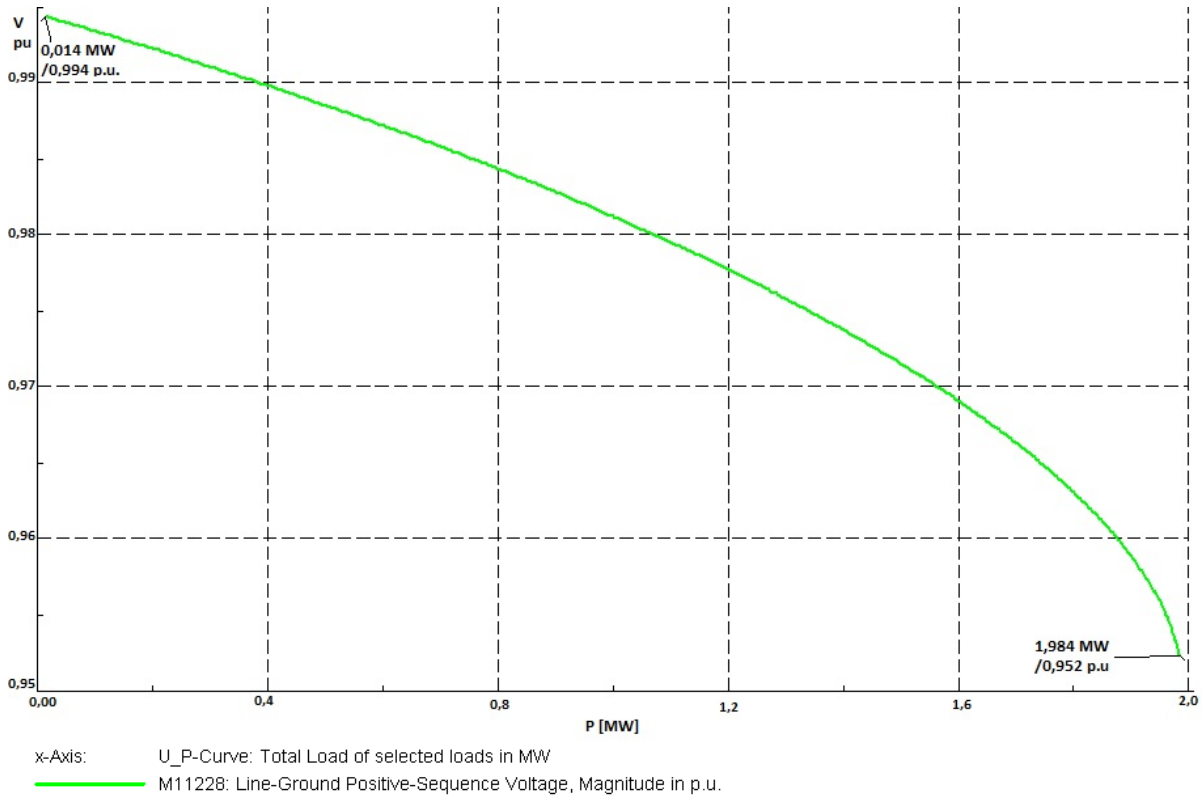


Figura 52. Curva P-V en el nodo M11228

De las figuras expuestas anteriormente se puede observar, que ante un aumento de la potencia activa en la carga seleccionada (para este caso correspondiente al nodo más lejano de la red), se presenta una disminución de tensión siendo esta significativa para potencias mayores de 1,984 MW, lo cual influye en la pérdida de estabilidad de tensión en la red.

Ya se analizó como es el comportamiento de la curva P-V en el nodo más alejado de la red, por lo cual para la siguiente simulación se pretende ver el resultado de estabilidad para varias cargas a través de la red de distribución. En la Figura 53 se puede ver la ubicación en la red operando de manera aislada, las cargas a analizar mediante las curvas P-V.

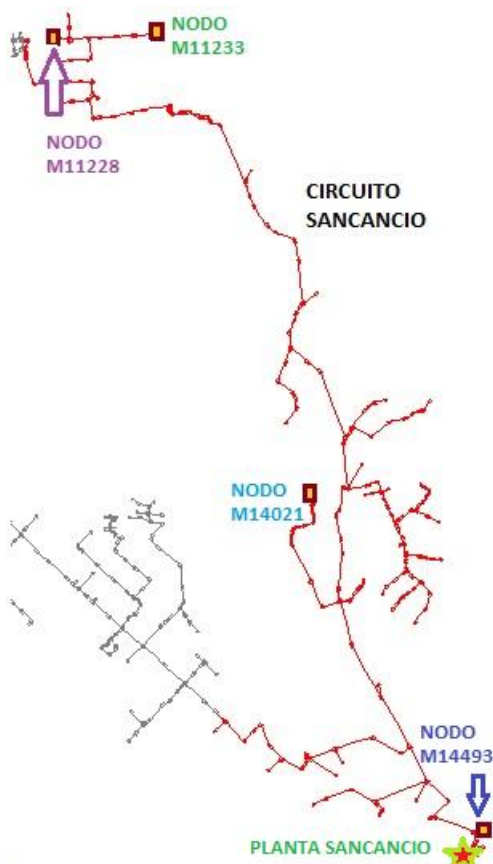


Figura 53. Ubicación de los nodos analizados para la curva P-V

Las cargas a analizar están ubicadas en la red de la siguiente manera:

1. **NODO: M14493** – ubicado al inicio del circuito – cerca de la planta Sancancio
2. **NODO: M14021** – ubicado en la mitad del circuito
3. **NODO: M11233** – ubicado al final del circuito
4. **NODO: M11228** – ubicado como el nodo más lejano

Para cada una de estas cargas, se grafica la curva P-V, en la cual como ya se explicó, se debe aumentar la potencia y correr el flujo de carga verificando los perfiles de tensión en el nodo al cual está conectada cada carga. En la Figura 54 se pueden apreciar los resultados obtenidos.

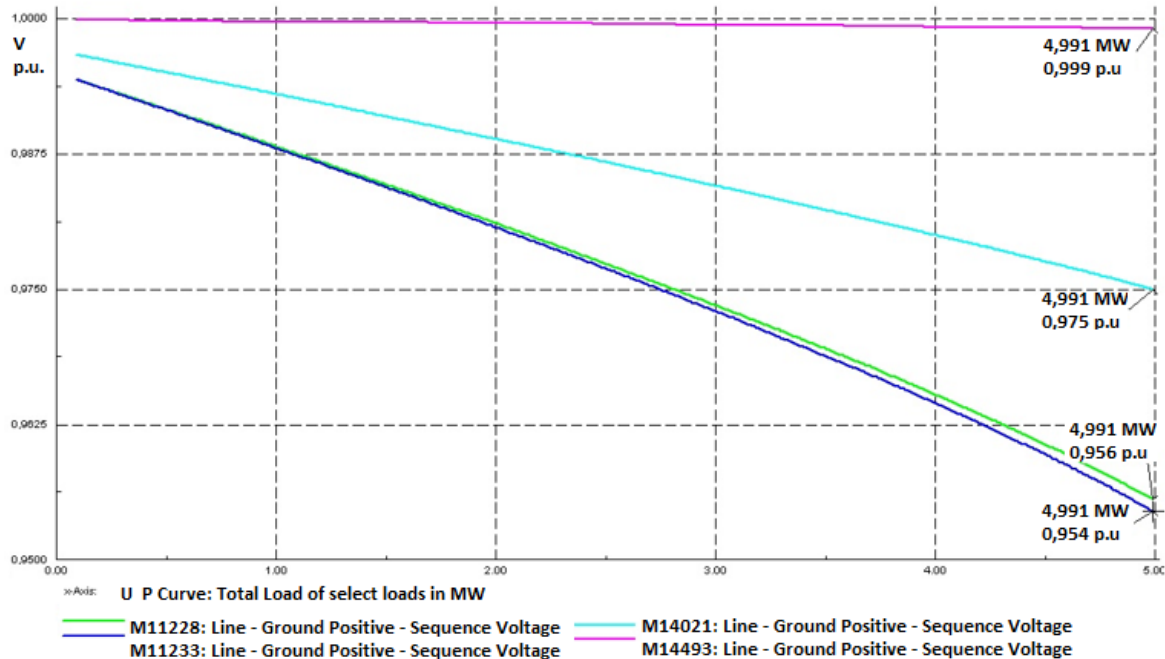


Figura 54. Análisis curva P-V para varios nodos de la red operando de manera aislada

Para todas las curvas de tensión se grafica la curva hasta 4,991 MW ya que es la potencia máxima hasta la cual se puede aumentar la potencia activa en el generador antes que pierda la estabilidad de tensión y empiece a disminuir cada vez más la tensión en p.u.

En las curvas P-V obtenidas para cada carga, se puede apreciar que la carga 1, la cual está más cerca de la planta menor de generación Sancancio, se mantiene constante el perfil de tensión, aunque disminuye es muy poco el cambio que se puede percibir (0,999 p.u.), para la carga 2 que está en la mitad del circuito se puede ver que el valor disminuye aún más (0,975 p.u.), y para las cargas 3 y 4 se presenta todavía más la caída de tensión (0,956 y 0,954 p.u) ya que están ubicadas al final de la red y donde se ven mayores impactos en cuanto a los perfiles de tensión y estabilidad de la red.

A continuación se presentará una simulación en la cual la red del circuito Sancancio cuenta de con un punto donde se conecte la GD fotovoltaica y para la cual se realizará el análisis correspondiente sobre la estabilidad de tensión en la red:

La topología de la red con la inclusión de la GD fotovoltaica se aprecia en la Figura 55.

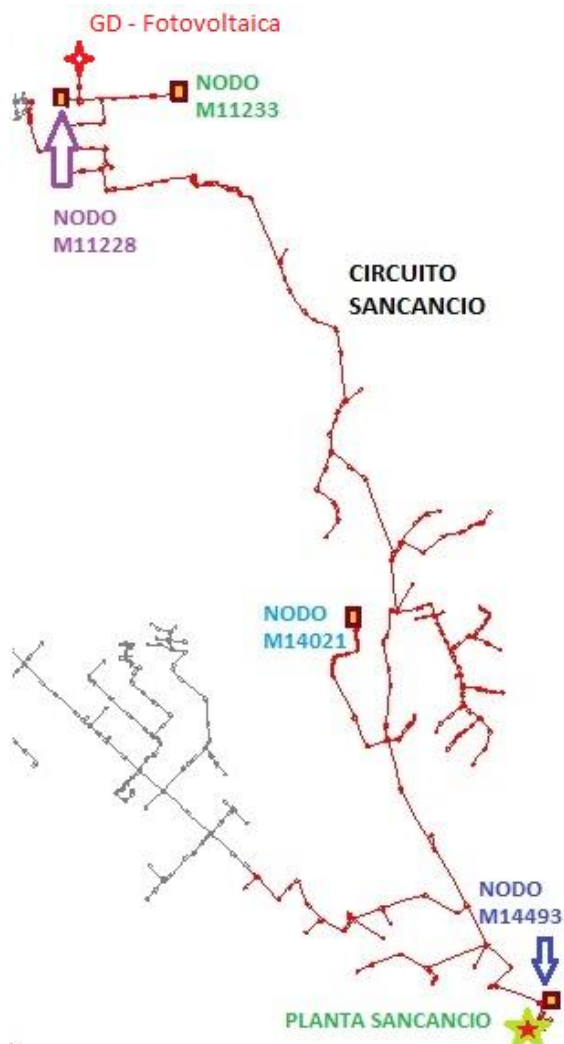


Figura 55. Ubicación de los nodos analizados para la curva P-V incluyendo GD - Fotovoltaica

En la Figura 56, se presenta el comportamiento de las curvas P-V en diferentes puntos de la red incluyendo la integración de GD fotovoltaica en el circuito.

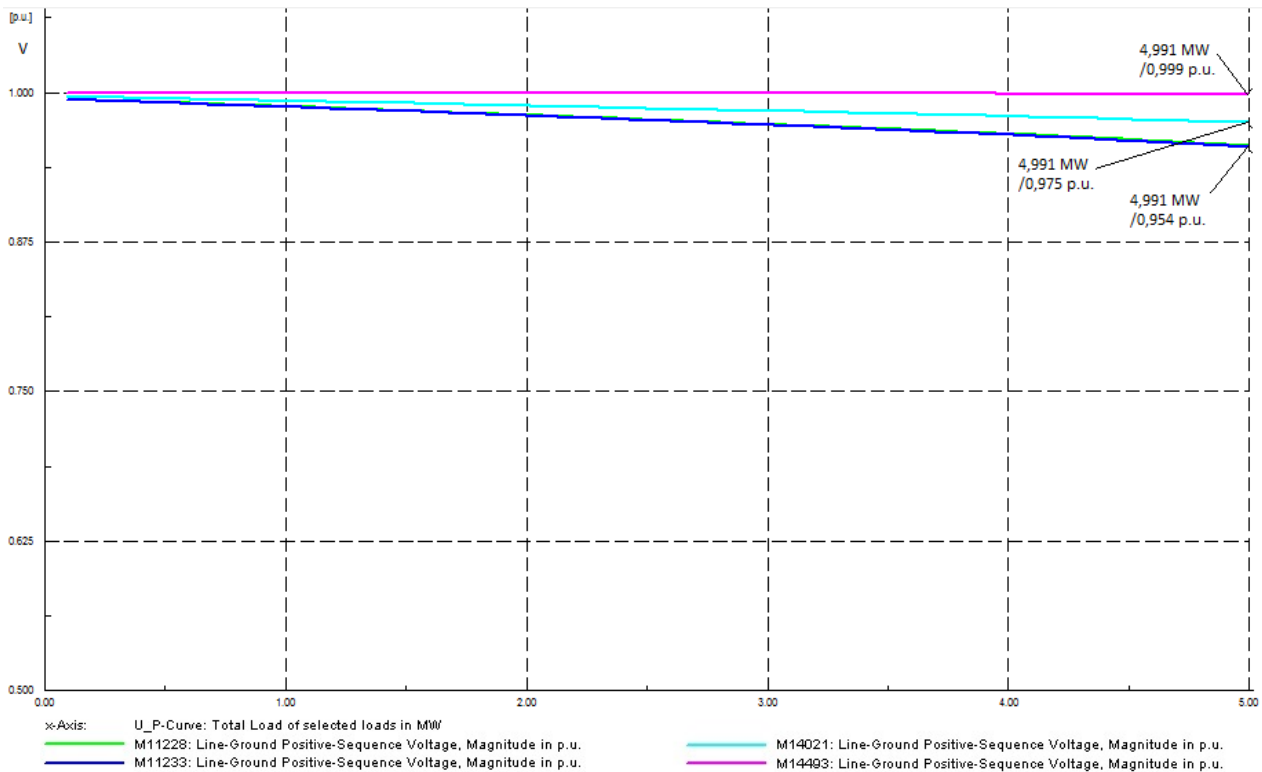


Figura 56. Análisis curva P-V para varios nodos de la red operando de manera aislada y con GD Fotovoltaica

Se puede observar que respecto a los resultados de la estabilidad de tensión consignados en la Figura 54 con la Figura 56, cada una de las curvas pertenecientes a los nodos analizados se desplazaron hacia arriba, por lo cual aumentan su nivel de tensión pero se evidencia que aunque tienen un mejor nivel de tensión al que presentaban anteriormente, ante un aumento de carga mayor a 4,9 MW perderá estabilidad de tensión sin importar el buen perfil de tensión que presentan.

Como conclusión, se tiene que para poder validar la estabilidad de tensión en una red es necesario incrementar la potencia a suministrar hasta que no tener convergencia del flujo de carga. Refiriéndose a la red modelada para el caso práctico, se pierde estabilidad de tensión en unos valores muy elevados de carga, que incluso superan la potencia entregada por el generador del cual están alimentados, por lo tanto en la red de distribución operando de manera aislada no se presentan problemas de estabilidad de tensión en la red.

De igual manera ante el aumento de potencia activa en las cargas, la planta menor de generación llamada planta Sancancio también aumenta su valor de potencia reactiva que debe inyectar al sistema, con el fin de conservar la estabilidad de tensión.

Se debe tener muy presente que a pesar de que se consigan buenos perfiles de tensión en la red o en una carga específicamente, no quiere decir que se conserva la estabilidad de tensión en la misma, ya que puede darse que para este valor óptimo de tensión ante un aumento de carga pierda estabilidad de tensión, por lo cual es importante verificar que las cargas puedan tener un factor de carga adicional y aun así se conserve la estabilidad de tensión en la red.

A continuación se presenta una tabla resumen con los resultados más relevantes de este Capítulo 4, para las simulaciones realizadas desde los ítems 4.3 al 4.7.

Tabla 8. Tabla resumen respecto a las simulaciones realizadas en el Capítulo 4

RESULTADOS EN LOS PERFILES DE TENSION								
ITEM	CASO DE ESTUDIO	Circuito Municipal		Circuito Intermedia		Circuito Sancancio		CONCLUSIÓN
		Mayor nivel de tensión [p.u.]	Menor nivel de tensión [p.u.]	Mayor nivel de tensión [p.u.]	Menor nivel de tensión [p.u.]	Mayor nivel de tensión [p.u.]	Menor nivel de tensión [p.u.]	
4.3	Características de la red de distribución conectada al SEP sin GD	1,044	1,039	1,044	1,035	1,044	1,038	<p>De las simulaciones realizadas, se tiene que para todos los casos el menor valor de tensión equivale al nodo más lejano de la red de distribución, este resultado es así debido a que la tensión cae de acuerdo a la distancia que existe entre la fuente de alimentación hasta cada nodo, lo cual se refleja en un aumento de la impedancia de línea, proporcional entre más lejos se encuentre el nodo.</p> <p>La diferencia que se presenta entre las tensiones de cada una de las fases del circuito en el nodo inicial, se debe al modelo empleado para la simulación, el cual esta parametrizado con valores reales del SEP, y en los demás nodos la diferencia se debe a que no todas las cargas son alimentadas de la misma fase, por lo tanto la red de distribución es desbalanceada y presenta diferentes longitudes e impedancias.</p>
4.4	Características de la red de distribución operando con GD	1,048	1,043	1,045	1,038	1,044	1,040	<p>Para este caso de simulación donde las plantas de GD están ubicadas a la mitad y final de los circuitos, la curva del perfil de tensión no es descendente como la del caso anterior, si no que para los circuitos Municipal e Intermedia presenta aumento de tensión en la mitad de la curva, y para el circuito Sancancio al final.</p> <p>En los circuitos donde se tienen instalada la GD en la mitad del circuito, es allí donde se presenta el mayor nivel de tensión estando por encima de la tensión reflejada en la barra principal, y no solo modifica la tensión en el punto de conexión de la GD, sino que también los nodos adyacentes a esta pero en menor cantidad, dependiendo de la distancia a la que se encuentren del punto de conexión (entre mayor distancia menor tensión).</p> <p>Para la ubicación de la GD al final del circuito, es en este punto donde se presenta aumento de tensión, pero por estar ubicada al final las tensiones suben hasta llegar al mismo valor de la barra principal (1.044 p.u.). Se debe recalcar que aún con el aumento de tensión que provocaron las PCH en la red, no presenta ningún inconveniente en cuanto a calidad del servicio y límites de seguridad, y no se supera los límites permitidos por la normativa expuesta en el capítulo 3.</p>

ITEM	CASO DE ESTUDIO	Los 3 circuitos juntos -- pasan a ser un solo circuito		CONCLUSIÓN
		Mayor nivel de tensión [p.u.]	Menor nivel de tensión [p.u.]	
4.5	Características de la red de distribución operando de manera aislada	1.008 y 1.005	0.977	<p>Las cargas de los circuitos están siendo suplidas ahora por cada generador distribuido. Los aportes de cada PCH son: Planta Municipal: 0,685 MW y 0 MVAR Planta Intermedia: 0,870 MW y 0 MVAR y Planta Sancancio: 0,731 MW y 0,665 MVAR, la planta Sancancio es quien controla los reactivos de la red.</p> <p>Los perfiles de tensión en la red, se comportan con un valor de tensión menor ya que solo están alimentados de los GD iniciando desde (1,008 p.u.), los nodos cercanos a los generadores presentan niveles de tensión altos pero a medida que se tienen nodos alejados del GD el nivel de tensión disminuye hasta encontrarse de nuevo con otro de los GD.</p> <p>El menor valor de tensión es registrado en el circuito Intermedia, esto se da debido a que en este punto se encuentran instaladas las cargas industriales de este circuito y dado su naturaleza inductiva, el factor de potencia es menor con respecto a las demás cargas del circuito.</p>

ITEM	CASO DE ESTUDIO	Circuito Municipal		CONCLUSIÓN
		Mayor nivel de tensión [p.u.]	Menor nivel de tensión [p.u.]	
4.5.1	Características de la red de distribución operando de manera aislada – Circuito Municipal	1,013	0,982	<p>Para este caso solo se analizará el circuito municipal con GD, el cual tiene un aporte de 0,370 MW y 0,107 MVAR, ya que es este generador quien debe ser la referencia y control de tensión.</p> <p>En este caso la longitud del circuito se reduce a la mitad, ya que la GD está ubicada aproximadamente a 4 km de 8 km que tiene de longitud el circuito en total. Debido a esto el mayor nivel de tensión esta dado aproximadamente en la mitad del circuito y el menor valor de tensión hacia las colas (arriba y abajo) según tenga mayor distancia desde la fuente hacia el nodo final. Figura 27.</p> <p>Los perfiles de tensión se mantienen en los rangos permitidos y el generador puede suplir la carga total del circuito sin problema.</p>

ITEM	CASO DE ESTUDIO	Circuito Municipal		CONCLUSIÓN
		Mayor nivel de tensión [p.u.]	Menor nivel de tensión [p.u.]	
4.5.2.	Características de la red de distribución operando de manera aislada – Planta Municipal soportando los circuitos Municipal, Intermedia y Sancancio	1,032	0,910	<p>Para este caso la planta Municipal es quien de la referencia al sistema, por lo tanto aunque su potencia nominal es 1 MW (para efectos de simulación ella entrega lo requerido por la red), pero muestra el porcentaje de sobrecarga al que se ve enfrentado para poder suplir la potencia requerida, teniendo en cuenta esto, para poder dar servicio a los 3 circuitos, el generador de la planta Municipal tendría una sobrecarga del 244% y presenta los siguientes valores de potencia entregada a la red: 2,335 MW y 0,715 MVAR.</p> <p>Debido que solo hay una fuente de generación, los perfiles de tensión toman como voltaje de referencia la del generador planta Municipal (1,032 p.u.) y de ahí en adelante para los demás nodos de la red se presenta disminución de la tensión.</p> <p>Es de notar que el comportamiento de la red es correcto y similar en el expuesto para el ítem 4.3, ya que cuenta con un solo alimentador. No hay violación del límite mínimo permitido. El mínimo valor coincide donde se encuentran las cargas industriales (explicadas anteriormente).</p> <p>Debido a la alta cargabilidad del generador, se debe realizar load shedding o desconexión de carga en la red con el fin que la cargabilidad de la planta de generación no se vea afectada y por lo tanto se mejoren los perfiles de tensión.</p>
4.5.2.	El mismo caso pero Realizando Load Shedding	1,021	0,96	<p>Realizando load shedding en la red y supliendo ahora solamente el circuito Municipal y parte del circuito Intermedia por medio de la planta Municipal, se consigue un porcentaje de cargabilidad del 99% correspondiente a los siguientes valores: 0,950 MW y 0,280 MVAR.</p> <p>Con este corte de carga, se cumple con los límites permitidos para el nivel de tensión.</p> <p>Se puede concluir entonces que para obtener un buen desempeño en la red frente a los perfiles de tensión, se debe analizar la capacidad del generador distribuido que se implementaría en la misma, con el fin de que no sea subutilizado ni sobrecargado, y tener presente la cantidad de carga que este puede soportar para no obtener una fuerte disminución en los perfiles de tensión y no sobrecargar los elementos.</p>

ITEM	CASO DE ESTUDIO	LOCALIZACIÓN	PUNTO DE MAYOR NIVEL DE TENSIÓN	PUNTO DE MENOR NIVEL DE TENSIÓN	CONCLUSIÓN
4.5.3.	Características de la red de distribución operando de manera aislada, ante diferentes puntos de localización de la GD	Mitad del circuito	A la salida de la conexión de la Planta de generación	En el nodo más lejano (Se divide la longitud del circuito)	De las simulaciones realizadas se tiene que, sin importar el punto donde se instale la GD, la planta siempre entregará la misma potencia requerida por el circuito y los reactivos necesarios para conservar los perfiles de tensión en la red.
		Final del circuito	A la salida de la conexión de la Planta de generación	En el nodo más lejano (al inicio del circuito)	Independiente de la localización de la GD, se tendrá su mayor valor de tensión en el punto donde se realice su conexión y en los nodos adyacentes, después empiezan a disminuir los valores de tensión entre más lejos se encuentren.
		Inicio del circuito	A la salida de la conexión de la Planta de generación	En el nodo más lejano (al final del circuito)	Se tiene entonces, que es más beneficioso instalar la GD en la mitad del circuito ya que no tendrán problemas por bajas tensiones en los nodos más lejanos.

ITEM	CASO DE ESTUDIO	NIVEL DE PENETRACIÓN	POTENCIA ACTIVA [MW]	POTENCIA REACTIVA [MVAR]	MAYOR NIVEL DE TENSIÓN [P.U.]	MENOR NIVEL DE TENSIÓN [P.U.]	CONCLUSIÓN
4.5.4	Características de la red de distribución operando de manera aislada, ante mayor penetración de GD en un solo circuito. MUNICIPAL	1 Unidad	0,950	0,280	1,021	0,96	Para las simulaciones realizadas se tiene que ante mayor penetración en la red, se obtienen mejores perfiles de tensión en los nodos más alejados del sistema pero con una buena distribución en la red, por lo cual es conveniente la instalación de GD al final de los trayectos más largos con el fin de garantizar buenos niveles de tensión.
		2 Unidades	0.955 (Distribuido en las 2 unidades)	0,270	1,019	0,970	
		3 Unidades	1.215 (Distribuido en las 3 unidades)	0.446 (Distribuido en 2 unidades)	1,016	0,983	Es menos óptimo para la red si se concentran todos los GD en un solo punto, pues aunque se mantienen valores aceptables de tensión en el punto de conexión, la tensión en los nodos más lejanos disminuye más que si se tuvieran los GD distribuidos por toda la red.
		3 Unidades - concentradas	1.79 (Distribuido en las 3 unidades)	0.28	1.007	0.975	

ITEM	CASO DE ESTUDIO	CONCLUSIÓN
4.6	Características de la red de distribución operando de manera aislada, ante combinación de GD con tecnologías PCH y fotovoltaica	<p>La ubicación de la GD - Fotovoltaica se determinó al final del circuito, donde se tiene la carga con menor perfil de tensión y poder verificar las variaciones que se tendrán en la red.</p> <p>Quien dará la referencia a este sistema fotovoltaico es la planta de generación Municipal analizada anteriormente.</p> <p>Se puede concluir que con la integración de GD – fotovoltaicos de baja potencia a la red operando de manera aislada, no altera de manera significativa los perfiles de tensión en el punto de conexión de la red, pero si se puede apreciar la disminución de la potencia activa que se debe entregar por el generador de la Planta conectada al circuito (PCH), en este caso planta Municipal.</p> <p>Por lo tanto cuando se decida conectar GD – Fotovoltaicos a la red, deben ser de pequeña potencia para no alterar el comportamiento del sistema y las cargas donde se van a instalar, más aún cuando las cargas son resistivas pues la potencia activa la afecta directamente y se puede generar colapso de tensión en la red.</p>

ITEM	CASO DE ESTUDIO	POTENCIAL INICIAL	POTENCIA FINAL	CONCLUSIÓN
4.7.	Curvas P-V sobre la red de distribución operando de manera aislada	0,012 [MW]	1,984 [MW]	<p>De estas simulaciones se tiene que, ante un aumento de la potencia activa en la carga seleccionada (para este caso correspondiente al nodo más lejano de la red), se presenta una disminución de tensión siendo esta significativa para potencias mayores de 1,984 MW, lo cual influye en la pérdida de estabilidad de tensión en la red.</p> <p>Como conclusión, se tiene que para poder validar la estabilidad de tensión en una red de distribución es necesario incrementar la potencia a suministrar, hasta que no tener convergencia del flujo de carga. Para el caso analizado, se pierde estabilidad de tensión en unos valores muy elevados de carga, que incluso superan la potencia entregada por el generador del cual están alimentados, por lo tanto en la red de distribución operando de manera aislada no se presentan problemas de estabilidad de tensión en la red</p>

5. Conclusiones y Trabajos Futuros

Mediante el desarrollo de este documento, se identificaron varios aspectos relevantes como lo es la alteración en los perfiles de tensión que genera la inclusión de GD en una red de distribución conectada al SEP, en su punto de conexión las tensiones serán elevadas generando, de igual manera un aumento de tensión para los nodos más alejados de la red (como se demostró en el ítem 4.4), se evidenció de igual manera que según la localización de GD en la red de distribución será menor o mayor el impacto a los perfiles de tensión (como se identificó en el ítem 4.5.3).

Cuando se tiene una red de distribución operando de manera aislada, es conveniente implementar dos generadores distribuidos en la red con diferente localización ya que de esta manera se lograrán mejores perfiles de tensión en los nodos más alejados del sistema, se debe tener en cuenta que si se integran varios generadores distribuidos en un mismo punto de conexión, el problema de los perfiles de tensión en los nodos más alejados se continuará presentando (resultados presentados en el ítem 4.5).

Se debe tener presente que, es necesario realizar un estudio preliminar con el fin de determinar cuántos y de que capacidad se requieren los generadores, con el fin de tener un equilibrio entre la generación y demanda del sistema y un buen factor de utilización de los equipos de potencia.

Ante la penetración de GD – fotovoltaica a la red de distribución operando de manera aislada, no se ven mayores perturbaciones en la red para valores bajos de potencia entregada, ya que mientras mayor es la capacidad de los GD – fotovoltaico se deben realizar mayores compensaciones en cuanto a los reactivos generados, los cuales

superaran el doble de la potencia activa suministrada, y por lo tanto no es conveniente económicamente para un sistema (se demostró en el ítem 4.6).

En cuanto a las curvas P-V, se pudo evidenciar que para el caso de estudio en particular no se perderá estabilidad de tensión debido al aumento en las cargas asociadas al circuito, para este caso se cumplirá entonces tanto con la estabilidad de tensión en la red como con sus perfiles de tensión los cuales están dentro de los rangos permitidos, pero se debe tener en cuenta que no siempre que se tenga un perfil de tensión aceptable significa que hay estabilidad en el sistema, ya puede ocurrir que ante un aumento pequeño de la carga asociada se pierda la estabilidad de tensión en el sistema (análisis realizado en el ítem 4.7)

5.1 Conclusiones

- ✓ Para un SEP en el que se incluyan GD, los perfiles de tensión aumentan de manera significativa para los puntos de conexión de los generadores siendo este comportamiento más notorio para cuando la GD está en la mitad del circuito, pues cuando la GD se incluye al final aumenta los niveles de tensión pero quedan igual a los presentados por la SEP, sin embargo para el caso analizado no se violan los límites de seguridad establecidos. Ver Figuras 19, 20 y 21.
- ✓ De las simulaciones realizadas frente a la localización de la GD en una red operando de manera aislada se puede concluir que es mejor instalarla en la mitad del circuito ya que de esta manera se acortaran las distancias hacia el nodo más lejano y se pueden mejorar los perfiles de tensión en estos puntos. Ver ítem 4.5.3.
- ✓ En cuanto a los resultados obtenidos de la penetración de GD en la red operando de manera aislada se puede determinar que su uso es particular para cada caso que se presente de configuraciones en la red, para el analizado en este documento, el nivel de penetración hace elevar las tensiones en cada punto conectado, lo cual es beneficioso para instalar GD en los ramales que poseen bajos perfiles de

tensión, de esta manera se puede mejorar la calidad del servicio entregado a los usuarios. Ver ítem 4.5.4.

- ✓ No basta con analizar en un circuito los perfiles de tensión, se debe revisar también como es el comportamiento de la tensión ante la variación de la potencia ya que si ante una variación de potencia mínima se presenta una variación de potencia significativa quiere decir que el sistema estará próximo a colapso de tensión. Ver Figuras 52 y 54.
- ✓ El parámetro R/X es mayor a la unidad para redes de media tensión, lo que hace que los flujos de potencia activa sean mayores que los de reactiva y por lo tanto generen variación en las tensiones. Figura 12 y Tabla 5.
- ✓ Entre mayor longitud tengan los circuitos entre el punto de generación hasta los nodos donde se encuentran las cargas, mayor será la afectación de control de tensión y la variación de los perfiles de tensión, debido al aumento de impedancias de línea ya que este es directamente afectado por la longitud. Ver ítem 4.5.3.
- ✓ Las variaciones de la curva P-V se debe a que el análisis se está realizando primero que todo en el nodo más lejano del circuito, lo cual pone de antemano menor valor de tensión y adicionalmente por ser una carga resistiva tiene gran influencia sobre ella la potencia activa, por lo cual ante variaciones de la P se presentan grandes disminuciones en la tensión de este punto. Ver Tabla 7.
- ✓ Ante la pérdida de estabilidad de tensión en la red operando de manera aislada, se debe inyectar mayor potencia reactiva a la red, pero no es rentable ya que para su control de tensión es aproximadamente el doble de reactivos que debe inyectar respecto a la potencia activa, por ello se buscan otros medios de control de tensión como el corte de carga o load shedding y control de cargas que permitan recuperar el sistema y no perder la estabilidad de tensión ni disminuir los perfiles de tensión a través de la red. Ver ítem 4.5.2 y 4.7, Tabla 7.
- ✓ Se debe tener en cuenta que con niveles de penetración moderados en una red de distribución, las tecnologías de GD no afectarían negativamente a las tensiones de

red, y por el contrario ayuda a mejorar los perfiles de tensión en los nodos de la misma. Ver ítem 4.5.4.

- ✓ Actualmente las redes eléctricas y la normativa no están 100% preparadas para la integración masiva de las energías renovables, por lo que es necesario disponer de un sistema que gestione la GD y que permita una correcta operación de la red. Para de esta manera garantizar la correcta operación de la GD, pero que se mantengan los requerimientos técnicos de confiabilidad y calidad del servicio. Ver Ítem 2.1.2
- ✓ Mediante el desarrollo del trabajo se pudo comprobar que llevando a cabo reducciones de carga en la red, por ejemplo utilizando respuesta de la demanda o conocido como load sheeding se mejoran los perfiles de tensión en los nodos del circuito, ya que disminuye la potencia requerida de los GD. Ver Ítem 4.5.2
- ✓ Se debe rescatar de la GD que ayuda fuertemente en el tema de reducción de emisiones contaminantes para el medio ambiente, ya que con la implementación de estas tecnologías usando como materia prima los recursos renovables se está apuntando a disminuir la contaminación del medio ambiente. Ver Ítem 2.1.1
- ✓ Con la implementación de GD se puede ayudar al SEP en las horas de máxima demanda, ya que ella puede está inyectando constantemente a la red y de esta manera disminuir la congestión en las redes. Ver Ítem 2.1.3
- ✓ Es menos óptimo para la red operando de manera aislada, si se concentran todos los GD en un solo punto, pues aunque se mantienen valores aceptables de tensión en el punto de conexión, la tensión en los nodos más lejanos disminuye más que si se tuvieran los GD distribuidos por toda la red. Ver ítem 4.5.3 y Figuras de la 40 a la 46.
- ✓ El impacto en las tensiones en redes de distribución típicas, debido la inyección de potencia activa es mayor que el resultante de inyectar potencia reactiva, justo lo contrario a lo que ocurre en las redes de transporte. La impedancia de las líneas de distribución tiene una componente resistiva similar o mayor a su componente

inductiva (no así en las líneas de transporte). Esta característica hace que la caída de tensión por variación de los flujos de potencia activa tenga un mayor efecto que la originada por los flujos de reactiva. [16]

- ✓ La diferencia entre los niveles de tensión por cada una de las fases del circuito se debe a que no todas las cargas se alimentan de la misma fase y por lo tanto la red de distribución es desbalanceada y presentan diferentes longitudes e impedancias. Ver ítem 4.3.
- ✓ Se debe tener en cuenta que para obtener resultados óptimos de la GD, se debe realizar una buena planeación y distribución a través de la red de los generadores a instalar, esto se puede cumplir validando los puntos donde los perfiles de tensión están bajos y el consumo de cada circuito.
- ✓ Se debe considerar que los resultados varían de acuerdo a cada red y el modo en que se explota, su topología, el número de instalaciones y los clientes conectados.
- ✓ Para que los gestores de la red de distribución puedan convertir su gestión de red en una gestión más activa es fundamental incentivar a la empresa de distribución para realizar inversiones que le permitan garantizar la calidad de suministro eléctrico y permitir la conexión de nueva GD.

5.2 Trabajos Futuros

- ✓ De acuerdo a toda la documentación y simulaciones realizadas en el presente documento, se ve la necesidad de realizar estudios sobre las tecnologías de generación más adecuadas para las diferentes configuraciones y topologías que se presentan en las redes de distribución, con el fin de obtener un patrón que permita identificar rápidamente qué clase de GD emplear o en qué localización y con qué factor de penetración debe incluirse en la red, para obtener resultados óptimos.

- ✓ Otro tema para trabajos futuros, que se identifica mediante el desarrollo del proyecto es la necesidad acerca de los sistemas de almacenamiento para los sistemas de generación a pequeña escala y dependientes de una materia prima que no se puede regular, como el sol y el viento, ya que ante falta de este recurso, se pueda mantener la demanda por medio de la energía almacenada, con lo que se da continuidad al servicio y se mejora la calidad y confiabilidad del sistema.
- ✓ Si bien la implementación de GD es de gran contribución para el sistema y los clientes del mismo, se deben realizar estudios económicos para validar la rentabilidad de la ejecución de estos proyectos, y las inversiones que se deben realizar a todos los sistemas con el fin de obtener buenos y confiables resultados, frente a los múltiples beneficios que conlleva su desarrollo.
- ✓ En caso que el operador de red decida realizar la implementación de la GD junto con el SEP, se debe contar de dispositivos de comunicación avanzados que permitan la interacción en cuanto a información de medidas y de todo lo que está pasando en la red, esto junto con un concentrador que se encargará de dar las señales necesarias a los equipos para mantener la estabilidad de tensión ante una contingencia en la red. Del mismo modo, si la red se implementa con GD operando de manera aislada se debe diseñar un sistema por ejemplo SCADA que permita monitorear y analizar el comportamiento del sistema para permanecer en mejora continua del sistema.
- ✓ Un punto primordial que se detecta mediante el desarrollo del trabajo, y que se debe estudiar aún más, es la inclusión de normativa clara y eficiente sobre las características técnicas que debe tener la GD para no disminuir la calidad del servicio y adicionalmente que incentive con compensaciones para poder recuperar las inversiones realizadas a mediano plazo, de la GD con la inclusión de recursos renovables.
- ✓ Se deben trabajar más en los estudios de redes de distribución operando de manera aislada, ya que con esto aparte de poder determinar la mejor opción de localización y niveles de penetración de la GD, se pueden estudiar comportamientos de la red como las pérdidas en la potencia activa y reactiva y adicionalmente

verificar el tema de la congestión en la red, si aumenta o disminuye con la integración de GD en el sistema.

- ✓ Mediante el desarrollo de este caso práctico, se determina la necesidad de desarrollar un estudio completo sobre el termino Load Shedding, ya que este será una herramienta necesaria para mantener la estabilidad en la red pero su planificación e intervención con los usuarios merece un tratamiento más complejo para poder implementarlo.

A. Anexo: TECNOLOGIAS DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA

En el Anexo A se dan las especificaciones técnicas y características generales, sobre las demás tecnologías que pueden ser empleadas en la GD:

✓ **Motor de combustión o Alternativas:**

Su aplicación es considerada como una Pequeña Central Hidroeléctrica (PCH) y sus rangos de potencia generada son los siguientes:

- Diesel → 20kW – 10+MW
- Gas → 5kW – 5+MW



Figura 57. GD – PCH [55]

✓ **Turbina de Gas:**

Tiene como aplicación PCH y generadores de suministro en horas punta, con un rango entre 1 – 20MW.

✓ **Micro-turbina:**

Su aplicación es considerada como PCH, Se utilizan para cualquier tipo de generación: básica, demanda de horas punta, cogeneración. Los rangos empleados por esta tecnología corresponden a:

- 25kW – 200kW
- 35Kw – 1MW
- Aplicaciones a pequeña escala <1Kw

✓ **Eólica:**

Aprovechamiento del aire en movimiento originado por la diferencia de presión.

Energía primaria → Viento

Potencia (MW) → 0,005 – 5

Al incidir sobre las palas del aerogenerador, la energía cinética del viento se transforma en energía de presión provocada por el calentamiento desigual de la superficie terrestre. Transmitiendo un giro al eje. Un generador transforma la energía mecánica en energía eléctrica.



Figura 58. GD - Eólica

✓ **Biomasa:**

Aprovecha la energía química de la materia orgánica, producida de las plantas verdes a través de fotosíntesis, la cual es transformada en energía eléctrica.

Energía primaria → Biomasa

Se puede clasificar en dos grupos:

- a. Biomasa Vegetal: Excedentes agrícolas, residuos forestales y agrícolas, ganaderos, industriales y urbanos.
- b. Cultivos energéticos: Son plantaciones realizadas con la única finalidad de ser utilizadas como fuente de energía (calor). [1]

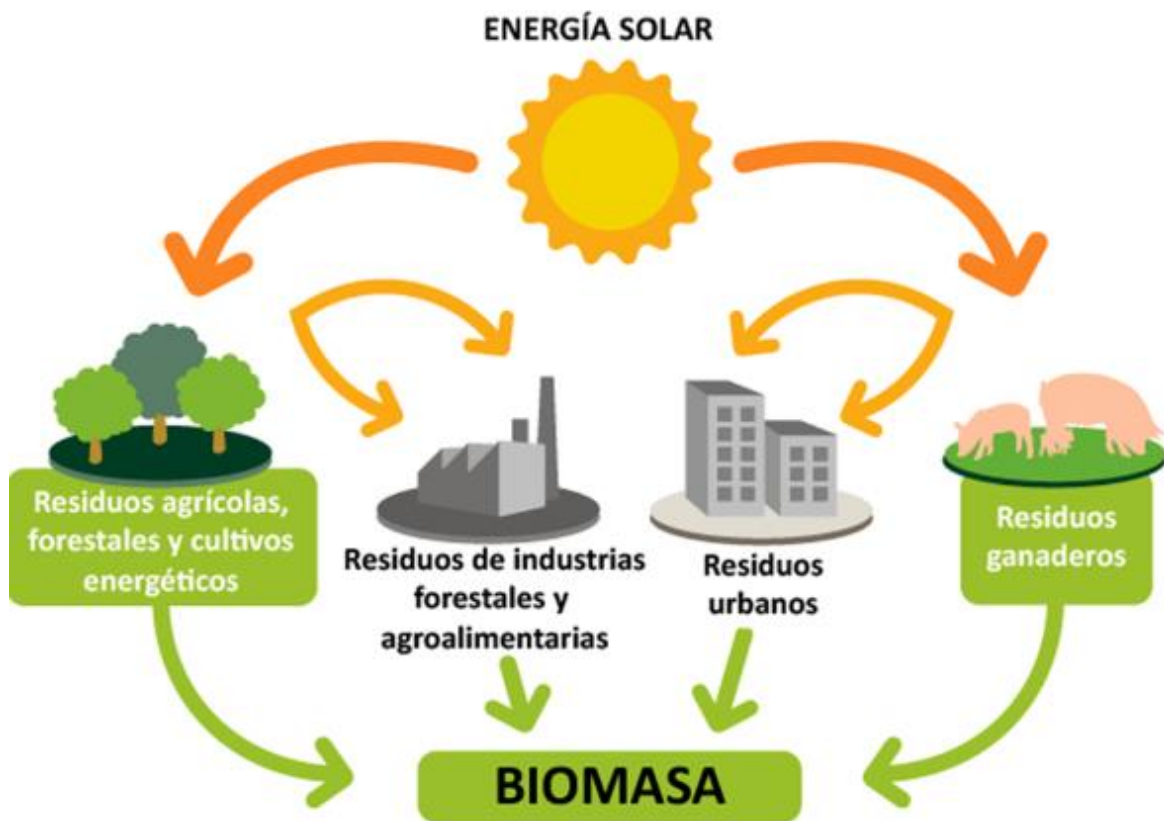


Figura 59. GD – Biomasa [57]

B. Anexo: ELEMENTOS NECESARIOS PARA EL CONTROL DE TENSIÓN EN EL SEP.

En el anexo B, se da una explicación clara acerca de la funcionalidad de cada uno de los componentes del sistema que contribuyen a la mejora de los niveles de tensión:

- a. **Transformadores:** Presentan una participación activa en el control de tensión debido a los cambios de transformación variables que pueden tener [11], estos cambios los pueden hacer bajo carga o sin carga es decir que se debe desconectar para realizar el cambio de toma.

Los transformadores realizaran entonces las veces de Condensador, o bobina cuando aumentan o disminuyen tensión y permitirán el cambio de nivel de tensión moviendo reactivos de unos niveles de tensión a otros, esto cuando está en redes malladas.

- b. **Generadores:** Los generadores síncronos permiten generar y absorber potencia reactiva de la red, al igual que los generadores fotovoltaicos, debido al inversor que utilizan para conexión a la red tienen el mismo efecto y adquieren entonces como resultado que pueden subir y bajar tensiones. Por el contrario están los generadores asíncronos que solo permiten el consumo de potencia reactiva lo que impide su participación en el control de tensión.

Existen también Compensadores Síncronicos, los cuales corresponden a generadores empleados para generar potencia reactiva en el sistema operando como motores y controlando la corriente de excitación [28].

- c. **Condensadores y reactancias:** Se refiere a una compensación estática, que genera un aumento o disminución de la tensión en el punto de red que se conecte respectivamente el condensador o la reactancia.

El uso de los condensadores se puede especificar de dos maneras:

Control de tensión: Se implementan para obtener mayor nivel de tensión, en las redes de 400, 230, 115, 66 y 33kV.

Mejorar el factor de potencia: Se implementan para disminuir los flujos de potencia reactiva en las redes, utilizadas en los siguientes niveles de tensión (13,2kV y 230/120V).

En la red de transporte se emplean las reactancias en la noche para disminuir las tensiones ya que estas aumentan debido a la baja demanda del sistema.

- d. Compensador Estático de Reactiva – SVC:** Estos compensadores son generadores o cargas estáticas conectados de forma shunt o en paralelo, con dispositivos de absorción y control apropiados que permiten realizar el control de tensión en el sistema. Son llamados estáticos ya que se diferencian de los compensadores síncronos pues no tienen componentes primarios rotativos [33].
- e. Líneas Eléctricas muy cargadas:** Ya que las líneas consumen potencia reactiva y su relación es cuadráticamente con la intensidad, esto genera que a mayor carga de una línea consumirá más reactivos. Y por el contrario una línea sin carga se comportara como un condensador. [15]

Las líneas intervienen en la red activamente cuando el objetivo es disminuir las tensiones en la red de transporte, para los otros niveles no intervienen activamente pero si influyen en las tensiones y en los flujos de reactiva por la red.

En la Figura 60, se puede ver más claramente cuáles son los diferentes comportamiento en cuanto a la generación o absorción de reactivo en el sistema y que a su vez tiene implicaciones en el control de tensión, para las líneas subterráneas se tiene que estas generan más reactivos que las aéreas, por otro lado a mayor nivel de tensión se generan más reactivos y a menor nivel de tensión estando las líneas cargadas consumirán menos reactivos. [15]

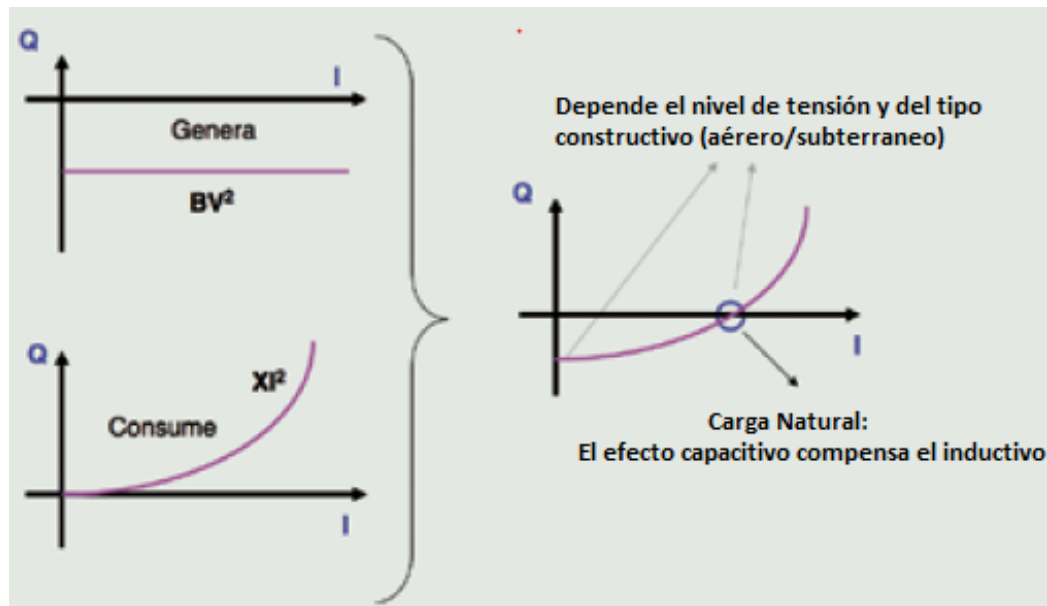


Figura 60. Potencia reactiva en las líneas eléctricas.

Existen diferentes métodos de regulación de voltaje dependiendo el nivel de tensión en los que se quiera realizar este control, ya que como lo hemos mencionado anteriormente el efecto se reflejará en mayor proporción para niveles de tensión más altos, pero que aun así depende de las necesidades de cada empresa electrificadora: [15]

i. La red de 400 y 230kV:

- Controlar los generadores para que aporten o consuman energía, con lo que se puede subir o bajar la tensión.
- Controlar los cambiadores de tomas de los transformadores subiendo o bajando el nivel de tensión y optimizando los flujos de potencia reactiva, se logra con el cambiador de tomas manual.
- Conectando o desconectando condensadores o reactancias de la red. (100-300 Mvar)
- Abriendo circuitos en horas valle, para que no se comporten como condensadores y suba demasiado el nivel de tensión.

ii. La red de 115 kV:

- Conectando o desconectando banco de condensadores, este método es empleado para elevar tensiones antes de maniobrar el transformador. (15 – 20 Mvar)
- Controlar los cambiadores de tomas de los transformadores subiendo o bajando el nivel de tensión y optimizando los flujos de potencia reactiva, se logra con el cambiador de tomas manual.

iii. La red de 33kV:

- Conectando o desconectando banco de condensadores. (5 – 15 Mvar)
- Controlar los cambiadores de tomas de los transformadores subiendo o bajando el nivel de tensión, en forma automática.

iv. La red de 13,2kV:

- Conectando o desconectando banco de condensadores. (1 – 3 Mvar), con lo cual se corrige el factor de potencia y se disminuyen los flujos de potencia reactiva en la red.
- Controlar los cambiadores de tomas de los transformadores subiendo o bajando el nivel de tensión, en forma automática.
- Instalando reguladores de tensión situados en las líneas de media tensión muy largas.

v. La red de Baja Tensión 230/115V:

- Se realiza en los centros de transformación de regulación sin carga ni tensión.
- Se emplean condensadores que son instalados por los clientes y se usan para la corrección del factor de potencia.

- f. Clase de demanda:** las características de las cargas influyen en el control de voltaje, un ejemplo son los motores de inducción los cuales absorben potencia reactiva y por lo tanto bajan el voltaje del sistema.

Por lo general todas las cargas de un sistema absorben potencia reactiva; se debe tener en cuenta que tanto la potencia activa como la reactiva varían en función del

voltaje, por ejemplo un factor de potencia bajo en atraso causa una caída de voltaje en la red de transmisión.

Las cargas industriales son cargados de potencia activa y reactiva, ya que estos incentivan a mejorar el factor de potencia con el uso de capacitores shunt [33]

C. Anexo: CARACTERÍSTICAS DE LA RED EXTERNA Y PLANTAS DE GENERACIÓN

En este anexo se pueden encontrar las características sobre la red externa y las plantas de generación, suministrada por el operador de red para modelarlas en DigSilent.

CARACTERÍSTICAS DE CORTO TRIFASICO EN BARRAS DE 13,2 kV

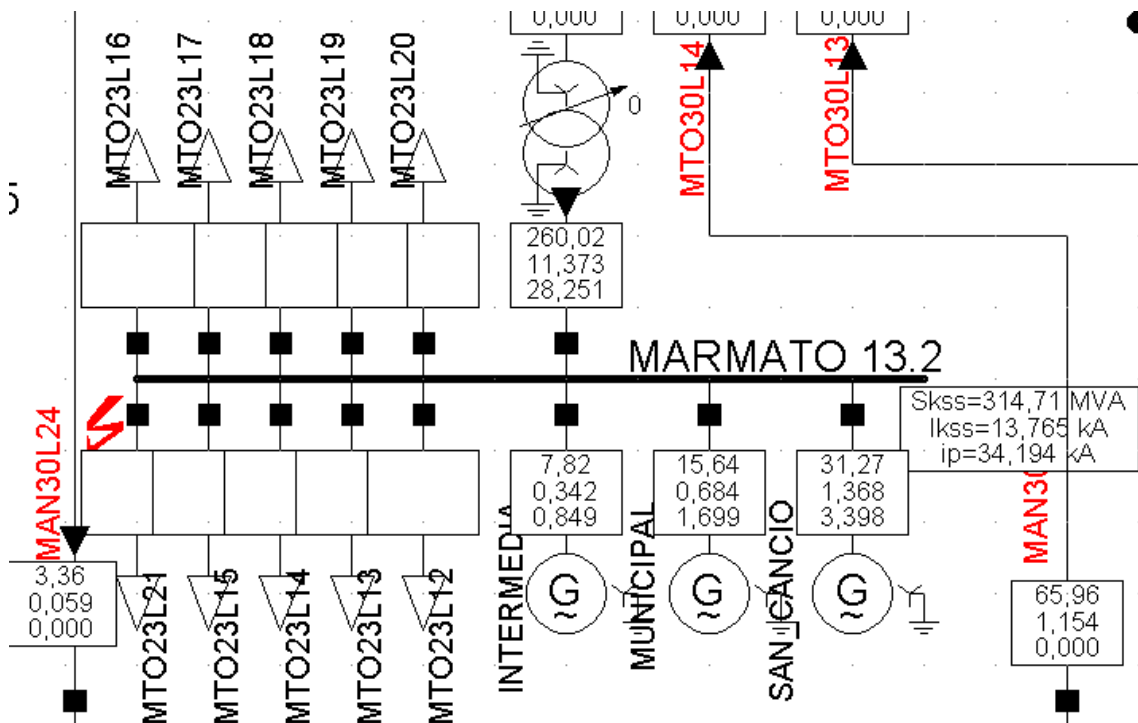


Figura 61. Características cortocircuito Trifásico

CARACTERÍSTICAS DE CORTO MONOFASICO EN BARRAS DE 13,2 kV

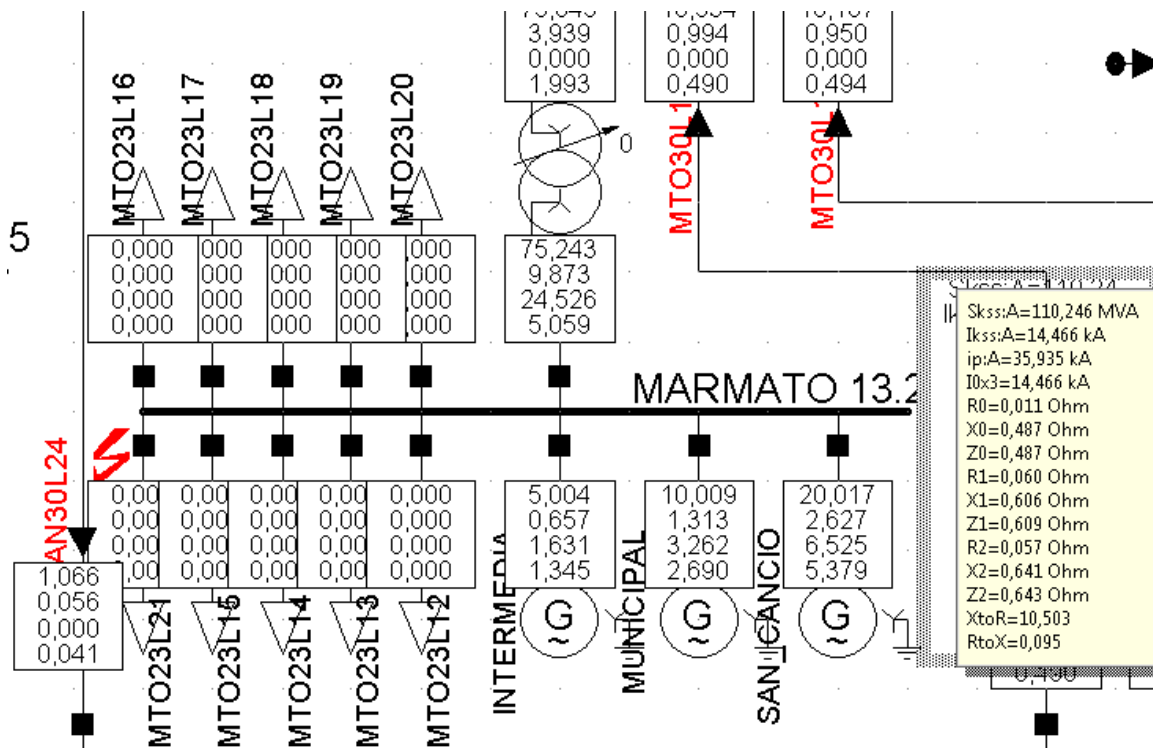


Figura 62. Características cortocircuito Monofásico

FLUJO DE CARGA:

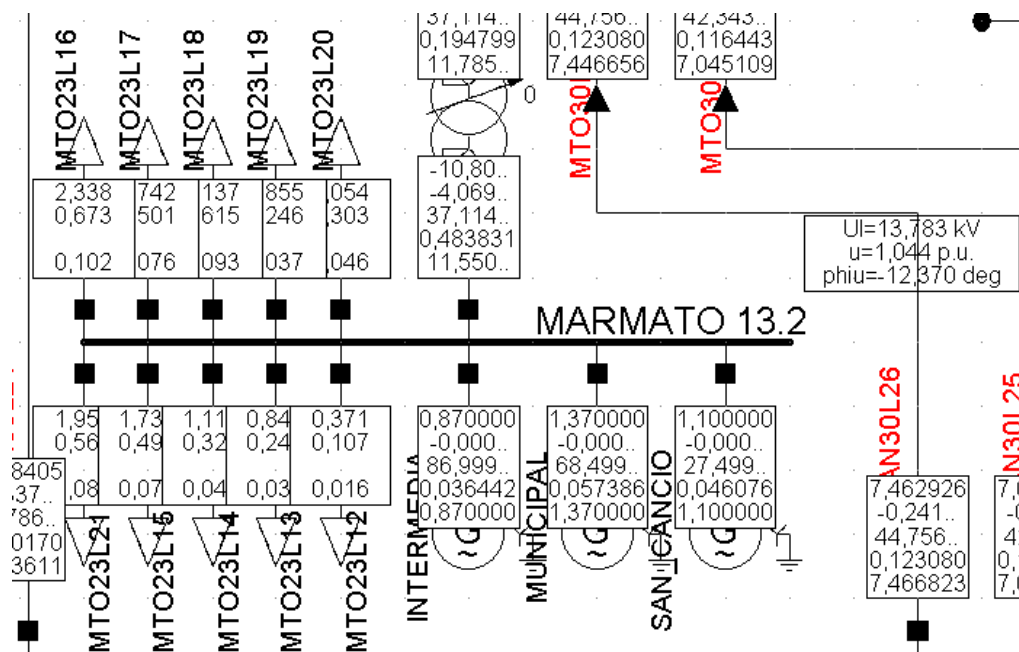


Figura 63. Flujo de Carga

CONFIGURACIÓN GENERADORES PCH:

1. PLANTA INTERMEDIA:

Synchronous Machine - CQR 115/33 kV\CHEC-ZonaCentro\INTERMEDIA.ElmSym

Basic Data

Load Flow

VDE/IEC Short-Circuit

Complete Short-Circuit

ANSI Short-Circuit

IEC 61363

RMS-Simulation

EMT-Simulation

Harmonics/Power Quality

Protection

Optimal Power Flow

State Estimation

Reliability

Generation Adequacy

Description

General | **Advanced** | Automatic Dispatch

Spinning if circuit-breaker is open

Reference Machine

Corresponding Bus Type: PQ

Mode of Local Voltage Controller

Power Factor

Voltage

External Secondary Controller: [v] [r] ...

External Station Controller: [v] ...

Dispatch

Input Mode: Default

Active Power: 0,87 MW

Reactive Power: 0, Mvar

Voltage: 1, p.u.

Angle: 0, deg

Prim. Frequency Bias: 0, MW/Hz

Capability Curve

Reactive Power Operational Limits

Capability Curve: [v] [r] ...

Use limits specified in type

Min. -1, p.u. -1, Mvar Scaling Factor (min.) 100, %

Max. 1, p.u. 1, Mvar Scaling Factor (max.) 100, %

Active Power Operational Limits

Min. 0, MW

Max. 9999, MW Pn 0,72 MW

Active Power: Rating

Max. 0,72 MW Rating Factor 1, Pn 0,72 MW

Synchronous Machine Type - CQR 115/33 kV\Library\Maquinas Sincronicas\INTERMEDIA.TypSym

Basic Data

Load Flow

VDE/IEC Short-Circuit

Complete Short-Circuit

ANSI Short-Circuit

IEC 61363

RMS-Simulation

Name: INTERMEDIA

Nominal Apparent Power: 1, MVA

Nominal Voltage: 13,2 kV

Power Factor: 0,72

Connection: YN

Synchronous Machine Type - CQR 115/33 kV\Library\Maquinas Sincronicas\INTERMEDIA.TypSym

Basic Data	Stator Resistance rstr <input type="text" value="0,"/> p.u.
Load Flow	Subtransient Reactances <input type="checkbox"/> Use saturated value xd'' <input type="text" value="0,14"/> p.u.
VDE/IEC Short-Circuit	Transient Reactances xd' <input type="text" value="0,35"/> p.u.
Complete Short-Circuit	Zero Sequence Data Reactance x0 <input type="text" value="0,03"/> p.u. Resistance r0 <input type="text" value="0,"/> p.u.
ANSI Short-Circuit	Neg. Sequence Data Reactance x2 <input type="text" value="0,2"/> p.u. Resistance r2 <input type="text" value="0,"/> p.u.
IEC 61363	
RMS-Simulation	
EMT-Simulation	
Harmonics/Power Quality	
Protection	
Optimal Power Flow	

Synchronous Machine Type - CQR 115/33 kV\Library\Maquinas Sincronicas\INTERMEDIA.TypSym

Basic Data	Synchronous Reactances xd <input type="text" value="1,05"/> p.u. xq <input type="text" value="0,48"/> p.u.
Load Flow	Reactive Power Limits Minimum Value <input type="text" value="-1,"/> Mvar Maximum Value <input type="text" value="1,"/> Mvar
VDE/IEC Short-Circuit	Zero Sequence Data Reactance x0 <input type="text" value="0,03"/> p.u. Resistance r0 <input type="text" value="0,"/> p.u.
Complete Short-Circuit	Neg. Sequence Data Reactance x2 <input type="text" value="0,2"/> p.u. Resistance r2 <input type="text" value="0,"/> p.u.
ANSI Short-Circuit	
IEC 61363	
RMS-Simulation	
EMT-Simulation	
Harmonics/Power Quality	
Protection	

Figura 64. Características Planta Intermedia

2. PLANTA MUNICIPAL:

Synchronous Machine - CQR 115/33 kV\CHEC-ZonaCentro\MUNICIPAL.ElmSym

Basic Data | Load Flow | VDE/IEC Short-Circuit | Complete Short-Circuit | ANSI Short-Circuit | IEC 61363

RMS-Simulation | EMT-Simulation | Harmonics/Power Quality | Protection | Optimal Power Flow | State Estimation | Reliability | Generation Adequacy

Description

General | Advanced | Automatic Dispatch

Spinning if circuit-breaker is open

Reference Machine

Corresponding Bus Type: PQ

Mode of Local Voltage Controller
 Power Factor
 Voltage

External Secondary Controller [v] [r] [] ...

External Station Controller [v] [r] [] ...

Dispatch

Input Mode: Default [v] [] ...

Active Power: 0,685 MW

Reactive Power: 0 Mvar

Voltage: 1 p.u.

Angle: 0 deg

Prim. Frequency Bias: 0 MW/Hz

Capability Curve

Reactive Power Operational Limits

Capability Curve [v] [r] [] ...

Use limits specified in type

Min. -1 p.u. -1 Mvar Scaling Factor (min.) 100 %

Max. 1 p.u. 1 Mvar Scaling Factor (max.) 100 %

Active Power Operational Limits

Min. 0 MW

Max. 9999 MW Pn 0,72 MW

Active Power: Rating

Max. 0,72 MW Rating Factor 1 Pn 0,72 MW

Synchronous Machine Type - CQR 115/33 kV\Library\Maquinas Sincronicas\MUNICIPAL.TypSym

Basic Data | Load Flow | VDE/IEC Short-Circuit | Complete Short-Circuit | ANSI Short-Circuit | IEC 61363

Name: MUNICIPAL

Nominal Apparent Power: 1 MVA

Nominal Voltage: 13,2 kV

Power Factor: 0,72

Connection: YN [v]

Synchronous Machine Type - CQR 115/33 kV\Library\Maquinas Sincronicas\MUNICIPAL.TypSym

Basic Data	Synchronous Reactances	
Load Flow	x _d 1,05 p.u.	
VDE/IEC Short-Circuit	x _q 0,48 p.u.	
Complete Short-Circuit	Reactive Power Limits	→
ANSI Short-Circuit	Minimum Value -1, Mvar	
IEC 61363	Maximum Value 1, Mvar	
RMS-Simulation	Zero Sequence Data	Neg. Sequence Data
EMT-Simulation	Reactance x ₀ 0,03 p.u.	Reactance x ₂ 0,2 p.u.
Harmonics/Power Quality	Resistance r ₀ 0, p.u.	Resistance r ₂ 0, p.u.
Protection		

Synchronous Machine Type - CQR 115/33 kV\Library\Maquinas Sincronicas\MUNICIPAL.TypSym

Basic Data	Stator Resistance	
Load Flow	r _{str} 0, p.u.	→
VDE/IEC Short-Circuit	Subtransient Reactances	
Complete Short-Circuit	<input type="checkbox"/> Use saturated value	
ANSI Short-Circuit	x _d " 0,14 p.u.	
IEC 61363	Transient Reactances	
RMS-Simulation	x _d ' 0,35 p.u.	
EMT-Simulation	Zero Sequence Data	Neg. Sequence Data
Harmonics/Power Quality	Reactance x ₀ 0,03 p.u.	Reactance x ₂ 0,2 p.u.
Protection	Resistance r ₀ 0, p.u.	Resistance r ₂ 0, p.u.
Optimal Power Flow		

Figura 65. Características Planta Municipal

3. PLANTA SANCANCIO:

Synchronous Machine - CQR 115/33 kV\CHEC-ZonaCentro\SAN_CANCIO.ElmSym

Basic Data | **Load Flow** | VDE/IEC Short-Circuit | Complete Short-Circuit | ANSI Short-Circuit | IEC 61363

RMS-Simulation | EMT-Simulation | Harmonics/Power Quality | Protection | Optimal Power Flow | State Estimation | Reliability | Generation Adequacy

Description

General | Advanced | Automatic Dispatch

Spinning if circuit-breaker is open

Reference Machine

Corresponding Bus Type: PQ

Mode of Local Voltage Controller
 Power Factor
 Voltage

External Secondary Controller: ...

External Station Controller: ...

Dispatch

Input Mode: Default

Active Power: 0,55 MW

Reactive Power: 0, Mvar

Voltage: 1, p.u.

Angle: 0, deg

Prim. Frequency Bias: 0, MW/Hz

Capability Curve

Reactive Power Operational Limits

Capability Curve: ...

Use limits specified in type

Min. -1, p.u. -2, Mvar Scaling Factor (min.) 100, %

Max. 1, p.u. 2, Mvar Scaling Factor (max.) 100, %

Active Power Operational Limits

Min. 0, MW

Max. 9999, MW Pn 1,44 MW

Active Power: Rating

Max. 1,44 MW Rating Factor 1, Pn 1,44 MW

Synchronous Machine Type - CQR 115/33 kV\Library\Maquinas Sincronicas\SAN_CANCIO.TypSym

Basic Data | Load Flow | VDE/IEC Short-Circuit | Complete Short-Circuit | ANSI Short-Circuit | IEC 61363

Name: SAN_CANCIO

Nominal Apparent Power: 2, MVA

Nominal Voltage: 13,2 kV

Power Factor: 0,72

Connection: YN

Synchronous Machine Type - CQR 115/33 kV\Library\Maquinas Sincronicas\SAN_CANCIO.TypeSym

Basic Data	Synchronous Reactances	
Load Flow	x_d 1,05 p.u.	
VDE/IEC Short-Circuit	x_q 0,48 p.u.	
Complete Short-Circuit	Reactive Power Limits	
ANSI Short-Circuit	Minimum Value -2, Mvar	→
IEC 61363	Maximum Value 2, Mvar	
RMS-Simulation	Zero Sequence Data	Neg. Sequence Data
EMT-Simulation	Reactance x_0 0,03 p.u.	Reactance x_2 0,2 p.u.
Harmonics/Power Quality	Resistance r_0 0, p.u.	Resistance r_2 0, p.u.
Protection		

Synchronous Machine Type - CQR 115/33 kV\Library\Maquinas Sincronicas\SAN_CANCIO.TypeSym

Basic Data	Stator Resistance	
Load Flow	r_{str} 0, p.u.	→
VDE/IEC Short-Circuit	Subtransient Reactances	
Complete Short-Circuit	<input type="checkbox"/> Use saturated value	
ANSI Short-Circuit	x_d'' 0,14 p.u.	
IEC 61363	Transient Reactances	
RMS-Simulation	x_d' 0,35 p.u.	
EMT-Simulation	Zero Sequence Data	Neg. Sequence Data
Harmonics/Power Quality	Reactance x_0 0,03 p.u.	Reactance x_2 0,2 p.u.
Protection	Resistance r_0 0, p.u.	Resistance r_2 0, p.u.
Optimal Power Flow		

Figura 66. Características planta Sancancio.

Bibliografía

1. Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid. Guía Básica de la Generación Distribuida. Gráficas Elisa S.A, 2012.
2. Romero Rubio Carmen, Las Comunidades Energéticas y La Generación Distribuida. AulaGreencities, 2015.
<http://aulagreencities.coamalaga.es/las-comunidades-energeticas-y-la-generacion-distribuida/> (Agosto 2014)
3. José David Name. Semana Sostenible, Negocios Verdes. (Agosto 2014)
<http://sostenibilidad.semana.com/negocios-verdes/articulo/llego-hora-energias-renovables-no-convencionales-colombia/31657>.
4. Presidente Ejecutivo José Arturo Quirós. CC Energía Cámara Colombiana de la Energía, <http://www.ccenergia.org.co/notauexternado.html> (Agosto 2014).
5. Johan Driesen and Farid Katirae. Design for Distributed Energy Resources, IEEE Xplore power & energy magazine. Agosto (2014)
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4505824>
6. Jorge Ramirez. Estabilidad en Micro Redes. Matlab/Simulink in Renewable Energy Noviembre 2014. <http://jmirez.wordpress.com/2012/02/22/j419-estabilidad-en-microredes/>
7. Bella Espinar and Didier Mayer. The Role of Energy Storage for Mini-Grid Stabilization, Photovoltaic Power System Programme
<http://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=web&cd=1&ved=0CBsQFjAA&url=http%3A%2F%2Fiea->

pvps.org%2Findex.php%3Fid%3D227%26elD%3Ddam_frontend_push%26docID%3D744&ei=p0JtVLmkLoGhNqn_gKgG&usg=AFQjCNGkGdw2aVgMH4FQ9fm5f7V1ZFmVJQ&sig2=WynHfZBU-rFhyJI2UFtSyw&bvm=bv.80120444,d.eXY

8. ENDESA Educa. Generación Distribuida,
http://www.endesaeduca.com/Endesa_educarecursos-interactivos/smart-city/generacion-distribuida (Enero 2015)
9. Gómez. Generación Distribuida, http://e-spacio.uned.es/fez/eserv/tesisuned:IngInd-Mgomez/TESIS_MGG1_Capitulo2.pdf
10. Juan Miguel Mantilla, Carlos A. Duque, Carlos H. Galeano. Análisis del esquema de generación distribuida como una opción para el sistema eléctrico Colombiano. http://ingenieria.udea.edu.co/grupos/revista/revistas/nro044/10rev_44.pdf
11. Alireza Zakariazadeh, Omid Homae, Shahram Jaid, Pierlugui Siano. A new approach for real time voltage control using demand response in an automated distribution System
12. Salvador Ruiz-Romero, Antonio Colmenar-Santos, Francisco Mur-Pérez & África López-Rey. Integration of distributed generation in the power distribution network: The need for smart grid control systems, communication and equipment for a smart city — Use cases
13. Rashad M. Kamel and Aymen Chauouachi. Three Control Strategies to Improve the Microgrid Transient Dynamic Response During Isolated Mode: A Comparative Study
14. Ismael Antonio Sánchez. El rol de las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas en el Desarrollo Sostenible, Alianza en Energía y Ambiente con Centroamérica <http://es.slideshare.net/gwpcam/el-rol-de-las-pequeas-centrales-hidroelctricas-en-el-desarrollo-sostenible-de-la-regin> (Diciembre 204)

15. David Trebolle, Pablo Frías, José María Maza & José Luis Martínez. El Control de tensión en redes de distribución con Generación Distribuida I. http://www.revista-anales.es/web/n_13/pdf/seccion_3.pdf
16. David Trebolle, Pablo Frías & Jorge Tello. El Control de tensión en redes de distribución con Generación Distribuida II. http://www.revista-anales.es/web/n_14/pdf/seccion_3.pdf
17. David Trebolle, Pablo Frías, José María Maza, Jorge Tello & Andrea Rodríguez. El Control de tensión en redes de distribución con Generación Distribuida III http://www.revista-anales.es/web/n_15/pdf/seccion_3.pdf
18. Jesús M. Riquelme Santos. Control integral de tensiones en las redes de media y baja tensión, FutuRed. <http://www.futured.es/wp-content/uploads/2012/03/Presentaci%C3%B3n1.pdf>
19. Generación Distribuida: Impacto en las redes de distribución, Colombia Inteligente http://www.rcgsas.com/Documentos/Seminario/SRI-UN_s05.pdf. (Agosto 2014).
20. Análisis general de la ley 1715 y su impacto en las ZNI de Colombia. IPSE – Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para ZNI. (Agosto 2014). <http://www1.upme.gov.co/sgic/sites/default/files/PRESENTACION%20UPME%20TALLER.compressed.pdf>
21. Ley 1715 de 2014. Agosto (2014). <http://wsp.presidencia.gov.co/Normativa/Leyes/Documents/LEY%201715%20DEL%2013%20DE%20MAYO%20DE%202014.pdf>
22. Instituto de planificación y promoción de Soluciones energéticas para las zonas no interconectadas. Ley 1715 de 2014. Agosto (2014). <http://www.ipse.gov.co/ipse/comunicaciones-ipse/noticias-ipse/893-nueva-ley-1715-de-2014-promueve-el-aprovechamiento-de-las-fuentes-no-convencionales-de-energia>
23. Mariana López, Ramón A. Gallego & Ricardo A. Hincapié, Mejoramiento del perfil de tensión en sistema de distribución usando generación distribuida. Scientia et

-
- Technica, Universidad Tecnológica de Pereira. (Octubre 2014)
http://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/1757/1167_11
24. Felipe Guillermo Castro, Impacto de la generación distribuida en la estabilidad de sistemas de potencia. Universidad de Chile. Agosto (2014)
http://tesis.uchile.cl/bitstream/handle/2250/112742/cf-castro_fe.pdf?sequence=1 8
25. Stamatios Diolettas, J. Lloveras, Las ventajas de la generación eléctrica distribuida. Universidad Politécnica de Cataluña (UPC). (Enero 2015)
<http://www.unizar.es/aeipro/finder/INGENIERIA%20DE%20PRODUCTOS/BB22.htm>
26. Jesús María Goiri. La Generación Eléctrica Distribuida. EVE Ente Vasco de la Energía; (Abril 2015)
http://www.fundaciongasnaturalfenosa.org/SiteCollectionDocuments/Actividades/Seminarios/San%20Sebasti%C3%A1n%20120704/20040726_Gioiri.pdf (GOIRI 2004).
27. Hernán F. Pacheco; Adecuación de la generación distribuida en los sistemas de energía eléctrica actual; EnerDossier
<http://www.offnews.info/downloads/EnerdossierInforme30042010.pdf> (Abril 2015)
28. Control de Tensión en Sistemas eléctricos de potencia. XM filial de ISA. (Abril 2015)
http://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=web&cd=1&ved=0CBsQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.xm.com.co%2FMemoriasCapacitacionEMSA%2FControl_Voltaje%2FControl_Voltaje.pdf&ei=4xcgVfjXGcHWsAXexoGYBw&usq=AFQjCNGJ0-RRo9_Hy6-y6EqLiCKYDdfErw&sig2=-pXrnmqBiUptT78CU8jfOA&bvm=bv.89947451,d.eXY
29. Felipe Guillermo Castro Elgueta, Impacto de la Generación Distribuida en la estabilidad de sistemas de potencia, Universidad De Chile.
30. Francisco M. Gonzales & Longatt. Estabilidad en sistemas de potencia.
http://fglongatt.org/OLD/Archivos/Archivos/SP_II/Capitulo2-1.pdf

31. William D. Stevenson, Análisis de sistemas eléctricos de potencia.
http://blog.espol.edu.ec/econde/files/2012/08/analisis_de_sistemas_electricos_de_potencia_stevenson_.pdf
32. Felipe Valencia Arroyave. Tesis de Maestría, Efecto de la carga dinámica en la estabilidad de tensión.
<http://www.bdigital.unal.edu.co/2014/1/felipevalenciaarroyave.2008.pdf>
33. Francisco M. Gonzales – Logatt. Control de Q-V,
http://fglongatt.org/OLD/Archivos/Archivos/SP_II/Captiulo5.pdf
34. Mariano Gaudó, Jorge Tello, Fernando Salazar & Alfonso Carraza. Proyecto PRICE (Generación Distribuida) Gas Natural Fenosa con las redes Inteligentes y desarrollos a nivel Europeo en cuanto a integración de la GD.
http://www.priceproject.es/sites/default/files/otros/documentos-interes/price-gdi_paper_ii_congreso_de_generacion_distribuida.pdf
35. Vannia Isabel Toro. Análisis de impacto dinámico de pequeños medios de generación sobre redes de distribución.
http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/103702/cf-toro_vb.pdf?sequence=3
36. Mariana López, Ramón A. Gallego & Ricardo A. Hincapié. Mejoramiento del perfil de tensión en sistemas de distribución usando generación distribuida.
<http://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/1757/1167>
37. A. Arango Manrique. Caracterización del Esquema Remunerativo del Control de Tensión en el mercado eléctrico Colombiano.
<https://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=web&cd=1&ved=0CBsQFjAA&url=https%3A%2F%2Fwww.grupoenergiadebogota.com%2Fcontent%2Fdownload%2F2299%2F35101%2Ffile%2FMaestr%25C3%25ADa%2520Tercer%2520Lugar.pdf&ei=9tAqVczDAoTjsATLh4CwCA&usg=AFQjCNFNMcYPJWfmU7TFRRBvehepzApvag&sig2=vQApWcfFehCzjd0bZKKnPg&bvm=bv.90491159,d.cWc>

-
38. T. Basso and N.R. Friedman, IEEE 1547 National Standard for Interconnecting Distributed Generation: How Could It Help My Facility? Preprint, National Renewable Energy Laboratory 1617 Cole Blvd. Golden, CO 80401-3393 <http://www.nrel.gov/docs/fy04osti/34875.pdf>
 39. Tijani, Hafeez Olasunkanmi, IEEE 1547 Series Standards, National Standard for interconnecting distributed generation with electrical power systems (EPS) (Mayo 2015) <http://es.slideshare.net/thafeezolasunkanmi/ieee-1547-15150505>
 40. Borja Fernández, proyecto AGDA (Aerogenerador de media potencia para Generación Distribuida y Autoconsumo): "El mercado está en Reino Unido, Italia, Canadá, Suramérica. (Mayo, 2015) " <http://www.energias-renovables.com/articulo/el-mercado-esta-en-reino-unido-20150415>
 41. Atersa inaugura la primera planta solar FV de Jordania (Mayo, 2015) <http://www.energias-renovables.com/articulo/atersa-inaugura-la-primera-planta-solar-fv-20150521>
 42. Hydro – Québec, Self-generation without compensation plan (Mayo 2015) <http://www.hydroquebec.com/autoproduction/docs/depliant-info-sans-compensation.pdf>
 43. Mike Munsell, US Microgrid Capacity Will Exceed 1.8GW by 2018 (Mayo 2015) <http://www.greentechmedia.com/articles/read/US-Microgrid-Capacity-Will-Exceed-1.8-GW-by-2018>
 44. Ecomec Tecnología, Desbalance de Tensiones en sistemas trifásicos (Mayo 2015) <http://www.ecamec.com/newsletter/bajarnotaa0909.pdf>
 45. ESKOM, What is load Shedding, (Mayo 2015) <http://loadshedding.eskom.co.za/loadshedding/description>

46. Durban Business Fair, Load Shedding Stage: 1, (Mayo 2015)
http://www.durban.gov.za/City_Services/electricity/Load_Shedding/Pages/default.aspx
47. ENERGREENCOL, SAS, Soluciones de energía para áreas rurales en Colombia
http://www.energreencol.com/ficheros_pdf/Energia%20para%20areas%20rurales%20en%20Colombia.pdf (Mayo 2015)
48. DIgSILENT PowerFactory Technical Reference Documentation, Static Generator ElmGenstat.
49. SOLICLIMA Energía Solar
<http://www.soliclima.es/minihidraulica> (Agosto 2015)
50. Martín Duran y Andrea Lobo Guerrero, Energías renovables en el ámbito rural: desde las microgrids y la generación distribuida como alternativas.
http://energyforenergy.blogspot.com/2012/07/normal-0-21-false-false-false-es-trad-x_31.html (Agosto 2015)
51. Francisco M. Gonzáles – Longatt, GIAELEC Aspectos de Regulación en la Integración de Generación Distribuida <http://fglongatt.org/OLD/Reportes/PRT2008-03.pdf> (Agosto 2015)
52. Eliana Camargo et al, Universidad Industrial de Santander, Normas técnicas para la implementación de sistemas de generación distribuida.
<http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/2934/2/129493.pdf> (Agosto 2015)
53. IEC TS 62.257-1: 2013, Recomendaciones para pequeños sistemas de energía e híbridos renovables para la electrificación rural.
<https://webstore.iec.ch/publication/6647&prev=search> (Agosto 2015)
54. Alternative Energy Grids, Recommendations for small renewable energy and hybrid systems for rural electrification. IEC-62257 series.

<http://www.energy4humandevlopment.com/2011/11/iec-62257-series-recommendations-for.html> (Agosto 2015)

55. ALTERIMA <http://www.alterima.com.br/index.asp?InCdSecao=35> (Agosto 2015)

56. Elemental Energies. <http://www.elementalenergiesec.com/paneles-fotovoltaicos-en-ecuador/paneles-fotovoltaicos-para-casas/> (Agosto 2015)

57. Biomasa, ventajas e inconvenientes <https://www.piselmoinmobiliaria.com/biomasa-ventajas-e-inconvenientes/> (Agosto 2015)