



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

# **STUDY OF SMART GRIDS FRAMED IN THE CONCEPT OF MICROGRIDS**

## **Application in minimizing energy losses**

**Cesar Arango Lemoine**

Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales  
Facultad de Ingeniería y Arquitectura  
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación  
Manizales, Colombia

2014

# **ESTUDIO DE LAS REDES INTELIGENTES ENMARCADAS EN EL CONCEPTO DE LAS MICRO-REDES**

## **Aplicación en la minimización de pérdidas de energía**

**Cesar Arango Lemoine**

Trabajo presentado como requisito parcial para optar al título de:

**Magister en Ingeniería Eléctrica**

Director:

Dr. Armando Jaime Ustariz Farfán

Línea de Investigación en Calidad de la energía

Grupo de Investigación en Calidad de la Energía y Electrónica de Potencia "GICEP"

Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación

Manizales, Colombia

2014

*A mi familia*

## **Agradecimientos**

A la Universidad por permitirnos aprender a estas alturas de la vida.

Al profesor Armando Jaime Ustariz por su acertada y brillante dirección, porque creyó en mí a pesar de todo.

Al profesor Eduardo Antonio Cano por su constante apoyo, porque me ayudó a perseverar y por sus acertados consejos ... porque me hizo "barra".

A la profesora Sandra Ximena Carvajal porque me facilitó alguna parte del material que me sirvió de apoyo y porque siempre estuvo dispuesta a la discusión del tema ... me ayudó a subir mi autoestima en los picos mas bajos de este proceso.

A la profesora - hija Adriana Arango porque me facilitó documentos claves para la mejor comprensión del tema, porque me dedicó largas jornadas de reflexión sobre los tópicos relacionados con este trabajo y porque me apoyó además con su infinito afecto.

A la estudiante Paula Andrea Muñoz por su invaluable ayuda en la recopilación, en la clasificación y en el ordenamiento del material con que se elaboró el trabajo. Por su apoyo total y por su buena disposición.

## Resumen

Este trabajo presenta, en primer lugar, una revisión crítica del estado del arte. La revisión se enfoca en la descripción de la evolución de las redes eléctricas, en las últimas décadas, comenzando con la inclusión de la generación distribuida, pasando luego por el concepto de las micro-redes para finalizar con el auge de las redes inteligentes.

En segunda instancia, se expone un resumen de los principales conceptos, elementos y tecnologías necesarios para minimizar las pérdidas de potencia y energía, así como para mejorar el perfil de tensión en una red inteligente enmarcada en el concepto de las micro-redes.

Finalmente, se muestran varios ejemplos aplicativos del funcionamiento de las redes inteligente enmarcada en el concepto de las micro-redes, mediante la implementación y simulación de casos de estudio básicos enfocados a la mejora del perfil de tensiones y a la minimización de pérdidas de potencia y energía.

**Palabras clave: Generación Distribuida, Micro-Redes, Pérdidas de Potencia, Perfil de Tensión, Redes Inteligentes**



## **Abstract**

This work presents, first, a critical review of the state of the art. The review focuses on the description of the evolution of electricity networks, in recent decades, beginning with the inclusion of distributed generation, and then going through the concept of micro-networks to end with the rise of smart grids.

Secondly, a summary of the main concepts, components and technologies necessary to minimize losses of power and energy, and to improve the voltage profile in an intelligent network framed by the concept of micro-networks is presented.

Finally, several applications of the operation of intelligent networks framed by the concept of micro-networks through the implementation and simulation of cases focused on improving the voltage profile basic study examples and minimizing power losses and energy are presented

**Keywords: Distributed Generation, Micro Grids, Power Losses, Voltage Profile, SmartGrids.**





# Contenido

	Pág.
<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>4</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>6</b>
1.1. MOTIVACIÓN E INTERÉS POR EL TEMA .....	7
1.2. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA .....	7
1.3. OBJETIVOS DEL PRESENTE TRABAJO .....	9
1.4. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO.....	10
<b>CAPÍTULO 2 .....</b>	<b>13</b>
<b>2. EVOLUCIÓN DE LAS REDES ELÉCTRICAS.....</b>	<b>15</b>
2.1. RED ELÉCTRICA CONVENCIONAL.....	15
2.2. GENERACIÓN DISTRIBUIDA .....	18
2.3. MICRO-REDES.....	23
2.4. REDES INTELIGENTES .....	26
2.5. SÍNTESIS .....	32
<b>CAPÍTULO 3 .....</b>	<b>35</b>
<b>3. MINIMIZACIÓN DE PÉRDIDAS DE ENERGÍA .....</b>	<b>37</b>
3.1. ASPECTOS TEÓRICOS .....	37
3.2. REGULACIÓN DE TENSIÓN .....	39
3.3. PÉRDIDAS DE ENERGÍA .....	43
3.4. METODOLOGÍA IMPLEMENTADA .....	43
3.5. SÍNTESIS .....	49
<b>CAPÍTULO 4 .....</b>	<b>51</b>
<b>4. EJEMPLIFICACIÓN DE MICRO-REDES INTELIGENTES.....</b>	<b>53</b>
4.1. SUPOSICIONES Y RESTRICCIONES .....	53
4.2. SISTEMAS DE PRUEBA .....	53
4.3. EFECTOS DE LA PENETRACIÓN DE LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA.....	59
4.4. EFECTOS DE LA INYECCIÓN DE POTENCIA REACTIVA .....	64

4.5. SÍNTESIS .....	69
<b>CAPÍTULO 5.....</b>	<b>71</b>
<b>5. CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS .....</b>	<b>73</b>
5.1. CONCLUSIONES GENERALES.....	73
5.2. FUTUROS DESARROLLOS.....	74
5.3. DISCUSIÓN ACADÉMICA.....	75
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>76</b>

# Lista de figuras

	Pág.
Figura 1 – Red eléctrica centralizada .....	16
Figura 2 – Red eléctrica con generación distribuida .....	19
Figura 3 – Sistema eléctrico con micro-redes .....	24
Figura 4 – Esquema de una red inteligente.....	27
Figura 5 – Árbol de Implicaciones de una red inteligente ideal.....	29
Figura 6 – Modelo de línea corta .....	45
Figura 7 – Modelo serie y paralelo de las cargas.....	45
Figura 8 – Diagrama unifilar del sistema de 33 nodos .....	54
Figura 9 – Perfil de tensión del sistema de 33 nodos.....	56
Figura 10 – Diagrama unifilar del sistema de 69 nodos .....	57
Figura 11 – Perfil de tensión del sistema de 69 nodos .....	59
Figura 12 - Diagrama unifilar del sistema de 33 nodos modificado (GD) ....	60
Figura 13 – Perfil de tensión del sistema de 33 nodos modificado (GD).....	61
Figura 14 - Diagrama unifilar del sistema de 69 nodos modificado (GD) ....	62
Figura 15 – Perfil de tensión del sistema de 69 nodos modificado (GD).....	63
Figura 16 - Diagrama unifilar del sistema de 33 nodos modificado (GD + SVC) .....	65
Figura 17 – Perfil de tensión del sistema de 33 nodos modificado (GD + SVC) .....	66
Figura 18 - Diagrama unifilar del sistema de 69 nodos modificado (GD + SVC) .....	67
Figura 19 – Perfil de tensión del sistema de 69 nodos modificado (GD + SVC) .....	68

# LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1: Datos del sistema de 33 nodos .....	55
Tabla 2: Resumen de los resultados del sistema de de 33 nodos .....	56
Tabla 3: Datos del sistema de 69 nodos .....	58
Tabla 4: Resultados del sistema de 69 nodos .....	59
Tabla 5: Datos de la generación distribuida instalada en el sistema de 33 nodos .....	61
Tabla 6: Resultados del sistema de 33 nodos modificado (GD).....	62
Tabla 7: Datos de la generación distribuida instalada en el sistema de 69 nodos .....	63
Tabla 8: Resultados del sistema de 69 nodos modificado (GD).....	64
Tabla 9: Datos del SVC instalado en el sistema de 33 nodos.....	66
Tabla 10: Resultados del sistema de 33 nodos modificado (GD + SVC)....	66
Tabla 11: Datos del SVC instalado en el sistema de 69 nodos.....	68
Tabla 12: Resultados del sistema de 69 nodos modificado (GD + SVC)....	68



# CAPÍTULO 1

## Introducción

*Este capítulo presenta la motivación, la importancia del tema y la identificación del problema que ha dado lugar al desarrollo del trabajo. Para ello, se hace una presentación resumida de los antecedentes relativos a las redes inteligentes. Adicionalmente, los objetivos generales y particulares se enuncian y por último, se muestra la estructura general del documento.*



# 1.Introducción

En las últimas décadas, la economía, la sociedad y el mismo ecosistema demandan un nuevo esquema del sistema de energía eléctrica. Esta necesidad se presenta, debido a la aparición de cambios en las necesidades de los consumidores, tales como: (a) el interés en una mejor calidad de vida, (b) el interés por la optimización de los recursos y (c) el interés por la búsqueda de mecanismos de funcionamiento más amigables con el medio ambiente[1]. Por ello, se hace necesario un sistema de energía que se encuentre en un proceso de cambio continuo y que pueda proveer un servicio en forma económica, segura y lo más importante, sostenible.

Los modelos tradicionales de generación, transmisión y distribución no se ajustan correctamente a las necesidades y comportamiento actual del mercado, debido a que “la red eléctrica de hoy ha sido diseñada e implementada para cumplir con los requisitos establecidos en el siglo pasado[2]”. Por este motivo, urge la necesidad de introducir nuevas áreas de investigación y desarrollo que involucren tecnologías de punta, como lo son los conceptos de redes inteligentes (del inglés *Smart Grids*[3]) y de micro-redes (del inglés *Micro Grids*[4]), que busquen la descentralización de las decisiones, la automatización de las instalaciones, la sistematización de los recursos y el monitoreo permanente de las redes y equipos instalados.

Esta nueva tecnología, permitirá adaptar los sistemas eléctricos a un contexto competitivo y eficiente, logrando posicionarse como la opción más adecuada a la hora de enfrentarse a los retos que en la actualidad se plantean en los temas de confiabilidad del sistema y calidad en el suministro de la energía. Temas que han ido ganando cada vez más aceptación en el ámbito de la ingeniería eléctrica, y hoy día, se han convertido en un tema de especial interés tanto para las empresas prestadoras del servicio de energía eléctrica, como para los fabricantes de equipos y los consumidores finales.



## 1.1. Motivación e interés por el tema

En general, todos los países requieren energía para satisfacer su creciente demanda interna. Las principales fuentes de energía son el petróleo y sus derivados, así como también lo son las fuentes de energía hidráulica y nuclear. Sin embargo, en los últimos años, la industria eléctrica mundial ha experimentado cambios importantes dirigidos hacia la implementación de nuevas tecnologías como lo son las energías renovables o limpias, admitidas rápidamente por su escaso impacto ambiental[5].

En contraste, Colombia es considerada como una potencia hídrica. Por esta razón aproximadamente el 65.7% de generación de energía es de origen hidráulico, lo cual hace que las fuentes alternativas como la solar y la eólica sean poco usadas. Además, al ser una tecnología relativamente nueva (costosa) la relación costo/beneficio no es muy atractiva para los inversionistas, convirtiéndose en una limitante para la incorporación masiva de estos sistemas de energías renovables en el país. Sin embargo, en un futuro cercano los sistemas eléctricos en Colombia tenderán a incrementar el número de instalaciones de generación distribuida. Inicialmente, podría notarse el alto interés por instalar pequeñas centrales hidráulicas, por obvias razones, pero a medida pasen los años también se incrementará la instalación de fuentes alternativas, como la solar y la eólica, para atender necesidades locales[6].

Estas discrepancias, motivan el desarrollo de proyectos relacionados con la incorporación de estas fuentes de energía en el país y es la Universidad la llamada a tomar la iniciativa en estas discusiones investigativas y de desarrollo. Pero es el Estado el llamado a propiciar los recursos necesarios para adelantar una correcta apropiación tecnológica, la cual, sea realmente aplicable en el medio.

## 1.2. Identificación del problema

Las micro-redes y las redes inteligentes representan un concepto moderno y un tema de interés para muchas comunidades de investigación y desarrollo. La estructura básica de las redes eléctricas ha permanecido sin cambios por muchos años. La evolución tecnológica de nuevos equipos, el advenimiento de las nuevas fuentes renovables de energía y su localización distribuida, están cambiando el concepto de diseño de los sistemas eléctricos convencionales[7].

Es indiscutible, que la tradicional red jerárquica controlada centralmente, del siglo pasado, no está adaptada a las necesidades del futuro. Sin embargo, por motivos técnicos y económicos la infraestructura de estas antiguas redes seguirá existiendo por mucho tiempo. Por lo tanto, a las redes inteligentes solo les queda ir creciendo sobre las redes existentes, y coexistir con éstas, mientras se añaden nuevas funcionalidades, componentes y tecnologías vanguardistas a la totalidad de los sistemas eléctricos[8].

En la red eléctrica del futuro, la disponibilidad de mayor información y nuevas tecnologías de la comunicación permitirá una mejor gestión de los recursos existentes. En consecuencia, la nueva infraestructura posibilita el control y monitoreo tanto de los sistemas de generación de energía como de los usuarios finales que consumen esta energía, incrementando así la eficiencia energética [9]. Además, las herramientas de simulación de un ecosistema dinámico como el de la red inteligente, nos permitirá poner a prueba nuevos conceptos y enfoques de optimización de recursos.

Inmersos en estos escenarios, en los últimos años, se ha producido una importante modernización de las redes eléctricas. Esta modernización complica cada vez más la operación de la red de distribución, pues la red de distribución ya no se considera como una red de carácter radial donde los flujos de potencia van desde la cabecera hacia los extremos del alimentador. Por el contrario, la red de distribución moderna muestra un comportamiento diferente, pues ahora, micro-generadores distribuidos por todo el sistema de distribución de energía se conectan y desconectan sin ningún tipo de control por parte del operador de red[10].

La conexión y desconexión de estos generadores en los niveles más bajos del esquema jerárquico plantea una serie de problemas de naturaleza técnica y regulatoria. Problemas como la minimización de pérdidas de potencia y energía o la mejora del perfil de tensión en la red eléctrica del futuro, son el reto a resolver por parte de las comunidades científicas. Por lo tanto, definir el tamaño y la ubicación óptima de los micro-generadores (pequeñas centrales hidráulicas o fuentes renovables de energía) a ser instalados, así como, especificar el tamaño y la ubicación óptima de los bancos capacitivos en los sistemas de distribución modernos, serán los problemas que se deben resolver.

## **1.3. Objetivos**

El presente trabajo aborda las discusiones que en la actualidad se están dando alrededor de las redes inteligentes enmarcadas en el concepto de las micro-redes. Principalmente, se estudian los retos impuestos por este nuevo concepto de los sistemas de distribución en los métodos de minimización de las pérdidas de potencia y mejoras del perfil de tensión.

### **1.3.1.Objetivo general**

Exponer las principales características técnicas necesarias para minimizar las pérdidas de potencia y mejoras del perfil de tensión en las redes inteligentes enmarcadas en el concepto de micro-redes.

### **1.3.2.Objetivos específicos**

- Desarrollar una síntesis sobre la evolución de las redes eléctricas, en las últimas décadas, que muestre la forma natural como se ha ido integrando la generación distribuida y las diversas fuentes de energía renovables a los sistemas eléctricos convencionales.
- Identificar los principales conceptos, elementos y tecnologías necesarios para minimizar las pérdidas de potencia en una red inteligente enmarcada en el concepto de las micro-redes.
- Ejemplificar el funcionamiento de las redes inteligentes enmarcadas en el concepto de las micro-redes, mediante la implementación y simulación de casos de estudio básicos enfocados a la minimización de pérdidas de potencia.

Para cumplir con los objetivos planteados se han tenido que ejecutar una serie de etapas que se listan a continuación:

Etapas: 1: Recopilación de la bibliografía para conocer el estado del arte al inicio del trabajo.

- Etapa 2: Estudio de las redes de distribución, desde el punto de vista de la incursión de nuevas fuentes de energía, para sintetizar su evolución en las últimas décadas.
- Etapa 3: Análisis de las estrategias de ubicación y dimensionamiento de la generación distribuida (pequeñas centrales hidráulicas o fuentes renovables de energía), para mejorar el perfil de tensión.
- Etapa 4: Estudio de las técnicas de compensación de la potencia reactiva (bancos capacitivos o compensadores estáticos) para minimizar las pérdidas de potencia y de energía.
- Etapa 5: Ejemplificación mediante escenarios de simulación (*“Test IEEE N-Bus Radial Distribution System”*) los conceptos, elementos y tecnologías necesarios para minimizar las pérdidas de potencia en una red inteligente.

## 1.4. Estructura del documento

El **Capítulo 1**, expone la introducción general del trabajo final, presentando el contexto del desarrollo del trabajo, la identificación del problema, los objetivos perseguidos y la composición del documento.

En el **Capítulo 2**, se realiza una síntesis sobre la evolución de las redes eléctricas donde se muestra la forma como se ha ido integrando la generación distribuida y las diversas fuentes de energía renovables a las redes eléctricas convencionales.

El **Capítulo 3**, introduce los conceptos, elementos y tecnologías necesarios para minimizar las pérdidas de potencia debido al impacto generado por la dinámica de una red inteligente enmarcada en el concepto de las micro-redes.

En el **Capítulo 4**, se proponen varios escenarios de simulación. Estos escenarios ejemplifican el funcionamiento de las redes inteligentes enmarcado en el concepto de las micro-redes, mediante la implementación y simulación de casos de estudio básicos

enfocados a la minimización de pérdidas de potencia

El **Capítulo 5**, presenta las principales conclusiones de este trabajo final y se proponen futuros desarrollos.



# CAPÍTULO 2

## Evolución de las redes eléctricas

-

*Este capítulo presenta una revisión crítica de la evolución de las redes eléctricas a lo largo de la historia. En esta revisión se muestra la forma como se ha ido integrando la generación distribuida y las diversas fuentes de energía renovables a las redes eléctricas convencionales.*





## **2. Evolución de las redes eléctricas**

Los retos que representan los nuevos desarrollos en las redes eléctricas, están enmarcados principalmente en la vinculación de nuevas tecnologías, en la búsqueda de la eficiencia energética, en el uso masivo de los sistemas de generación distribuida, en el intercambio dinámico y bidireccional de la energía, en el almacenamiento de la energía y en la capacidad de recuperación de fallas de forma automática, entre otros temas.

Es por esto que en torno al tema son muchas las iniciativas que se están llevando a cabo en todo el mundo. Existiendo un consenso respecto al objetivo principal, que es desarrollar una red eléctrica más eficiente y fiable, que mejore la seguridad y calidad del suministro de energía, de acuerdo con los avances de la era digital[1].

### **2.1. Red eléctrica convencional**

En términos generales, una red eléctrica es el conjunto de elementos que operan de forma coordinada en un determinado territorio para satisfacer la demanda de energía eléctrica.

#### **2.1.1. Sistemas eléctricos de potencia**

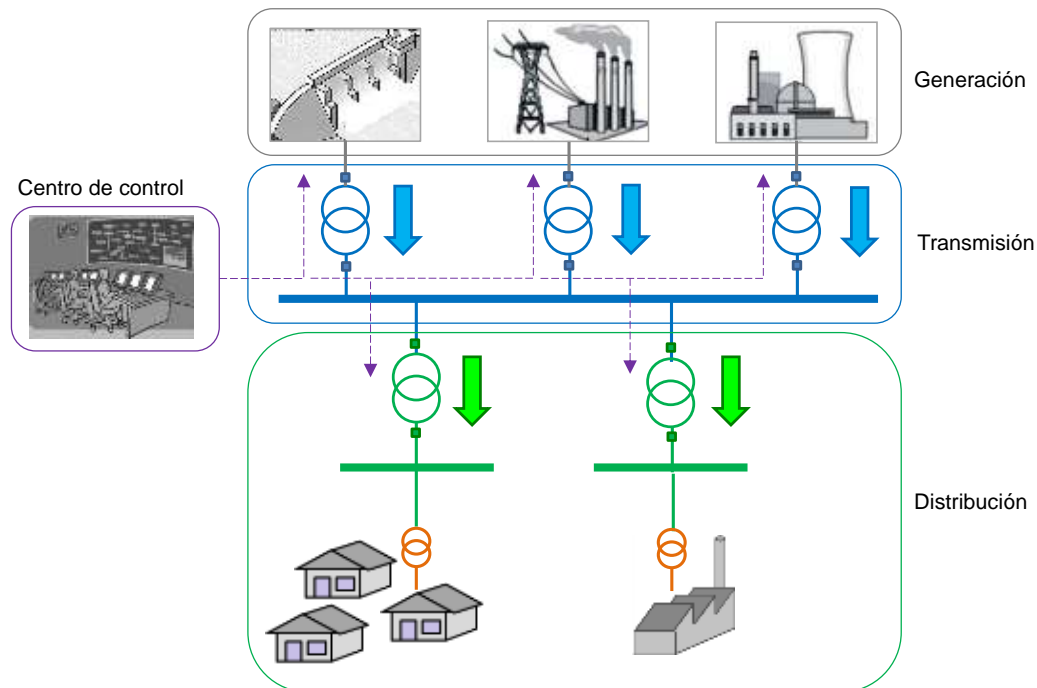
En sus comienzos, el sistema eléctrico de potencia se fundamentó en la corriente continua con la generación en el sitio del consumo. Después, como parte del crecimiento demográfico y de la demanda, evolucionó hacia el esquema de generación centralizada, precisamente porque la central eléctrica se encontraba en el centro geográfico del consumo, mientras que los consumidores crecían a su alrededor[6].

Con el tiempo, la generación eléctrica se estructuró como se conoce hoy en día, es decir, fundamentada en la corriente alterna, lo que permite llevar la energía eléctrica prácticamente a cualquier punto alejado del centro de generación. En esta estructura, la planeación, gestión, coordinación y operación de la red eléctrica se ejecuta de forma centralizada. Es así como, generalmente en un sistema de suministro eléctrico, son cinco los componentes básicos que conforman una estructura totalmente centralizada:

- a) Las plantas de generación, donde se produce la energía.
- b) Las estaciones transformadoras que reducen o elevan la tensión.
- c) Las líneas de transmisión de la energía eléctrica de alta tensión.
- d) Las líneas de distribución de media y baja tensión.
- e) Los centros de control donde se gestiona, coordina y opera la red.

Estos componentes, trabajan de manera interconectada, permitiendo el transporte de la energía desde los centros de generación hasta los consumidores finales. En la Figura 1. se muestra un ejemplo típico de un sistema de suministro eléctrico convencional centralizado.

**Figura 1** – Red eléctrica centralizada



En un sistema de potencia centralizado la energía normalmente recorre trayectos demasiado extensos, generando grandes pérdidas por el transporte de la energía. Para

mejorar la calidad en la prestación del servicio en el sistema eléctrico, entes reguladores, impulsan la utilización de sistemas de comunicaciones para mejorar el monitoreo y control del sistema eléctrico de potencia, principalmente en las etapas de generación y transmisión (tal como se muestra en la Figura 1 con líneas punteadas). El sistema de comunicaciones empleado es el sistema SCADA (del inglés *Supervisory Control And Data Acquisition*), una arquitectura de comunicación centralizada en configuración jerárquica maestro–esclavo.

### **2.1.2. Una visión hacia la modernización.**

Los sistemas eléctricos de potencia presentan fallas indeseables que se deben principalmente a que estos sistemas no han presentado mayores mejoras a lo largo del tiempo, razón por la cual, hoy se catalogan como sistemas obsoletos, ya que en su momento fueron construidos despreciando muchos de los factores que a futuro podrían ser influyentes, tales como: (a) el aumento en la demanda energética, (b) la conexión de equipos de características especiales, (c) los picos en las curvas de consumo en determinados momentos y (d) las grandes distancias entre generadores y consumidores. Estos factores han llevado a los sistemas eléctricos de potencia a operar cada vez más cerca de sus límites de estabilidad, dando como resultado descompensaciones en la red con el agravante de que en muchas ocasiones esta es incapaz de recuperarse por sí sola. Finalmente el resultado es un sistema de potencia con bajos niveles de confiabilidad y seguridad[8].

Una de las soluciones que se podrían plantear a la hora de pensar en cambios y mejoras a las redes eléctricas, es aumentar la capacidad de potencia instalada en las centrales generadoras para satisfacer la demanda y así aumentaría también la potencia que se debe transportar a lo largo de la red eléctrica. Lo anterior obligaría entonces a acondicionar, maximizar y extender de manera considerable la infraestructura ya existente, lo que finalmente desemboca en una inversión económica significativamente alta. Por otro lado, es evidente que uno de los ámbitos que han cobrado protagonismo en la actualidad, aumentando de manera notoria la dificultad en cuanto a la planeación y gestión de este tipo de proyectos de expansión, es el relacionado con el contexto ambiental, pues solo hasta hace algunos años se empezaron a adoptar medidas correctivas, sanciones disciplinarias e incluso acciones legales en contra de cualquier tipo de proyecto que vulnere la preservación del medio ambiente.

Por lo tanto, se evidencia la necesidad de plantear cambios innovadores, inmediatos

y eficaces dentro de los sistemas de potencia actuales. Dichos cambios deben solucionar de manera integral las dificultades existentes, de forma tal que se vean beneficiados todos los entes que hacen parte de la red de energía eléctrica.

## 2.2. Generación distribuida

En la década de los setentas, la crisis petrolera, el cambio climático y la alta tasa de demanda de energía eléctrica a nivel mundial, generaron la necesidad de alternativas tecnológicas para asegurar, por un lado, el suministro oportuno y de calidad de la energía eléctrica y, por el otro, el ahorro y el uso eficiente de los recursos naturales. Una de estas alternativas tecnológicas es generar la energía eléctrica lo más cerca posible al lugar del consumo. A esta modalidad de generación eléctrica se le conoce como generación distribuida (del inglés *distributed generation* "DG").

### 2.2.1. Definición

En la literatura, un gran número de términos y definiciones son usados para referirse a la generación distribuida. Por ejemplo, los términos comúnmente utilizados son: (a) generación embebida, (b) generación dispersa, (c) generación descentralizada y (d) generación in-situ. Además, en cuanto a la definición del concepto de generación distribuida, el Consejo Internacional sobre Grandes Sistemas Eléctricos (CIGRE) lo define como "todos los generadores con una capacidad máxima de entre 50 MW a 100 MW conectados al sistema eléctrico de distribución, y que no están diseñados ni despachados de forma centralizada" [11]. Sin embargo, una discusión detallada sobre la definición de la generación distribuida puede encontrarse en [12].

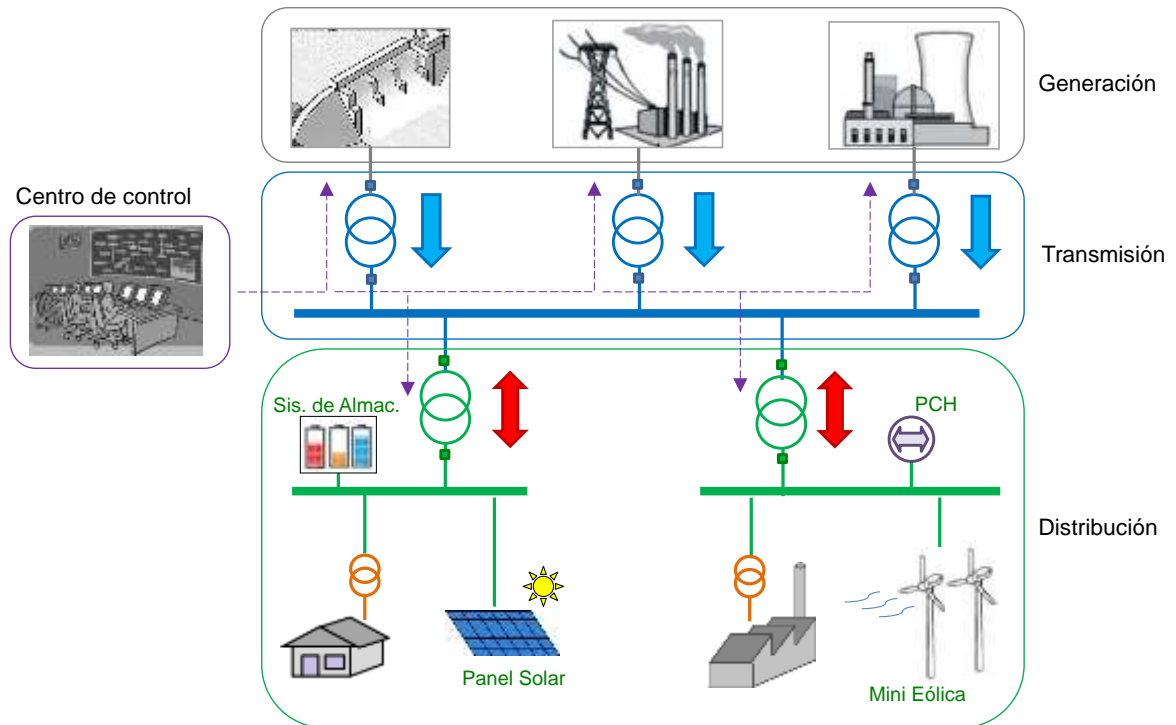
Para efectos de este trabajo se llamará generación distribuida a la fuente de generación que se conecta directamente a la red de distribución eléctrica. En esta definición no se determina el tamaño de la fuente de generación. Sin embargo, en [13] se sugieren las siguientes categorías:

- Micro-DG (generación distribuida:  $1W < 5KW$ )
- Small-DG (generación distribuida:  $5kW < 5MW$ )
- Medium-DG (generación distribuida:  $5MW < 50MW$ )
- Large-DG (generación distribuida:  $50MW < 300MW$ )

En la Figura 2 se muestra el diagrama unifilar de un sistema eléctrico de potencia con

generación distribuida asociada en el sistema de distribución de energía eléctrica.

**Figura 2**–Red eléctrica con generación distribuida



Gracias a la generación distribuida se puede tener un sistema eléctrico mucho más controlable, pues mediante esta generación se logran atender de manera más oportuna pequeñas fallas que se presentan en los sistemas de distribución, mejorando en gran medida el servicio que se está ofreciendo por las empresas electrificadoras (empresas distribuidoras del servicio de energía eléctrica)[14].

## 2.2.2. Fuentes de energía distribuida

### a) Pequeñas centrales hidroeléctricas

Esta fuente de energía distribuida son centrales hidroeléctricas que tienen una capacidad menor a los 5 MW. Las pequeñas centrales hidroeléctricas "PCHs" utilizan turbinas hidráulicas y generadores con dispositivos de control, que permiten mantener la frecuencia dentro de los límites establecidos en la normatividad gracias a la acción de los gobernadores, eliminando la diferencia entre la energía demandada y la generada, lo que mantiene la operación estable del sistema, y evita la desconexión de cargas.

Dentro de los efectos técnicos conocidos para el sistema que este tipo de generación

aporta, se cuenta entre otros, con el aumento en la calidad de la potencia y mejora en las magnitudes de la tensión, la confiabilidad y seguridad en el suministro de electricidad, que se refleja en los usuarios finales como una reducción de pérdidas e interrupciones en el abastecimiento.

### **b) Fuentes de cogeneración**

Este tipo de fuente de energía utiliza micro-turbinas de gas natural. Son básicamente unidades empacadas compuestas por un compresor, una turbina de gas y un generador eléctrico. Son capaces de generar electricidad en rangos comprendidos entre 30 KW y 500 KW, producen baja emisiones de óxido de nitrógeno y otros gases contaminantes para el medio ambiente.

En estos dispositivos se aprovechan los gases calientes, producidos por la combustión del gas con el agua, para hacer girar la pequeña turbina, la cual al mismo tiempo activa un alternador, el cual es el encargado de producir la energía eléctrica.

### **c) Pequeños generadores eólicos**

Esta fuente de energía aprovecha el movimiento y la velocidad de las masas de aire para producir energía mecánica en los rotores de los aerogeneradores, siendo esto posible gracias a la forma aerodinámica de las aspas del molino. Esta energía mecánica hace posible la generación de energía eléctrica. Hay que mencionar que las impredecibles variaciones de la velocidad del viento, además de las condiciones climáticas, producen cambios en la energía que pueda entregar el aerogenerador.

Por normatividad internacional, los generadores de energía mini-eólica no pueden sobrepasar una potencia de 100kW. Esta condición está establecida en la norma IEC 61400-2, donde básicamente se estipula que el área de barrido de estos no puede superar los 200m<sup>2</sup>. Los equipos están diseñados para generar en presencia de velocidades eólicas de alrededor de 15 km/h y su potencia máxima se puede dar a velocidades entre los 45 y 55 km/h. Si los aerogeneradores llegan a estar en presencia de vientos que superen los 90 km/h no siguen funcionando debido a sistemas y dispositivos de protección.

### **d) Paneles solares**

Es el aprovechamiento de la energía emanada por el sol hacia el planeta, que

mediante el uso de los dispositivos llamados células solares hace posible la conversión de ésta energía lumínica en energía eléctrica. Este dispositivo está hecho de materiales semiconductores, comúnmente silicio, que permite emitir electrones que producen corriente eléctrica debido a la captación de la luz solar en su superficie. A éste fenómeno se le conoce como efecto fotoeléctrico.

Actualmente, esta tecnología se está desarrollando de manera tal que su aprovechamiento de energía sea máximo, debido a que los paneles solares comúnmente logran una eficiencia cercana al 20% de 1KW por metro cuadrado, que es lo que la energía solar descarga sobre un panel con ésta área de superficie. Se espera que mediante los avances tecnológicos se pueda lograr una eficiencia de hasta el 50%, lo que reduciría enormemente los costos y permitiría su masificación.

Esta forma de generación de energía, se ha convertido en una excelente opción para viviendas que, por su ubicación, se hacen poco asequibles para las redes de transmisión de energía eléctrica, también para alumbrado público mediante farolas con alimentación fotovoltaica independiente, agricultura, señalización y comunicaciones.

La energía solar fotovoltaica representa un sistema de generación renovable con muchas más ventajas que desventajas, ya que no produce emisiones de  $CO_2$  al medio ambiente, ni genera gases de efecto invernadero que producen el calentamiento global. Es una solución con poco impacto, ya que es poco ruidosa y no requiere grandes tendidos eléctricos. Sin embargo, tiene un impacto visual grande, porque las instalaciones de generación fotovoltaica requieren un número considerable de celdas solares para lograr así una generación idónea.

### **e) Sistemas de almacenamiento de energía**

El actual desarrollo de las energías renovables implica la generación de energía usando fuentes renovables. Muchas de ellas tienen comportamiento aleatorio, como por ejemplo: la velocidad del viento sobre las turbinas eólicas, la radiación solar en las fuentes fotovoltaicas, entre otros. Las fuentes renovables están conectadas a las redes eléctricas pero la disponibilidad aleatoria de la energía primaria da como consecuencia períodos con exceso y deficiencia de energía. Esto ha llevado a que se desarrollen diferentes formas para almacenar la energía sobrante a fin de utilizarla cuando sea necesario y las condiciones de operación del sistema eléctrico lo permitan.

Normalmente se realiza una caracterización de las tecnologías de almacenamiento de energía de baja y larga duración. El almacenamiento de energía masivo para ser usado a nivel de carga, generación distribuida para atender los picos locales y calidad de energía para alta fiabilidad en usuario final, con importantes variaciones en el tiempo de descarga y la capacidad de almacenamiento. Las tecnologías de almacenamiento más conocidas son el almacenamiento de energía en baterías, en ruedas volantes y en súper capacitores.

### **2.2.3. Beneficios de la generación distribuida**

La principal ventaja de la generación distribuida, es la posibilidad que le ofrece a los operadores de red de poder reconfigurar y re-direccionar el flujo de potencia en forma rápida y eficiente, en respuesta a eventos tales como: fallos, cambios en la demanda o incluso cambios en los costos de generación de la energía. Otras ventajas son:

#### **f) Ventajas de tipo técnico:**

- Atenuación en los picos de demanda.
- Incremento en los indicadores de eficiencia energética.
- Acortaciones en las distancias de los sistemas de transmisión, lo que se reflejará en una disminución en los niveles de pérdidas de potencia.
- Impacto positivo sobre el nivel de tensión a lo largo del sistema y los problemas de calidad de energía.
- Minimización de fallas.
- Aumento considerable en la estabilidad, eficiencia y confiabilidad del sistema, permitiendo que este tenga la capacidad de auto-restablecerse en caso de fallas.

#### **g) Ventajas de tipo económico:**

- En un principio la inversión es alta pero evita procesos de mantenimiento y expansión de la infraestructura actual.
- Un aumento en la eficiencia energética, y la prolongación de la vida útil de los equipos desencadenan un ahorro en el combustible.
- Disminución de pérdidas económicas debidas a los pocos episodios de cortes en el suministro y a la disminución de pérdidas de potencia.
- Diversificación de los tipos de recursos energéticos y los combustibles utilizados.



**h) Ventajas de tipo medioambientales:**

- Generación por medio de energías renovables.
- Reducción considerable de la emisión de dióxido de carbono y gases contaminantes.
- Uso eficiente de la electricidad.
- Energía limpia.

**2.3. Micro-redes**

Durante los últimos años, el incremento de la demanda de energía ha sido atendido mediante el crecimiento de la oferta de energía centralizada en grandes generadores. Esto produce una sobreexplotación de la red de transporte de energía que conlleva, por un lado, una disminución en la disponibilidad de la misma por un incremento de las desconexiones, y por otro, una mayor influencia de las mismas al alimentar una mayor potencia instalada.

Una solución alternativa para obtener una mejor utilización de los recursos distribuidos de generación es ver el conjunto de la micro-generación y de las cargas como un subsistema o 'micro-red'[4]. Por lo tanto, la micro-red, puede ser gestionada como si fuera en su conjunto una unidad predecible de generación y consumo. Esta aproximación permite obtener determinados beneficios para la micro-red, tales como: (a) mejorar la continuidad del suministro de sus clientes, (b) optimizar la localización y la cantidad de generación interna y (c) incrementar la disponibilidad de la red principal de distribución como una especie de 'reserva'.

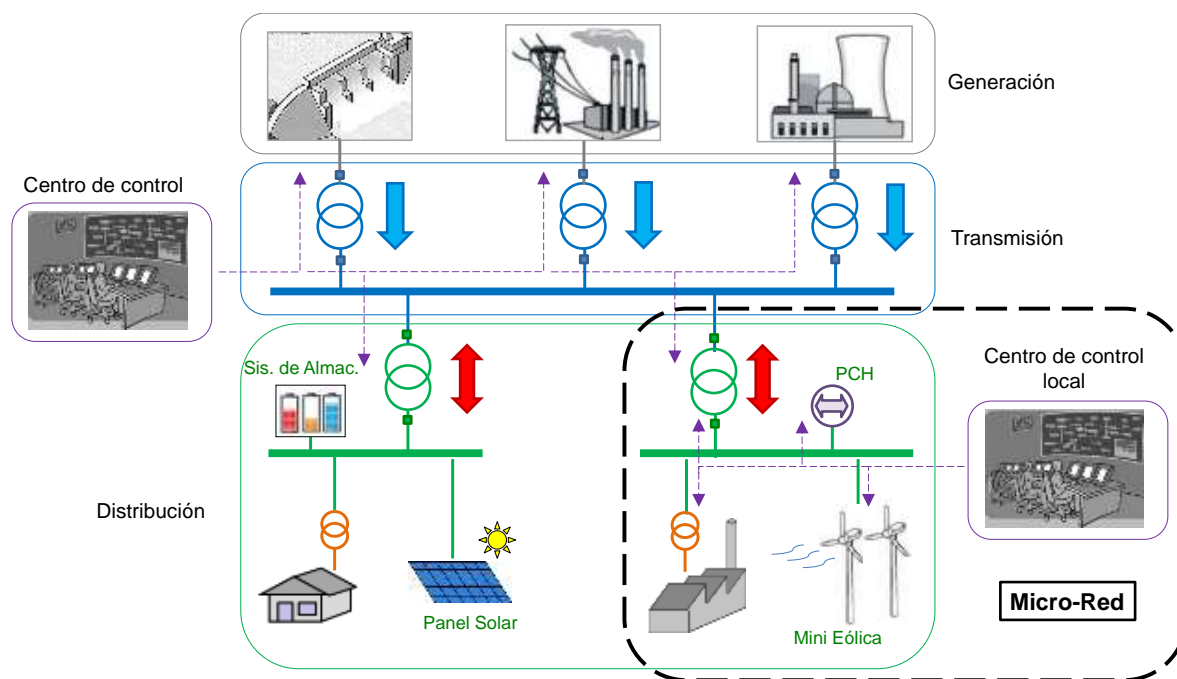
Para poder conseguir estas potencialidades se necesitan sistemas de control, coordinación y comunicación avanzados, que permitan la explotación intencionada y segura en 'isla'.

**2.3.1. Definición**

Las micro-redes son consideradas generalmente como pequeños sistemas de potencia, desplegados de la generación distribuida a pequeña escala, los cuales son auto gestionados localmente y pueden estar o no conectados a la red principal de distribución.

Una micro-red está compuesta por un conjunto de generadores distribuidos, sistemas de almacenamiento de energía y diversas cargas, pueden operar conectados o aislados de la red principal. Están en la capacidad de alimentar diferentes tipos de cargas, siendo esto una excelente alternativa para fomentar proyectos urbanísticos futuros, comunidades a las que por su ubicación, es muy costoso y complicado llevar el suministro eléctrico, sectores industriales que necesiten cierta calidad de suministro, hospitales, universidades, regiones con red eléctrica débil, etc.

**Figura 3**– Sistema eléctrico con micro-redes



Consecuente con lo anterior, la micro-red estará en capacidad de suministrar energía eléctrica a la red principal cuando ésta lo amerite, o en caso de una falla, ó aislarse para satisfacer las demandas críticas que no puedan sufrir una desconexión[15]. En la Figura 3 se muestra el diagrama unifilar de un sistema eléctrico de potencia con una micro-red asociada en el sistema de distribución de energía eléctrica.

En el tema del impacto medioambiental las micro-redes son una excelente opción, ya que sus micro-fuentes de generación son usualmente fuentes renovables o no convencionales. La escasez y el aumento de los precios de los combustibles fósiles hacen que se piense en modelos y métodos alternativos para ayudar al medio ambiente sin dejar de cumplir con la demanda.

### 2.3.2. Componentes de las micro-redes

El funcionamiento y control de muchas de las micro-fuentes que integran una micro-red están basados en electrónica de potencia, con lo que poseen la flexibilidad necesaria para garantizar la operación del sistema como un todo. Se trata por tanto de sistemas híbridos formados por la integración de varios sistemas de generación, tanto convencional como de origen renovable, con objeto de garantizar una base de continuidad en el suministro eléctrico[16].

Las componentes de una micro-red son:

- Variadas unidades de generación de fuentes renovables: eólica, fotovoltaica, hidroeléctrica, etc.
- Una o más unidades de generación convencional.
- Sistemas de almacenaje de tipo mecánico, electroquímico o hidráulico.
- Sistemas de acondicionamiento de potencia: inversores, rectificadores, reguladores de carga.
- Sistema de regulación y control.
- Cargas.

Se trata en definitiva de pequeños sistemas de distribución eléctrica auto-gestionados localmente (tal como se aprecia en la Figura 3). Si bien, se conoce que este sistema resulta ser una alternativa viable, se están llevando a cabo en el mundo numerosos proyectos e investigaciones sobre este tema, su implementación generalizada se ha visto retrasada debido a la falta de normatividad en cuanto a este tema se refiere.

### 2.3.3. Ventajas de las micro-redes

Las principales son:

- Las micro-redes permiten una mayor calidad del suministro, un mayor ahorro y una menor dependencia de la red de distribución.
- Podrían funcionar tanto conectados a la red principal de distribución como aislados de la misma.
- La cercanía a las micro-fuentes de generación aumentan considerablemente la eficiencia energética del sistema en su conjunto.
- La red de distribución se beneficia de las micro-redes, ya que éstas apoyan la operación del sistema en caso de fallo.
- Las micro-redes reducen las emisiones de gases de efecto invernadero y potencian la implementación de fuentes de energías renovables.

- Un aumento en el uso de las micro-redes suponen una reducción del costo de la energía, consumida por los usuarios, debido a la reducción de la demanda pico en la red de distribución.

Por otro lado, las ventajas económicas tanto para las empresas de energía como para los consumidores son apreciables. Las micro-redes ofrecen una mayor calidad del suministro de energía y un gran ahorro monetario, debido, entre otros aspectos, a que las micro-redes operan directamente a tensión de distribución. Esta característica evita pérdidas por transmisión, distribución e impacto ambiental. Además, su menor dependencia de la red principal de distribución, se refleja en un mayor control en el consumo y una optimización de los elementos de la red[17].

## 2.4. Redes inteligentes

El término “*Smart Grid*” (traducido al español como red eléctrica/energética inteligente) es utilizado para referirse a una nueva concepción de la red de transporte y distribución eléctrica enfocada a superar las deficiencias y necesidades actuales. En esta nueva concepción confluyen dos ideas: (a) el flujo de energía eléctrica y (b) el flujo de la información. Esta unión persigue conseguir que la electricidad y la información fluyan de forma conjunta en tiempo real, minimizando las pérdidas, permitiendo una gestión más eficiente de los sistemas eléctricos de transmisión y distribución, las fuentes de energía distribuida y las micro-redes[18].

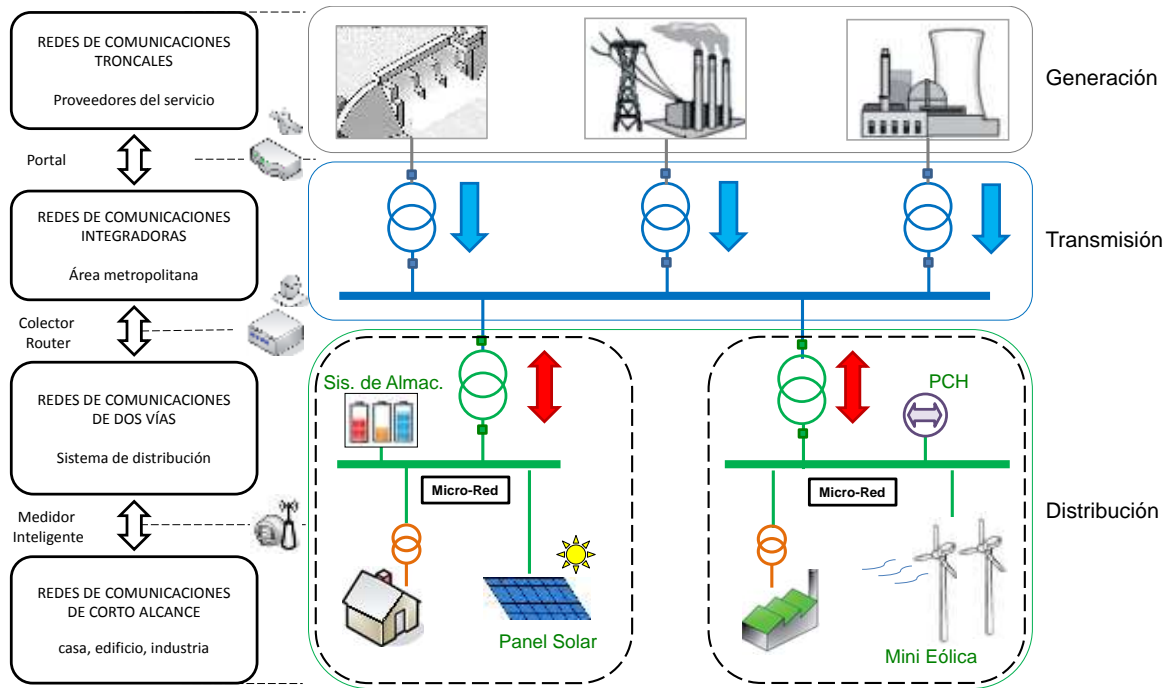
### 2.4.1. Definición

La definición de redes inteligentes no es un concepto universal sino que varía levemente en la definición ofrecida por las entidades a cargo de la regulación de redes eléctricas. Es así como, la plataforma tecnológica Europea define las redes inteligentes como: “*redes eléctricas capaces de integrar de manera inteligente las acciones de todos los actores conectados a ella (generadores, consumidores) con la finalidad de distribuir eficientemente un suministro eléctrico que sea sustentable, económicamente competitivo y seguro*”.

Sin embargo, un concepto más general hace referencia a una red de energía avanzada que permite impulsar la participación activa de consumidores, promoviendo una red adecuada a la era digital, que optimice los recursos reduciendo las pérdidas de

potencia y que sea más estable frente a ataques y desestabilizaciones[19]. En la Figura 4. se puede apreciar gráficamente el concepto de redes inteligentes.

**Figura 4–** Esquema de una red inteligente



Se puede entonces, considerar las redes inteligentes como un sistema interconectado de redes eléctricas y de comunicación, en las cuales se implementa tecnología digital con la que se busca tanto descentralizar la generación y despacho de la energía como la automatización, sistematización y monitoreo en tiempo real de dichas redes, facilitando así no sólo el flujo de energía, sino también de información de manera bidireccional entre los usuarios y las empresas generadoras[20].

Estas nuevas tecnologías con las que se incluyen de manera eficiente a todos los entes relacionados en el proceso de generación, transmisión, distribución y consumo de la energía están orientadas a desarrollar una red eléctrica con un alto índice de confiabilidad, eficiencia, seguridad y autonomía. Todo esto finalmente se verá reflejado de manera positiva al evaluar tanto una mejora en la calidad del servicio, como una notable disminución en los costos de mantenimiento y operación de la red, además de menores niveles de pérdida de potencia en los sistemas de transmisión.

## **2.4.2. Implicaciones de una red inteligente**

Las redes inteligentes dan paso a la implementación de fuentes de energía renovables como la eólica y la fotovoltaica, que en conjunto con sistemas de almacenamiento de energía, conllevan a una reducción en los niveles de gases contaminantes emanados como resultado del proceso de generación, principalmente en las centrales térmicas. Con esto se evidencia un aporte positivo por parte de las redes inteligentes a la conservación del medio ambiente que se consolida como una de las principales problemáticas de la actualidad.

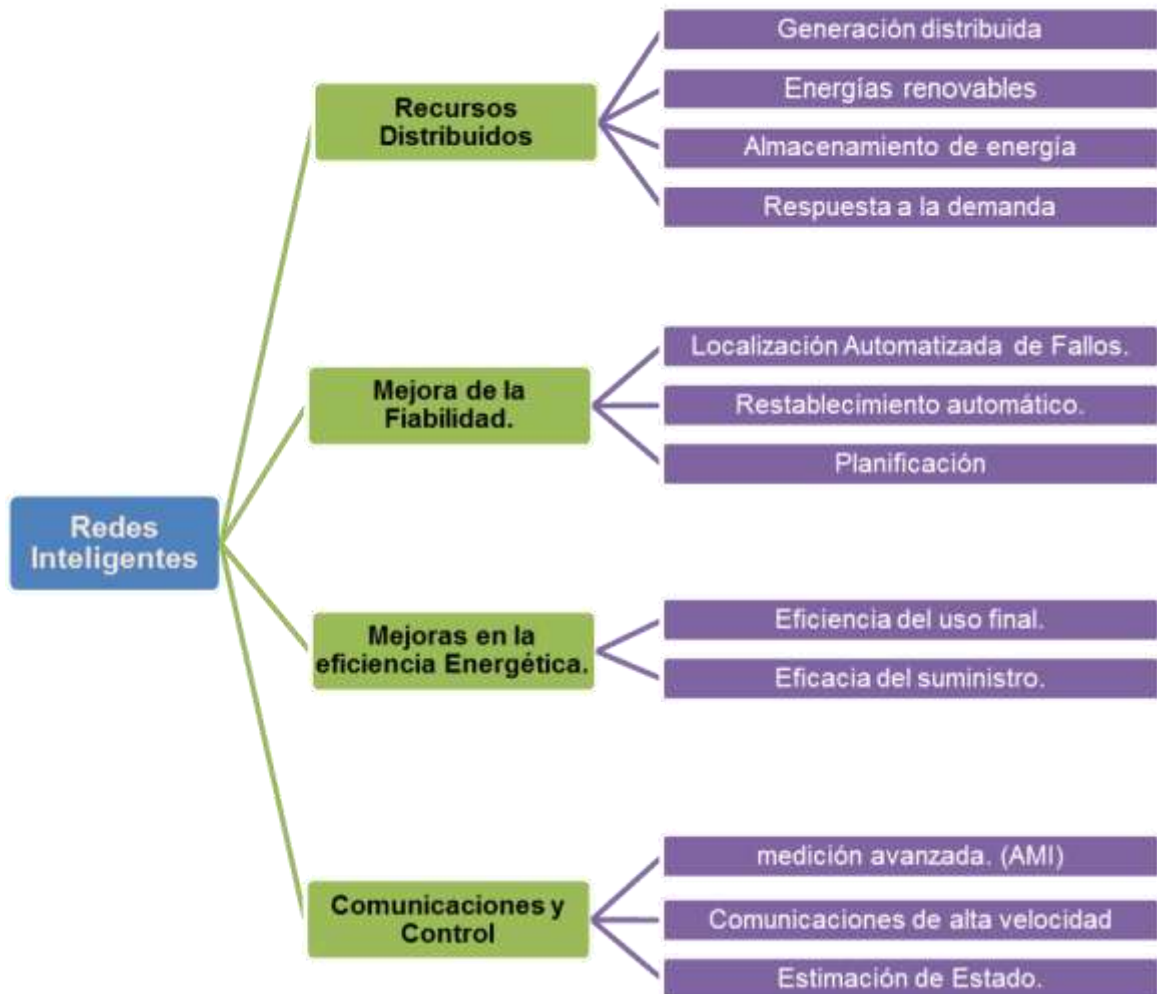
De aquí que una red inteligente es una red evolucionada que gestiona la demanda de electricidad de forma sostenible, fiable y económica, basada en una infraestructura avanzada, y adaptada para facilitar la integración de todos sus componentes, con el fin de satisfacer la demanda variable de electricidad de los usuarios finales. Las redes inteligentes coordinan las necesidades y capacidades de todos los generadores, operadores de red, usuarios finales y actores del mercado eléctrico para utilizar todas las partes del sistema de la manera más eficiente posible, reduciendo al mínimo los costos y el impacto ambiental mientras se aumenta al máximo la fiabilidad, resistencia y estabilidad del sistema [21].

Por otra parte, con el cambio de la infraestructura se alcanzan objetivos medioambientales, se mejora la respuesta de la demanda, se integran porcentajes crecientes de energías no gestionables como las renovables, se soportan las capacidades de almacenamiento, la conexión de vehículos eléctricos y se garantiza la generación distribuida, entre otros.

Las redes inteligentes físicamente no se verán disímiles a las redes eléctricas existentes pues su diferencia se halla en darle una mejor utilización tecnológica a sus componentes. Además las redes inteligentes permite dar soluciones que mejoren la relación del costo, la eficiencia y la eficacia, además de mostrar una reducción de los gases que podrían contaminar el ambiente desde las centrales eléctricas.

Se entiende que las redes inteligentes están diseñadas para resolver los problemas e inconvenientes de las redes existentes, principalmente la falta de comunicación bilateral entre empresas y consumidores, las capacidades limitadas de control, y el uso ineficiente de la electricidad. En la Figura 5 se muestra un resumen de las principales implicaciones positivas que una red inteligente ideal puede ofrecer.

**Figura 5**– Árbol de Implicaciones de una red inteligente ideal.



La tecnología de red inteligente no solo nos ofrece cumplir con todos estos desafíos sino que también desarrolla un suministro de energía más limpia que es más eficiente, más económica y más sostenible[21].

### 2.4.3. Características de las redes inteligentes.

#### a) *Inteligencia:*

Las nuevas tecnologías y el conocimiento del experto deben ser incorporados e integrados en la red inteligente. El autoconocimiento del estado de funcionamiento del sistema debe estar disponible con la ayuda de análisis en tiempo real, para así tener la

capacidad de ejercer control en la tensión, estabilidad angular y análisis de seguridad [21]. Finalmente, el sistema debe tener la capacidad de auto-recuperarse cuando sea necesario, con lo cual se logra mejorar la seguridad de la red de energía a través de la protección coordinada y sus esquemas de control.

### **b) Flexibilidad:**

La flexibilidad para el futuro de las redes inteligentes se podrá apreciar en cuatro aspectos principalmente:

- La capacidad de expansión para el desarrollo futuro con la penetración de las tecnologías innovadoras y diversas formas de generación.
- La capacidad de adaptación a diferentes lugares geográficos y condiciones climáticas.
- Variedad en estrategias de control para la coordinación de la descentralización de la generación de energía.
- Una perfecta compatibilidad con varios estilos de funcionamiento del mercado y la capacidad *plug-and-play* para dar cabida a mejoras tecnológicas progresivas con los componentes de hardware y software.

### **c) Eficiencia Energética:**

La manera ideal de mitigar cualquier efecto adverso a causa de los procesos de generación, transmisión, distribución e incluso consumo de la energía, como altos costos, procesos contaminantes, entre otros, es minimizando la producción de la electricidad. Pero a pesar de esto, las necesidades actuales, no permiten una limitación en la cantidad de energía demandada, por el contrario se espera que progresivamente la demanda vaya en aumento[21].

Es entonces como las redes inteligentes, no limitan la generación de la electricidad. Sin embargo, se enfocan en optimizar, aprovechar y elevar el rendimiento de aquella electricidad ya generada, minimizando pérdidas y garantizando el uso casi total de la misma, llevando así finalmente a una reducción en la potencia generada. En otras palabras las Redes Inteligentes son sistemas eficaces que por medio de nuevas tecnologías y dispositivos de control reducen las pérdidas energéticas.

Por otra parte, las redes inteligentes aportan al progreso de la eficiencia energética proponiendo mejoras en la adquisición de datos y monitoreo de la misma, pues las



tecnologías de comunicaciones hoy por hoy están siendo notablemente utilizadas en todos los niveles de la red de energía eléctrica, principalmente para procesos de planificación y optimización de los recursos, el control local rápido de los equipos, y el procesamiento de los datos de campo. Sin embargo, la coordinación a través de la red se produce en una escala de tiempo más lenta. En algunos casos se ejecutan bajo el control de computadores, pero gran parte de ella todavía se basa en las llamadas telefónicas entre los gestores de las redes de los centros de control de servicios públicos, incluso en situaciones de emergencia.

#### **d) Seguridad:**

La red de transporte inteligente será capaz de suministrar electricidad a los clientes de forma segura y fiable, en el caso de las perturbaciones o riesgos externos o internos.

Una rápida capacidad de auto recuperación permitirá que el sistema se reconfigure dinámicamente para recuperarse de los ataques, desastres naturales, apagones o fallos en los componentes de red. El cálculo y análisis en tiempo real permitirá a la operación y los procesos de control intervenir de forma rápida y flexible en el caso de una posible eventualidad o emergencia.

#### **e) Sostenibilidad:**

La sostenibilidad de la red de transporte inteligente se presenta como la suficiencia, la eficiencia y la contribución al cuidado del medio ambiente. El crecimiento de la demanda de electricidad debe ser satisfecho con la implementación de recursos energéticos alternativos asequibles, aumento de la energía, ahorros a través de nuevas tecnologías en el suministro de la electricidad y el funcionamiento del sistema, y la mitigación de la congestión de la red.

Las tecnologías innovadoras para ser empleadas deben tener menores niveles de emisión de gases contaminantes, de manera que se puedan mitigar los efectos adversos considerando la preservación del medio ambiente y evitando los fenómenos climáticos derivados[21].

## **2.5. Síntesis**

Las redes eléctricas actuales son ineficientes, complejas de gestionar y provocan grandes pérdidas económicas cuando sufren averías o cualquier tipo de problemas. Es indispensable un cambio de dirección para afrontar y dar respuesta a estos fallos, además de las necesidades técnicas y socioculturales el nuevo rumbo debe ser un apoyo para la búsqueda de un sistema eléctrico confiable y con altos estándares de calidad.

La evolución de las redes eléctricas hacia las redes inteligentes supone un flujo bidireccional de energía e información desde la generación de la energía eléctrica hasta su consumo final (con la participación activa de los usuarios). Además, este paso no puede darse sin una visión y una estrategia compartida por todos los entes participantes de los sectores energéticos.





# CAPÍTULO 3

## Minimización de pérdidas de energía

---

*En este capítulo se realiza una introducción a las temáticas y definiciones del tema de pérdidas de energía. Así mismo se presentan los equipos y tecnologías necesarios para minimizar las pérdidas de potencia debido al impacto generado por la dinámica de una red inteligente enmarcada en el concepto de las micro-redes.*



## **3.Minimización de pérdidas de energía**

Con el desarrollo de la automatización en los sistemas de distribución (redes inteligentes enmarcadas en el concepto de las micro-redes) tanto la generación distribuida, los sistemas de almacenamiento y las cargas de los alimentadores pueden ser monitoreadas continuamente. Además, los bancos capacitivos pueden ser conectados o desconectados con interruptores controlados remotamente. Por otra parte, con la disponibilidad de la información en tiempo real de los sistemas de distribución, es deseable para los operadores de red contar con una estrategia de despacho flexible de la generación distribuida, del sistema de almacenamiento y de los bancos capacitivos que permita minimizar las pérdidas de energía eléctrica en la operación diaria del sistema.

### **3.1. Aspectos teóricos**

La compensación de la potencia reactiva es fundamental para cualquier sistema de distribución debido a que la inyección de reactivos ayuda a controlar los niveles de tensión de la red. De ésta manera se consigue que la tensión sea más estable según los picos de demanda, logrando con esto ofrecer un mejor servicio a los usuarios con adecuados estándares de calidad y menores pérdidas en el sistema de potencia[22].

Unos niveles estables de tensión hacen que el factor de potencia sea más inalterable y mayor (aproximadamente la unidad), esto se logra con una adecuada inyección de reactivos a la red de distribución[23]. Centrando el estudio principalmente en la utilización de la generación distribuida en micro-redes inteligentes se tiene la habilidad y posibilidad de desconectarse del sistema de potencia principal o disminuir los flujos de energía provenientes de él, lo cual disminuye los flujos de potencia reactiva, mejora los perfiles de tensión, reduce la cargabilidad del alimentador y minimiza las pérdidas de energía.

#### **3.1.1.Naturaleza de la potencia reactiva**

La potencia reactiva es medida en voltamperios reactivos (VAR) y se puede presentar en los sistemas eléctricos de dos formas:

- La requerida por los circuitos inductivos, como son los motores, los transformadores, las lámparas de descarga, etc.
- La requerida por los circuitos capacitivos, como es la capacidad de los cables, de los condensadores, etc.

Estas cargas inductivas cíclicamente absorben energía del sistema (durante la creación de los campos magnéticos que necesitan para su funcionamiento) y entregan dicha energía al sistema (durante la destrucción de los campos magnéticos), dos veces en cada ciclo.

Este cambio de energía entre las cargas y el sistema, provoca el incremento de la corriente que debe entregar el Sistema de Potencia, causando mayores pérdidas en los conductores y mayores caídas de tensión.

Cuando la onda de corriente se retrasa respecto a la onda de tensión, se dice que el sistema consume energía reactiva. Esta cantidad de energía reactiva depende del desplazamiento de fase entre la tensión y la corriente. Caso contrario ocurre cuando la onda de tensión es la que se retrasa con respecto a la onda de la corriente, y en este caso se considera que el sistema está generando la energía reactiva.

### **3.1.2. Producción y absorción de potencia reactiva**

#### ***a) Máquina síncrona***

Los generadores síncronos pueden generar o absorber potencia reactiva dependiendo de la excitación. Cuando son sobrecitados ellos suplen potencia reactiva y cuando son subexcitados ellos absorben potencia reactiva. La capacidad de continuamente suplir o absorber potencia reactiva, depende de la corriente de campo, la corriente de armadura, y la región de terminal de recalentamiento. Los generadores síncronos están normalmente dotados con un equipo con reguladores automáticos de tensión los cuales continuamente ajustan la excitación así como el control de la tensión de armadura.

#### ***b) Líneas de transmisión***

Las líneas de transmisión aéreas, dependiendo de la corriente de carga, pueden



absorber o entregar potencia reactiva. A cargas por debajo de la carga nominal, las líneas producen una potencia reactiva neta y a cargas por encima de la carga nominal, las líneas absorben potencia reactiva. Por ejemplo cuando las líneas tienen largas distancias y la carga es pequeña, estas se comportan como capacitores y puede hacer que la tensión de nodo y de los nodos cercanos caiga drásticamente.

### **c) Transformadores**

Los transformadores, siempre absorben potencia reactiva independientemente de su carga. Sin carga, la reactancia magnetizante afecta predominantemente y cuando estos están a plena carga la inductancia de acoplamiento serie afecta al sistema plenamente.

### **3.1.3. Ventajas de la compensación de la energía reactiva**

- Reducción en la tarifa de energía. Las compañías eléctricas penalizan el consumo de energía reactiva con el objeto de incentivar la corrección del factor de potencia.
- Reducción de las pérdidas por efecto Joule. La compensación de la energía reactiva permite la reducción de las pérdidas Joule en los conductores y transformadores. Además estas pérdidas son contabilizadas como energía activa consumida (kWh) por lo que se traduce también en una reducción en los costos.
- Reducción de las caídas de tensión: La reducción de la corriente provocada por la compensación de la energía reactiva, reduce la caída de tensión en el cable de alimentación.

## **3.2. Regulación de tensión**

El problema de mantener las tensiones dentro de los límites requeridos es complicado por el hecho de que el sistema entrega potencia a un gran número de cargas y son alimentadas desde varias unidades de generación. Como el consumo de la carga varía, los requerimientos de potencia reactiva varían también. Debido a que la potencia reactiva no puede ser transmitida por grandes distancias, el control de tensión ha de ser realizado por el uso de dispositivos especiales dispersos a través del sistema [24]. Esto quiere decir que han de instalarse diferentes equipos a lo largo de las líneas para lograr una mejor compensación de la potencia reactiva en las zonas más alejadas de la red.

Los problemas de control de tensión se presentan en las barras de los sistemas de potencia, por esta razón son problemas locales que deben ser resueltos mediante la instalación de dispositivos cerca de los centros de consumo para que la potencia que fluye desde la generación hasta ese centro de consumo sea predominantemente activa y tenga mayor aprovechamiento por las cargas conectadas.

Cuando se utilizan diferentes dispositivos para suplir potencia reactiva en los sistemas de distribución, el principal objetivo que se corrige con esta acción, es el factor de potencia que se presenta en la carga.

El control de los niveles de tensión está ligado al control de la producción, absorción y flujo de la potencia reactiva. Los dispositivos empleados para la regulación de la potencia reactiva en un sistema de distribución se pueden clasificar en los siguientes:

- Sumideros de potencia reactiva.
- Transformadores reguladores.
- Dispositivos FACTS (Sistemas Flexibles de Transmisión de Corriente Alterna).
- Generación distribuida.

### **3.2.1. Sumideros de potencia reactiva**

Los capacitores shunt son los primeros de los sumideros de potencia reactiva. Estos elementos suplen potencia reactiva y aumentan la tensión local, ellos son conectados a través del sistema y son usados en un rango variado de tamaños. La principal ventaja de los capacitores shunt son su bajo costo y su flexibilidad de instalación y operación. Como son fácilmente aplicables a diferentes partes del sistema contribuyen a la eficiencia de la transmisión y la distribución de potencia. Mientras que, la principal desventaja es que su valor de potencia es proporcional al cuadrado de la tensión. Por lo tanto, la potencia reactiva de salida es reducida a tensiones bajas cuando se espera que entreguen un nivel mayor.

Otro sumidero de potencia reactiva son los compensadores estáticos de potencia reactiva (SVC). Estos dispositivos, son generadores o cargas estáticos conectados en forma shunt. Los tipos básicos de elementos de control de potencia reactiva son:

- Reactores Saturados (Saturated Reactors SR)
- Reactor controlado por tiristor (Thyristor controlled reactor TCR)

- Capacitor manejado por tiristor (Thyristor switched capacitor TSC)
- Reactor manejado por tiristor (Thyristor switched reactor TSR)
- Transformador controlado por tiristor (Thyristor controlled transformer TCT)
- Convertidor conmutado por la línea (line commuted converter LCC)

Las combinaciones de diferentes configuraciones de SVC han sido principalmente para compensación de sistemas de transmisión. Estos sistemas son capaces de controlar las tensiones de fase individuales de las barras a las cuales han sido conectados. Ellos pueden ser usados también como control de desviación de las tensiones tanto en secuencia positiva como en negativa. Sin embargo, se interesan por el desempeño de la frecuencia fundamental del sistema de potencia.

### 3.2.2. Transformadores reguladores

Los autotransformadores son utilizados para cambiar los niveles de tensión en una subestación de un subsistema a otro, estos son frecuentemente equipados con cambiadores de toma bajo carga (ULTC Under Load TapChanging) y pueden ser controlados ya sea en forma manual o automática. Los cambiadores de tomas de estos transformadores proveen un medio conveniente de controlar el flujo de potencia reactiva entre los subsistemas. Estos también pueden ser ajustados para controlar los perfiles de tensión y minimizar las pérdidas de potencia activa y reactiva.

Los transformadores con dispositivos de cambiadores de tomas sin carga, pueden ayudar a mantener unos perfiles de tensión adecuados. Los transformadores con ULTC pueden ser usados para tener en cuenta las variaciones del sistema, el ajuste de los transformadores con cambiadores de tomas sin carga deben ser cuidadosamente elegido dependiendo de las variaciones a largo plazo debidas a las expansiones del sistema, al incremento de la carga y a los cambios estacionales. Un análisis óptimo del flujo de carga provee un método conveniente para determinar el ajuste apropiado.

### 3.2.3. Dispositivos FACTS

El más conocido de los dispositivos FACTS implementados en sistemas de distribución es el D-STATCOM (*Distributed – Static Synchronous Compensators*). Este equipo usa la misma tecnología de los SVCs pero empleando componentes electrónicos que le proporcionan más capacidad para la producción y absorción de potencia reactiva,

más velocidad y más efectividad en el control de la tensión. Es la evolución del SVC [24]. El compensador estático para sistemas de distribución es análogo a una máquina síncrona ideal que genera un conjunto de tensiones balanceadas a frecuencia fundamental, con amplitud y ángulo controlable. Ésta máquina ideal no tiene inercia y su respuesta es prácticamente instantánea.

El intercambio de potencia reactiva entre el compensador estático y el sistema de distribución se logra variando la amplitud de la tensión. Por lo tanto, si la amplitud de la tensión del D-STATCOM es superior a la tensión en el punto de interconexión con la red, la potencia reactiva fluirá del D-STATCOM al sistema de potencia, es decir que se comporta como un capacitor. Pero, si la amplitud de la tensión en el punto de la interconexión es mayor a la tensión que se presenta en el D-STATCOM, la potencia reactiva fluirá del sistema de potencia hacia él, comportándose así como un inductor que consume los reactivos de la red.

### **3.2.4. Generación distribuida**

Cuando se menciona el soporte de potencia reactiva por parte de unidades de generación como una alternativa para ayudar a mantener la tensión en los rangos requeridos, también es pertinente hacer referencia a la generación distribuida. La conexión de micro-fuentes al sistema de distribución modifica los niveles de tensión al usuario final e introduce diferentes grados de complejidad en las estrategias de control de la tensión.

De hecho, de acuerdo con el criterio por el cual es utilizada la generación distribuida, las estrategias de control de la tensión podrían cambiar.

Si la conexión de generación distribuida es planeada considerando la condición extrema de carga mínima y generación máxima, y asumiendo operación bajo factor de potencia unidad, la tensión de la conexión de la barra depende de la parte real de la impedancia de la red y la inyección de potencia reactiva (si la probabilidad de esta situación de ocurrencia es baja, esto podría ser beneficioso para adaptarse a grandes generadores con la condición de que la generación distribuida esté reducida cuando la tensión se eleva en la barra de conexión por encima de los límites permitidos).

Si la planeación de la generación distribuida también depende del flujo de potencia reactiva (asumiendo operación con factores de potencia menores que uno), el valor de la relación  $X/R$  influencia grandemente a la tensión en la barra de conexión. Por otra parte, si los cambios de carga regulan la tensión en la barra de conexión, el método de control de tensión debe tomar en cuenta la estrategia de control de la generación distribuida a la barra de conexión. Generalmente, estas tres situaciones de regulación de tensión pueden ocurrir de forma simultánea, incrementando así la complejidad de la estrategia de control adoptada.

### 3.3. Pérdidas de energía

Al igual que los flujos de potencia activa, los flujos de potencia reactiva contribuyen a las pérdidas de energía en las líneas, provocan la caída de tensión y pueden dar lugar a inestabilidad de la red. Por lo tanto, es preferible minimizar los flujos de potencia reactiva tan cerca como sea posible a los usuarios que la necesiten, teniendo en cuenta que las interfaces electrónicas de los micro-generadores se pueden utilizar para esta tarea. De hecho, los inversores de estas unidades son generalmente de gran tamaño, ya que la mayoría de las fuentes de energía distribuidas son intermitentes en el tiempo, y la interfaz electrónica ha sido diseñada de acuerdo a la producción de potencia máxima. Cuando no están trabajando a la potencia nominal, los inversores pueden ser programados para inyectar una cantidad deseada de potencia reactiva sin costo adicional.

Esta idea ha sido investigada recientemente en la literatura sobre los sistemas de potencia. Sin embargo, estas investigaciones consideran un escenario centralizado en el que se conocen los parámetros de toda la red de energía eléctrica, el controlador puede acceder a todo el estado del sistema, los micro-generadores están en pequeño número, y reciben comandos de potencia reactiva a partir de una unidad central de procesamiento.

### 3.4. Metodología implementada

Para solucionar el problema de la compensación de energía reactiva para la minimización de las pérdidas de distribución de energía en una micro-red inteligente, se ha propuesto la siguiente metodología de trabajo:

- Paso 1: Implementar el modelo eléctrico de la micro-red inteligente.

- Paso 2: Correr flujos de carga y determinar las variables de estado.
- Paso 3: Calcular las pérdidas de potencia y energía.
- Paso 4: Determinar la inyección probable de potencia activa/reactiva.

Los objetivos de esta perspectiva de aplicación incluyen la determinación de las metodologías de concepción, diseño e implementación práctica de Micro-redes de baja potencia (menor de 5MW) con generación distribuida renovable y cargas de perfil arbitrario y el desarrollo de los algoritmos de control y mantenimiento de la Micro-red para su aplicación en entornos residenciales, comerciales e industriales.

Las fuentes de energía renovable se integrarán de forma óptima en la red, acercando la generación al consumo a través de la instalación de paneles fotovoltaicos, el uso de pequeñas centrales hidroeléctricas y la instalación de pequeños generadores eólicos. Además, en la micro-red inteligente están instalados sistemas de almacenamiento energético en baterías.

### **3.4.1. Modelado de los elementos de la micro-red inteligente**

Para el estudio del control de pérdidas de energía es importante conocer las características y comportamientos de los elementos eléctricos que conforman una micro-red inteligente. Entre los elementos a tratarse encuentran: la subestación (S/E), las líneas, las cargas, los bancos de condensadores y los generadores distribuidos.

La caracterización y los modelos que a continuación se presentan se realizan a frecuencia fundamental. Por lo tanto, solo se podrán utilizar para resolver los flujos de carga de las micro-redes inteligentes a frecuencia fundamental.

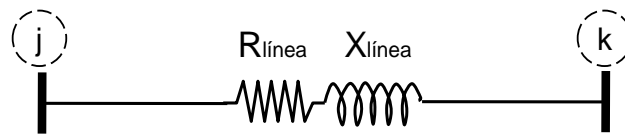
#### **a) Modelo de la subestación (S/E)**

Este elemento corresponde a la fuente del sistema de distribución principal. La barra de la subestación se considera como una barra infinita, es decir, posee una tensión de 1 p.u. Mientras corre el flujo de carga la subestación puede entregar o consumir cualquier valor de potencia activa y reactiva para cumplir con el balance de potencias.

**b) Modelo de las líneas**

Normalmente y debido a la longitud de las líneas de una micro-red inteligente, éstas son modeladas para frecuencia fundamental por una impedancia serie, dado que los efectos capacitivos son poco significativos. Por lo tanto, se utilizará el modelo de líneas cortas (ver Figura 6).

**Figura 6** – Modelo de línea corta



La impedancia del modelo de línea corta a la frecuencia fundamental esta dadas por:

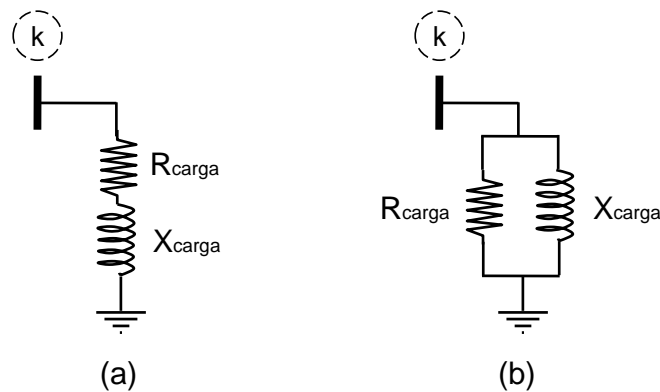
$$Z_{línea} = R_{línea} + j\omega L_{línea} \tag{1}$$

Donde  $R_{línea}$  y  $L_{línea}$  son la resistencia (“ohms”  $\Omega$ ) y la inductancia (“henrios” H) del modelo de la línea.

**c) Modelo de las cargas**

Las cargas en los sistemas de distribución se especifican como la potencia compleja consumida en un nodo particular. En la Figura 7 se muestran los dos modelos de carga lineal más usados, el modelo serie y el modelo paralelo.

**Figura 7** – Modelo serie y paralelo de las cargas.



El modelo serie se describe a partir de la impedancia, así:

$$Z_{carga} = R_{carga} + jX_{carga} = P \left( \frac{V}{S} \right)^2 + jQ \left( \frac{V}{S} \right)^2 \quad (2)$$

Donde V es la tensión medida en el nodo y P, Q y S son las potencias activa, reactiva y aparente consumida en el nodo. Mientras que el modelo paralelo se describe a partir de la admitancia, como:

$$Y_{carga} = \frac{1}{R_{carga}} - j \frac{1}{X_{carga}} = \frac{P}{V^2} - j \frac{Q}{V^2} \quad (3)$$

#### **d) Modelo de los bancos de condensadores**

Los bancos de condensadores se emplean comúnmente para la compensación de potencia reactiva y para dar soporte a la regulación de voltaje en una red de distribución. Los bancos de condensadores se modelan como dispositivos de capacitancia constante, así:

$$Z_{capacitor} = -j \frac{1}{\omega C} = -j \frac{V^2}{Q_{capacitor}} \quad (4)$$

#### **e) Modelo de los generadores distribuidos**

Un generador distribuido se puede representar como una fuente de tensión ideal. Dicha fuente se comporta como un generador que únicamente inyecta la potencia activa o reactiva que se le impone en la referencia.

- Pequeña central hidroeléctrica: inyecta potencia activa y reactiva.
- Mini-generador eólico: inyecta potencia activa y consume potencia reactiva.
- Panel solar: inyecta solamente potencia activa
- Sistema de almacenamiento: inyecta y consume solamente potencia activa.

Estas micro-fuentes de generación se conectan a las micro-redes inteligentes a través de interfaces electrónicas (inversores), cuya tarea principal es la de permitir la inyección de la energía producida. Sin embargo, estos dispositivos también pueden



realizar otras tareas diferentes, conocidos como servicios auxiliares, tales como, la compensación de potencia reactiva, la mejora del perfil de tensión, entre otros.

### 3.4.2. Flujo de carga

Los métodos convencionales Newton-Raphson y Gauss-Seidel pueden llegar a ser ineficientes en el análisis de las micro-redes inteligentes, debido a las características especiales de las redes de distribución (estructura radial, alta relación R/X y cargas no balanceadas, etc.). En consecuencia, una vez planteados los modelos de los elementos de la micro-red inteligente, es necesario el cálculo eficiente y rápido de las variables de estado del sistema. Para ello se requiere un algoritmo adecuado para el cálculo del flujo de carga[25]. Para resolver un flujo de carga a frecuencia fundamental, se utiliza el algoritmo iterativo denominado Gauss-Seidel topológicamente orientado. Esto debido a que este algoritmo aprovecha la característica radial de los sistemas de distribución. El proceso iterativo es descrito a continuación:

- Recorrer el alimentador hacia la carga, calculando tensiones, potencias y corrientes (en caso de ser dependiente de la tensión) para cada nodo.
- Recorrer el alimentador hacia la subestación, calculando los flujos de potencia, corriente y pérdidas para las ramas.
- Revisar la ocurrencia de convergencia, esto es, revisar si el mayor error entre dos valores consecutivos de la tensión de nodo es menor que el margen de error predeterminado o establecido con anterioridad, caso en el cual se para el proceso y se considera resuelto el problema. Por el contrario, si esta condición no se cumple, se requiere realizar nuevamente los pasos anteriores hasta que se cumpla (proceso iterativo).

### 3.4.3. Cálculo de las pérdidas de potencia y energía

Para frecuencia fundamental, se consideran las pérdidas de potencia activa causadas por el transporte de corriente en las líneas (efecto Joule). La expresión para su cálculo es por tanto:

$$P_p = \sum_{línea=1}^N I_{línea}^2 R_{línea} \quad (5)$$

Donde  $I_{línea}$  y  $R_{línea}$  corresponden a la corriente y la resistencia del tramo de la línea.

### 3.4.4. Inyección probable de potencia activa/reactiva

#### a) Paso 1: Determinar la sensibilidad de tensión

En particular, se propone una estrategia de control de tensión en la que la regulación se hace, en primer lugar modificando los flujos de la potencia reactiva (en orden para maximizar la generación de potencia activa) y actuando sobre la potencia activa si el control en la potencia reactiva no es suficiente. Esta estrategia de control de tensión es formalizada mediante el uso de un método basado en la sensibilidad de las tensiones de distribución a las inyecciones de potencia reactiva. En particular, se lleva a cabo una evaluación fuera de línea de la cantidad de potencia activa/reactiva adecuada para inyectar o absorber[26].

#### b) Paso 2: Obtener la ubicación probable de la inyección de potencia activa/reactiva

Con el fin de restringir el espacio de la solución a algunos nodos sensibles a la tensión se identifican primero al inyectar potencia activa/reactiva con 25% de la capacidad total de carga activa/reactiva del alimentador en cada nodo, uno a uno. Posteriormente, se calcula el índice de sensibilidad de tensión “VSI” según [27]. Finalmente, el nodo con menos VSI será escogido como el mejor lugar para inyectar la potencia activa/reactiva en la micro-red inteligente.

Por lo tanto, cuando se inyecta potencia activa/reactiva en el nodo  $i$ , VSI para el nodo  $i$  se define como:

$$VSI_i = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (1-V_k)^2}{n}} \quad (6)$$

Donde  $V_k$  es la tensión en el nodo  $k$ -ésimo y  $n$  es el número de nodos.

#### c) Paso 3: Calcular el tamaño probable de la inyección de potencia activa/reactiva

Para determinar el tamaño probable de la inyección de potencia reactiva, se toman las siguientes medidas:

- La inyección de potencia activa/reactiva se ubica en el nodo con menos VSI.

- El tamaño de la inyección de potencia activa/reactivase varía en pasos constantes hasta encontrar el mínimo de pérdidas del sistema.
- El tamaño de la inyección de potencia activa/reactiva que da lugar a pérdidas mínimas se toma como probable.
- La inyección de potencia activa es suplida por generadores distribuidos.
- La inyección de potencia reactiva es suplida por generadores síncronos, bancos capacitivos, dispositivos SVC o D-STATCOM.

### 3.5. Síntesis

Una óptima distribución (tamaño y localización) de la inyección de potencia activa/reactiva en la micro-red inteligente es un factor crucial en la planificación y operación de las redes de distribución del futuro. Esta óptima distribución mejora el perfil de tensión y reduce al mínimo las pérdidas de potencia y energía en la micro-red inteligente. De igual forma, con la introducción de la generación distribuida en el sistema, el perfil de tensión se puede mejorar porque este tipo de micro-fuentes de generación pueden inyectar una porción de la potencia real y reactiva a la carga a nivel local, lo que ayuda a minimizar los flujos de la corriente a lo largo de una sección de la línea de distribución. Este hecho, da como resultado un aumento en la magnitud de la tensión en el nodo del usuario. Sin embargo, es posible tener un aumento en las pérdidas de energía con niveles muy altos de penetración de micro-fuentes de generación en los sistemas de distribución con tecnología inteligente.



# CAPÍTULO 4

## Ejemplificación de micro-redes inteligentes

—

*En este capítulo se muestran algunos ejemplos que permiten observar los efectos de la generación distribuida en los sistemas de distribución. Además se ve la posibilidad de analizar los efectos de la compensación de potencia reactiva utilizando compensadores capacitivos en una micro – red que incluye micro – generadores.*



## 4. EJEMPLIFICACIÓN DE MICRO-REDES INTELIGENTES

EN LA ÚLTIMA DÉCADA, una serie de avances tecnológicos, junto con varias razones económicas y ambientales, han impulsado la introducción de micro-generación distribuida (paneles solares, micro-turbinas mini-generadores eólicos, etc.) en las redes de distribución de energía eléctrica. Este hecho, motivó el diseño y la creación de micro-redes inteligentes, razón por la cual, en este capítulo se busca ejemplificar el concepto de una micro-red inteligente, desde el punto de vista de una perspectiva de aplicación práctica. En dicho ejemplo, una parte de la red de distribución de energía de media tensión se integra mediante tecnologías de la comunicación y se gestiona de forma autónoma desde un centro de supervisión y control.

### 4.1. Suposiciones y restricciones

Los siguientes son los supuestos y restricciones utilizados en todos los ejemplos aplicativos de este trabajo:

- Los umbrales inferior y superior de tensión se fijan en 0.95 p.u. y 1.05p.u. respectivamente.
- La barra Slack siempre está ubicada en el nodo #1.
- La tensión base y la potencia base son 13.2 kV y 100 MVA, respectivamente.

### 4.2. Sistemas de prueba

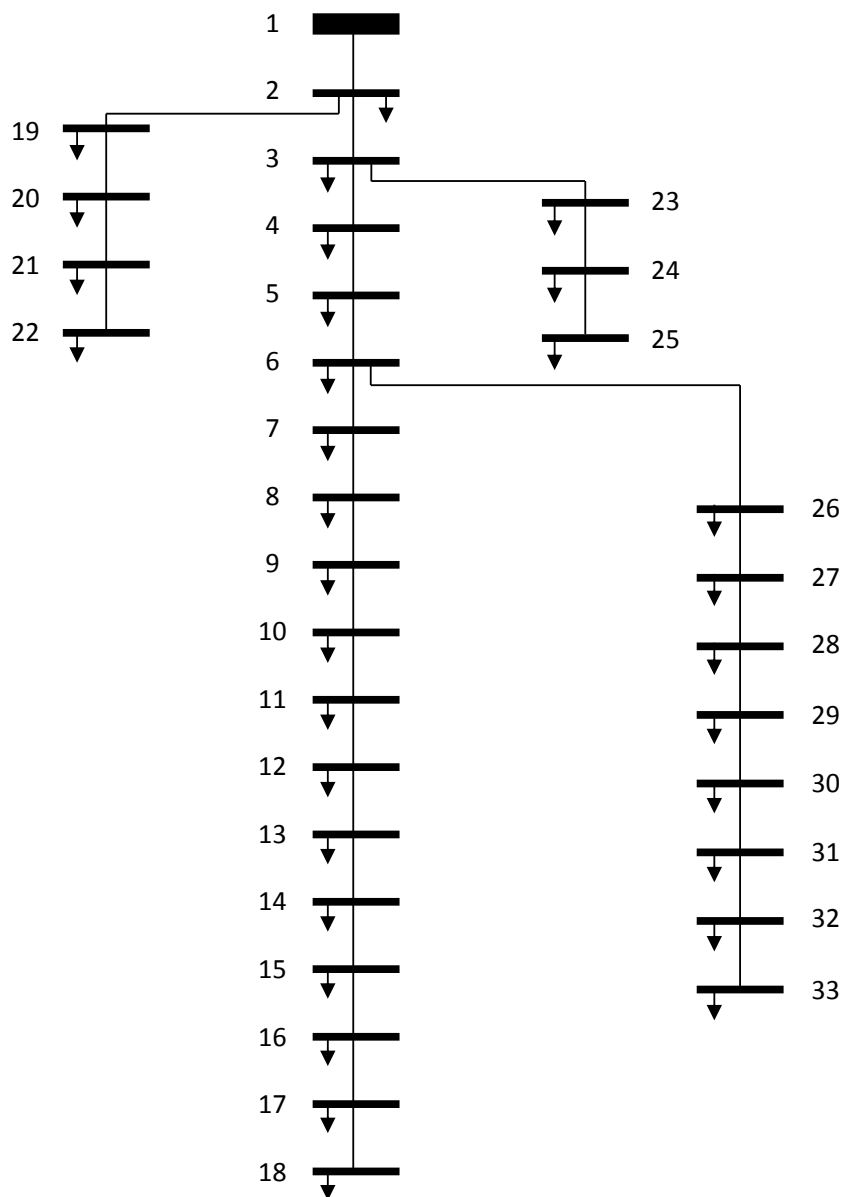
La metodología propuesta se ha probado en dos sistemas de distribución radial, de la base de datos de la IEEE *“Radial distribution testfeeders N-bus IEEE”*, con diferentes tamaños y complejidades. Las simulaciones se han realizado utilizando como software de programación la plataforma MATLAB.

### 4.2.1. Sistema de prueba de 33-nodos

#### a) Diagrama unifilar y datos del sistema

El primer caso es un sistema de distribución radial de 33-nodos con una carga total de 3,7 MW y 2,3 MVar[28].

**Figura 8** – Diagrama unifilar del sistema de 33 nodos





El diagrama unifilar y los datos del sistema estándar de la IEEE de 33 nodos se muestran en la

Figura 8 y en la Tabla 1, respectivamente.

**Tabla 1:** Datos del sistema de 33 nodos

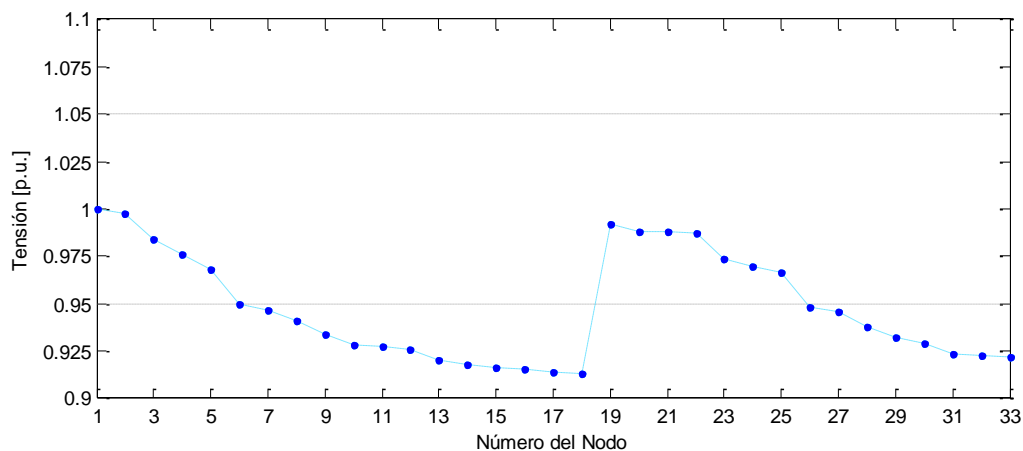
Línea	Nodo i	Nodo j	Datos de la línea		Datos de la carga en el Nodo j	
			R (ohm)	X (ohm)	P (kW)	Q (kVAr)
1	1	2	0,0922	0,0470	100	60
2	2	3	0,4930	0,2512	90	40
3	3	4	0,3661	0,1864	120	80
4	4	5	0,3811	0,1941	60	30
5	5	6	0,8190	0,7070	60	20
6	6	7	0,1872	0,6188	200	100
7	7	8	0,7115	0,2351	200	100
8	8	9	1,0299	0,7400	60	20
9	9	10	1,0440	0,7400	60	20
10	10	11	0,1967	0,0651	45	30
11	11	12	0,3744	0,1298	60	35
12	12	13	1,4680	1,1549	60	35
13	13	14	0,5416	0,7129	120	80
14	14	15	0,5909	0,5260	60	10
15	15	16	0,7462	0,5449	60	20
16	16	17	1,2889	1,7210	60	20
17	17	18	0,7320	0,5739	90	40
18	2	19	0,1640	0,1565	90	40
19	19	20	1,5042	1,3555	90	40
20	20	21	0,4095	0,4784	90	40
21	21	22	0,7089	0,9373	90	40
22	3	23	0,4512	0,3084	90	50
23	23	24	0,8980	0,7091	420	200
24	24	25	0,8959	0,7071	420	200
25	6	26	0,2031	0,1034	60	25
26	26	27	0,2842	0,1447	60	25
27	27	28	1,0589	0,9338	60	20
28	28	29	0,8043	0,7006	120	70
29	29	30	0,5074	0,2585	200	100
30	30	31	0,9745	0,9629	150	70
31	31	32	0,3105	0,3619	210	100

32	32	33	0,3411	0,5302	60	40
----	----	----	--------	--------	----	----

### b) Resultados simulados

En la Figura 9 se muestra el perfil de tensión del sistema de distribución IEEE de 33 nodos. Aquí, se puede observar que del nodo 6 al 18 y del nodo 26 al 33 la tensión está por debajo del límite mínimo permitido.

**Figura 9** – Perfil de tensión del sistema de 33 nodos



En la Tabla 2 se describen los resultados de las tensiones máxima y mínima registradas en el alimentador, así como también, el valor de las pérdidas de potencia.

**Tabla 2:** Resumen de los resultados del sistema de de 33 nodos

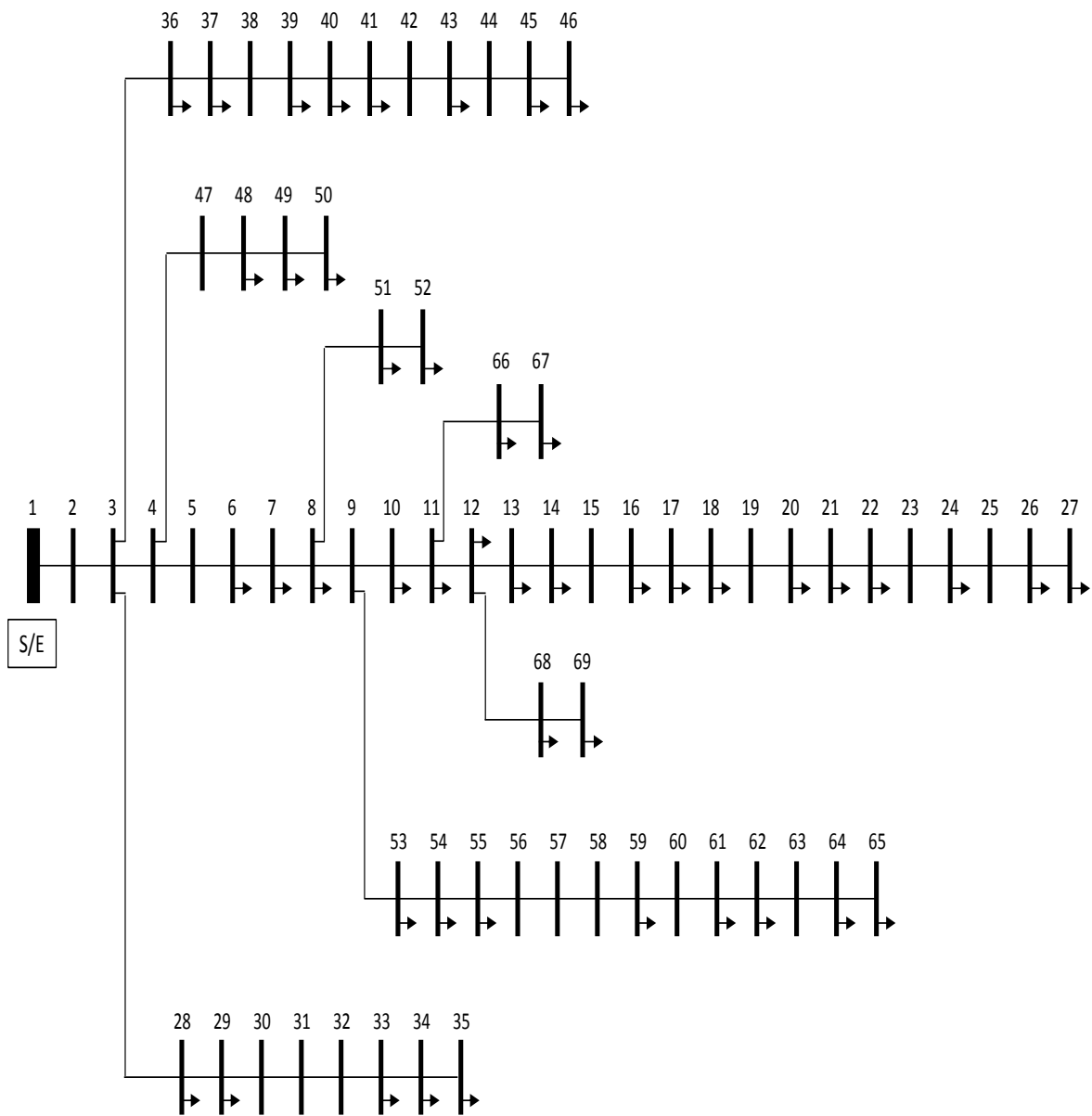
Tensión Máxima		Tensión Mínima		Pérdidas de potencia [kW]
Nodo	Valor [p.u.]	Nodo	Valor [p.u.]	
1	1	18	0.9135	225.82

### 4.2.2. Sistema de prueba de 69-nodos

#### c) Diagrama unifilar y datos del sistema

El segundo caso es un sistema de distribución radial de 69-nodos con una carga total de 3,8 MW y 2,69 MVAR[29].

**Figura 10** – Diagrama unifilar del sistema de 69 nodos



El diagrama unifilar y los datos del sistema de distribución IEEE de 69 nodos se muestran en la Figura 10 y en la Tabla 3, respectivamente.

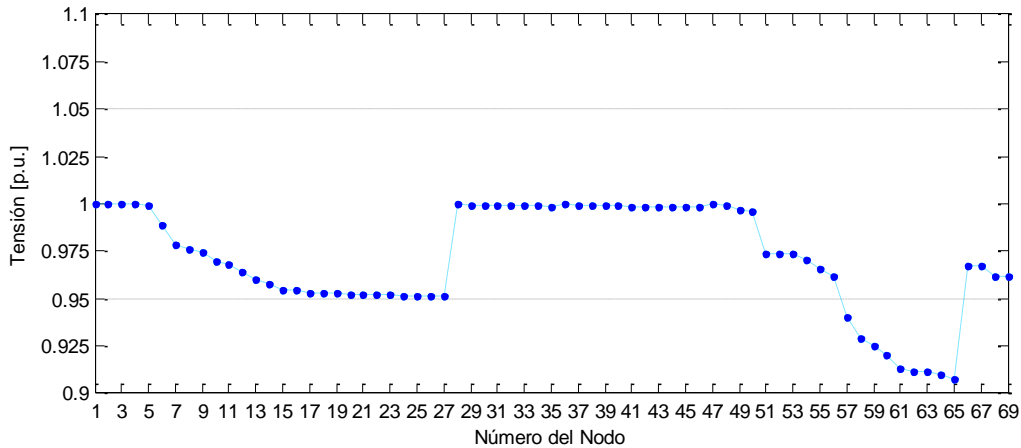
**Tabla 3:** Datos del sistema de 69 nodos

Línea	Nodo i	Nodo j	Datos de la línea		Datos de la carga en el Nodo j	
			R (ohm)	X (ohm)	P (kW)	Q (kVAr)
1	1	2	0,0005	0,0012	0,00	0,00
2	2	3	0,0005	0,0012	0,00	0,00
3	3	4	0,0015	0,0036	0,00	0,00
4	4	5	0,0251	0,0294	0,00	0,00
5	5	6	0,3660	0,1864	2,60	2,20
6	6	7	0,3811	0,1941	40,40	30,00
7	7	8	0,0922	0,0470	75,00	54,00
8	8	9	0,0493	0,0251	30,00	22,00
9	9	10	0,8190	0,2707	28,00	19,00
10	10	11	0,1872	0,0619	145,00	104,00
11	11	12	0,7114	0,2351	145,00	104,00
12	12	13	1,0300	0,3400	8,00	5,00
13	13	14	1,0440	0,3450	8,00	5,50
14	14	15	1,0580	0,3496	0,00	0,00
15	15	16	0,1966	0,0650	45,50	30,00
16	16	17	0,3744	0,1238	60,00	35,00
17	17	18	0,0047	0,0016	60,00	35,00
18	18	19	0,3276	0,1083	0,00	0,00
19	19	20	0,2106	0,0690	1,00	0,60
20	20	21	0,3416	0,1129	114,00	81,00
21	21	22	0,0140	0,0046	5,00	3,50
22	22	23	0,1591	0,0526	0,00	0,00
23	23	24	0,3463	0,1145	28,00	20,00
24	24	25	0,7488	0,2475	0,00	0,00
25	25	26	0,3089	0,1021	14,00	10,00
26	26	27	0,1732	0,0572	14,00	10,00
27	3	28	0,0044	0,0108	26,00	18,60
28	28	29	0,0640	0,1565	26,00	18,60
29	29	30	0,3978	0,1315	0,00	0,00
30	30	31	0,0702	0,0232	0,00	0,00
31	31	32	0,3510	0,1160	0,00	0,00
32	32	33	0,8390	0,2816	14,00	10,00
33	33	34	1,7080	0,5646	9,50	14,00
34	34	35	1,4740	0,4873	6,00	4,00
35	3	36	0,0044	0,0108	26,00	18,55
36	36	37	0,0640	0,1565	26,00	18,55
37	37	38	0,1053	0,1230	0,00	0,00
38	38	39	0,0304	0,0355	24,00	17,00
39	39	40	0,0018	0,0021	24,00	17,00
40	40	41	0,7283	0,8509	1,20	1,00
41	41	42	0,3100	0,3623	0,00	0,00
42	42	43	0,0410	0,0478	6,00	4,30
43	43	44	0,0092	0,0116	0,00	0,00
44	44	45	0,1089	0,1373	39,22	26,30
45	45	46	0,0009	0,0012	39,22	26,30
46	4	47	0,0034	0,0084	0,00	0,00
47	47	48	0,0851	0,2083	79,00	56,40
48	48	49	0,2898	0,7091	384,70	274,50
49	49	50	0,0822	0,2011	384,70	274,50
50	8	51	0,0928	0,0473	40,50	28,30
51	51	52	0,3319	0,1114	3,60	2,70
52	9	53	0,1740	0,0886	4,35	3,50
53	53	54	0,2030	0,1034	26,40	19,00
54	54	55	0,2842	0,1447	24,00	17,20
55	55	56	0,2813	0,1433	0,00	0,00
56	56	57	1,5900	0,5337	0,00	0,00
57	57	58	0,7837	0,2630	0,00	0,00
58	58	59	0,3042	0,1006	100,00	72,00
59	59	60	0,3861	0,1172	0,00	0,00
60	60	61	0,5075	0,2585	1244,00	888,00
61	61	62	0,0974	0,0496	32,00	23,00
62	62	63	0,1450	0,0738	0,00	0,00
63	63	64	0,7105	0,3619	227,00	162,00
64	64	65	1,0410	0,5302	59,00	42,00
65	11	66	0,2012	0,0611	18,00	13,00
66	66	67	0,0047	0,0014	18,00	13,00
67	12	68	0,7394	0,2444	28,00	20,00
68	68	69	0,0047	0,0016	28,00	20,00

**d) Resultados simulados**

En la Figura 11 se muestra el perfil de tensión del sistema de distribución IEEE de 69 nodos. Aquí, se puede observar que la tensión está por debajo del límite mínimo permitido entre los nodos 57 y 65.

**Figura 11** – Perfil de tensión del sistema de 69 nodos



En la Tabla 4 se describen los resultados de las tensiones máxima y mínima registradas en el alimentador, así como también, el valor de las pérdidas de potencia.

**Tabla 4:** Resultados del sistema de 69 nodos

Tensión Máxima		Tensión Mínima		Pérdidas de potencia [kW]
Nodo	Valor [p.u.]	Nodo	Valor [p.u.]	
1	1	65	0.9077	245.05

**4.3. Efectos de la penetración de la generación distribuida**

Para verificar los efectos de la penetración de la generación distribuida en los sistemas de distribución, se han modificado los sistemas de prueba mostrados anteriormente incluyendo tres micro-fuentes de generación en cada caso. Estas micro-fuentes son etiquetadas de la siguiente manera:

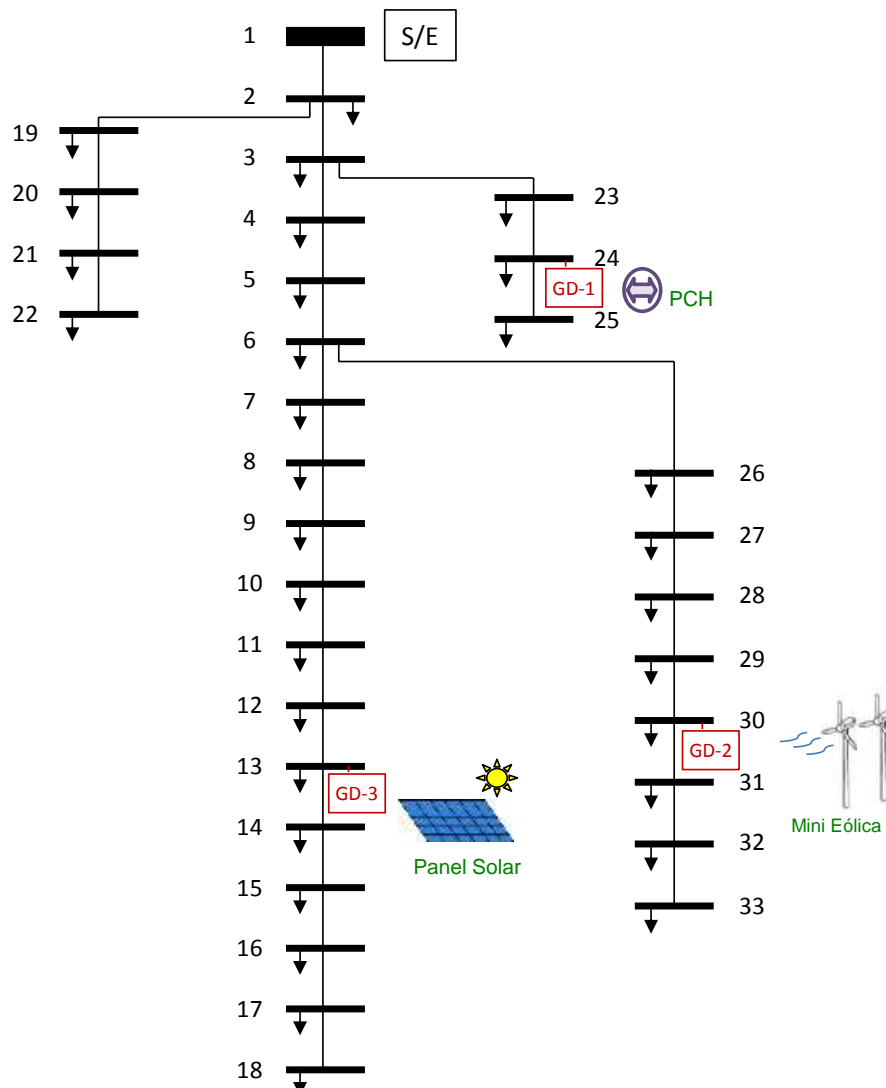
- GD-1: una pequeña central hidroeléctrica.
- GD-2: un mini-generador eólico.
- GD-3: un panel solar.

La ubicación y el tamaño de cada una de las micro-fuentes de generación fueron calculadas en [30] y para este trabajo se han tomado los valores que en esta referencia han reportado como óptimos. Sin embargo, el factor de potencia del mini-generador eólico se ha modificado del valor reportado (unidad) por un valor de 0.85 en atraso, teniendo en cuenta que este valor es más realista respecto a un generador tipo inducción.

### 4.3.1. Sistema de 33-nodos modificado (GD)

#### a) Diagrama unifilar de la micro-red inteligente con GD

Figura 12 - Diagrama unifilar del sistema de 33 nodos modificado (GD)



El diagrama unifilar del sistema IEEE de 33 nodos modificado (penetración de generación distribuida) se muestran en la Figura 12. Adicionalmente, en la Tabla 5, se muestran los datos de cada uno de los tres tipos de micro-generadores instalados.

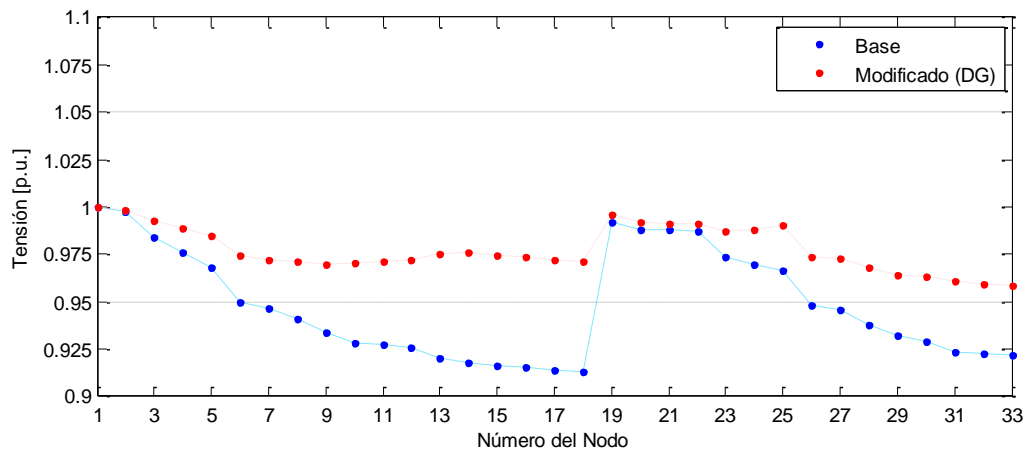
**Tabla 5:** Datos de la generación distribuida instalada en el sistema de 33 nodos

	<b>GD-1</b>	<b>GD-2</b>	<b>GD-3</b>
<b>Nodo</b>	24	30	13
<b>Tamaño [KW]</b>	900	900	900
<b>F.P.</b>	1	0.85	1

**b) Resultados simulados**

En la Figura 13 se muestra la comparación del perfil de tensión del sistema de distribución IEEE de 33 nodos modificado (GD) con el caso base. En este caso, todos los nodos del sistema están dentro de los límites permitidos de tensión.

**Figura 13 –** Perfil de tensión del sistema de 33 nodos modificado (GD)



En la Tabla 6 se describen los resultados de las tensiones máxima y mínima registradas en el alimentador, así como también, el valor de las pérdidas de potencia. Adicionalmente, se observa una reducción del 51.96% de las pérdidas de potencia del sistema de 33 nodos modificado (GD) con respecto al caso base.

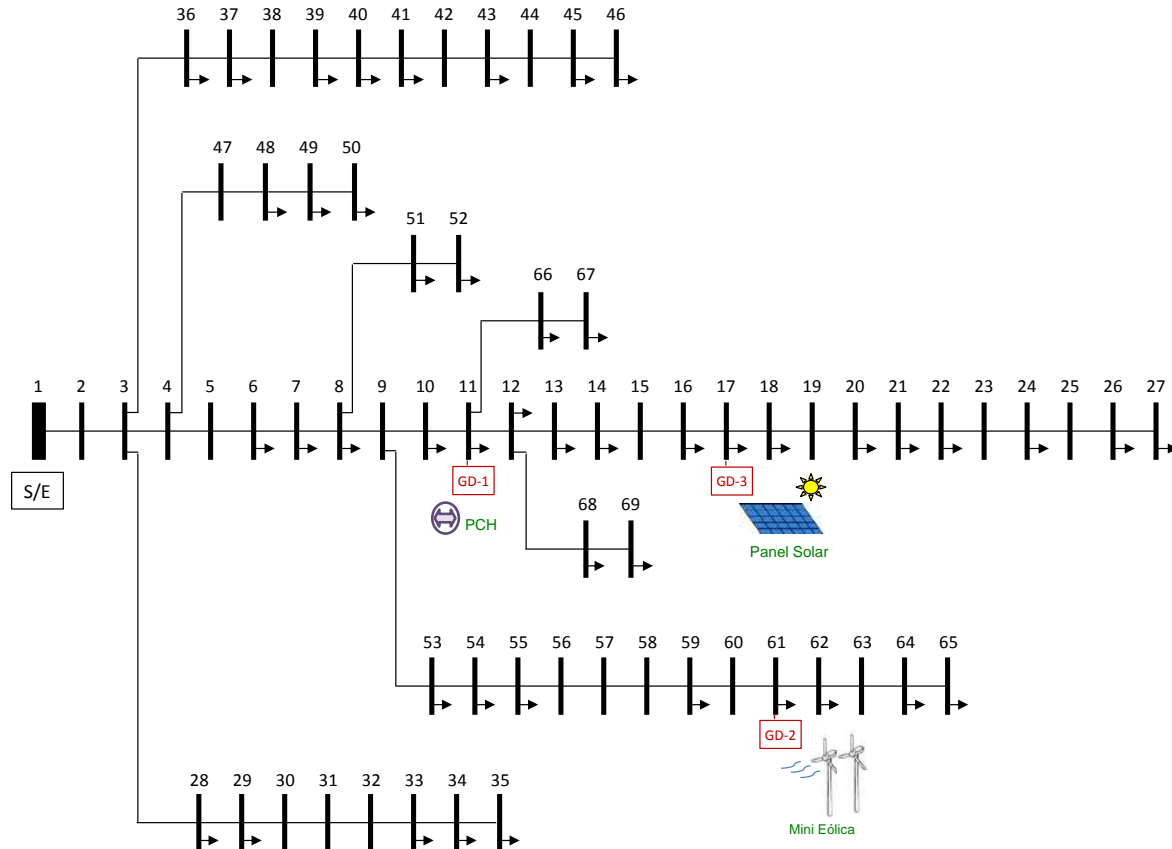
**Tabla 6:** Resultados del sistema de 33 nodos modificado (GD)

Caso	Tensión Máxima		Tensión Mínima		Pérdidas de potencia	
	Nodo	Valor [p.u.]	Nodo	Valor [p.u.]	Valor [kW]	Reducción [%]
Base	1	1	18	0.9135	225.82	-
Modificado (GD)	1	1	33	0.9587	108.48	51.96

### 4.3.2. Sistema de 69-nodos modificado (GD)

#### a) Diagrama unifilar de la micro-red inteligente con GD

El diagrama unifilar del sistema IEEE de 69 nodos modificado (penetración de generación distribuida) se muestran en la Figura 14.

**Figura 14** - Diagrama unifilar del sistema de 69 nodos modificado (GD)



En la Tabla 7, se muestran los datos de cada uno de los tres tipos de generadores distribuidos que han sido instalados.

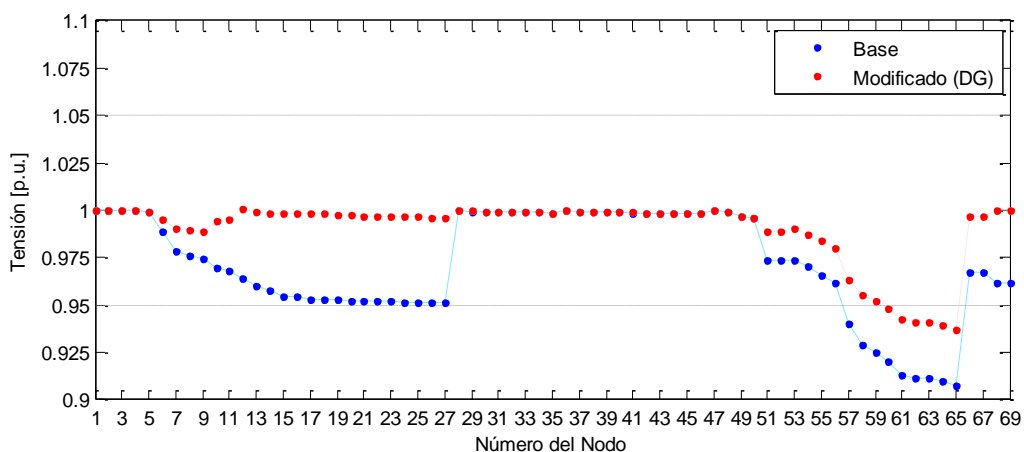
**Tabla 7:** Datos de la generación distribuida instalada en el sistema de 69 nodos

	<b>GD-1</b>	<b>GD-2</b>	<b>GD-3</b>
<b>Nodo</b>	11	61	17
<b>Tamaño [KW]</b>	1700	510	340
<b>F.P.</b>	1	0.85	1

**b) Resultados simulados**

En la Figura 15 se muestra la comparación del perfil de tensión del sistema de distribución IEEE de 69 nodos modificado (GD) y el caso base. En este caso, solo en los nodos del 60 al 65 la tensión está por debajo del límite mínimo permitido.

**Figura 15 –** Perfil de tensión del sistema de 69 nodos modificado (GD)



En la Tabla 8 se describen los resultados de las tensiones máxima y mínima registradas en el alimentador, así como también, el valor de las pérdidas de potencia. Adicionalmente, se observa una reducción del 28.88% de las pérdidas de potencia del sistema de 69 nodos modificado (GD) con respecto al caso base.

**Tabla 8:** Resultados del sistema de 69 nodos modificado (GD)

Caso	Tensión Máxima		Tensión Mínima		Pérdidas de potencia	
	Nodo	Valor [p.u.]	Nodo	Valor [p.u.]	Valor [kW]	Reducción [%]
Base	1	1	65	0.9077	245.05	-
Modificado (GD)	12	1.001	65	0.9372	174.27	28.88

#### 4.4. Efectos de la inyección de potencia reactiva

Para verificar los efectos de la inyección de potencia reactiva en una micro-red inteligente, se modifica nuevamente los sistemas de prueba mostrados anteriormente incluyendo, adicional a los generadores distribuidos, un sistema de inyección de potencia reactiva en cada caso. Este sumidero de potencia reactiva es etiquetado como:

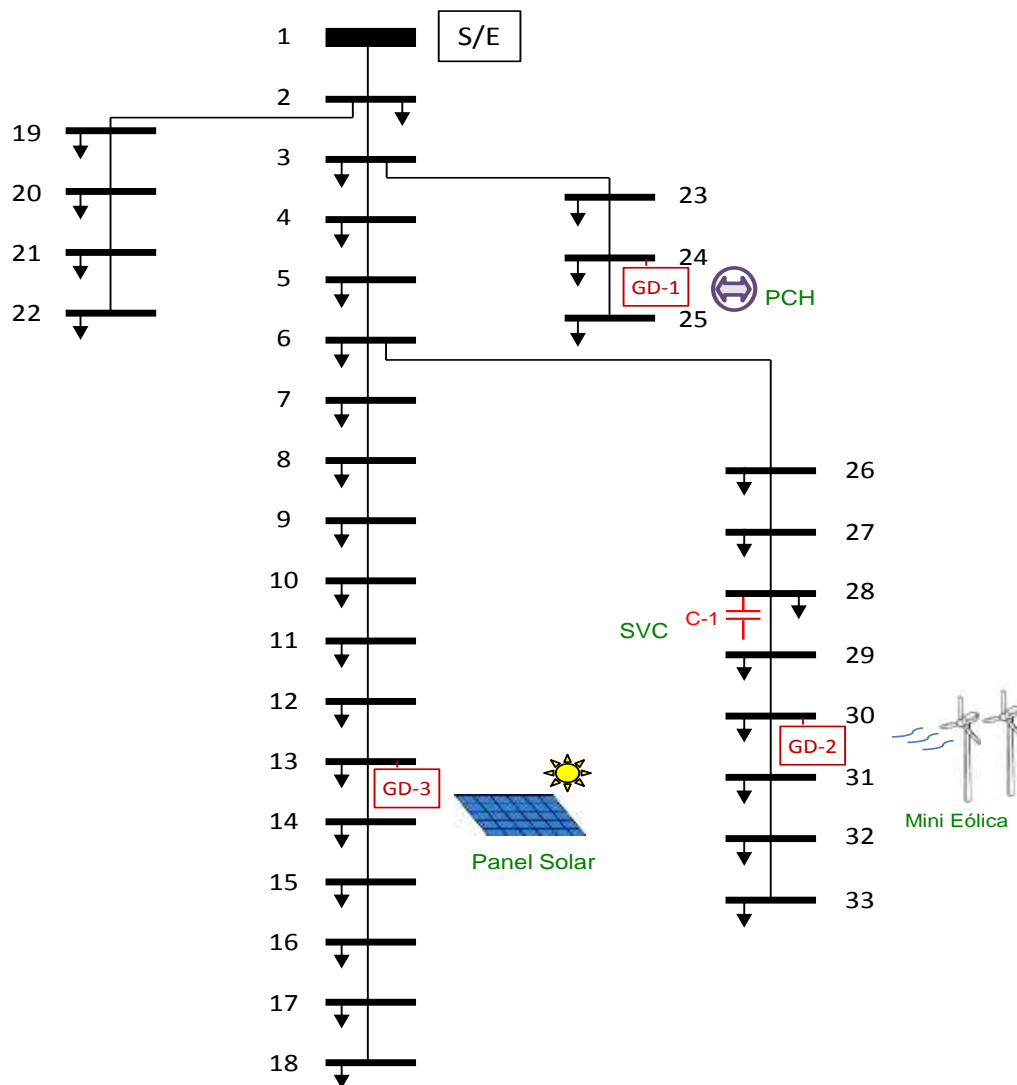
C-1: un compensador estático de potencia reactiva “SVC”.

La ubicación y el tamaño del compensador estático de potencia reactiva fueron calculados empleando la metodología propuesta en el capítulo anterior (sección 3.4).

### 4.4.1. Sistema de 33-nodos modificado (GD + SVC)

#### a) Diagrama unifilar de la micro-red inteligente con GD + SVC

Figura 16 - Diagrama unifilar del sistema de 33 nodos modificado (GD + SVC)



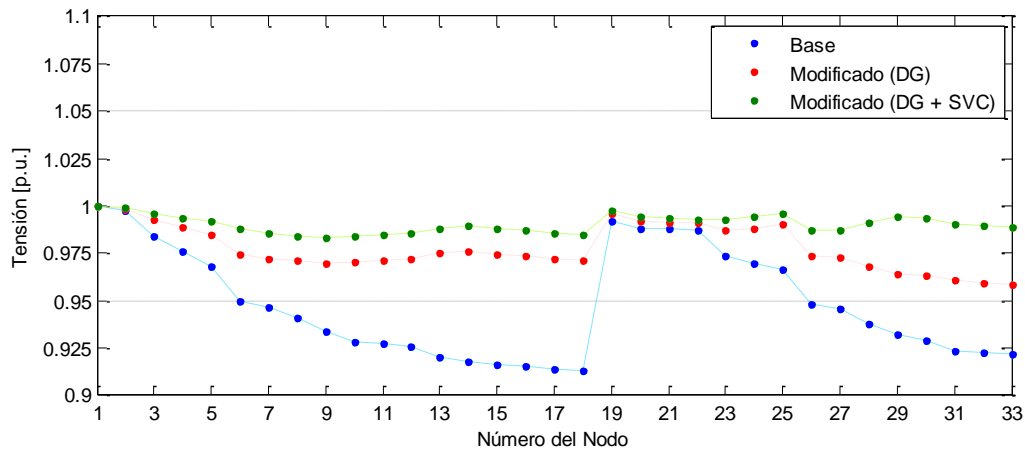
El diagrama unifilar del sistema IEEE de 33 nodos modificado (penetración de generación distribuida e inyección de potencia reactiva con SVC) se muestran en la Figura 16. Adicionalmente, en la Tabla 9, se muestra los datos del sistema compensador estático de potencia reactiva “SVC” que ha sido instalado.

**Tabla 9:** Datos del SVC instalado en el sistema de 33 nodos

	<b>SVC</b>
<b>Nodo</b>	28
<b>Tamaño [KVar]</b>	1440

### b) Resultados simulados

En la Figura 17 se muestra la comparación del perfil de tensión del sistema de 33 nodos modificado y el caso base. En el caso modificado (DG + SVC), el perfil mejora sustancialmente y casi todos los valores de tensión están cercanos a 1 p.u.

**Figura 17** – Perfil de tensión del sistema de 33 nodos modificado (GD + SVC)

En la Tabla 10 se describen los resultados de las tensiones máxima y mínima registradas en el alimentador, así como también, el valor de las pérdidas de potencia.

**Tabla 10:** Resultados del sistema de 33 nodos modificado (GD + SVC)

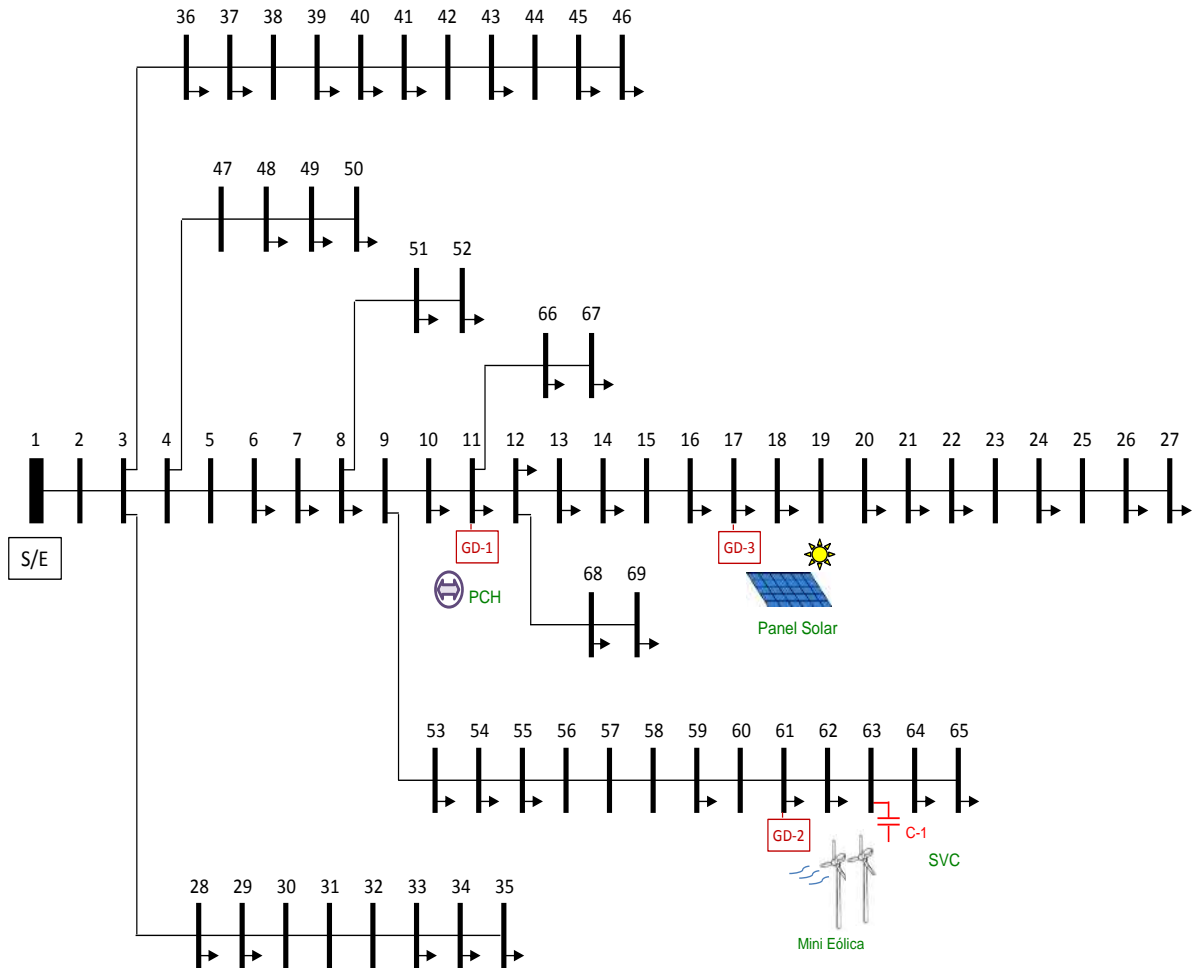
Caso	Tensión Máxima		Tensión Mínima		Pérdidas de potencia	
	Nodo	Valor [p.u.]	Nodo	Valor [p.u.]	Valor [kW]	Reducción [%]
Base	1	1	18	0.9135	225.82	-
Modificado (GD)	1	1	33	0.9587	108.48	51.96
Modificado (GD+SVC)	1	1	9	0.9834	36.99	83.62

Adicionalmente, en la Tabla 10 se observa una reducción del 83.62% de las pérdidas de potencia del sistema de 33 nodos modificado (GD+SVC) con respecto al caso base.

### 4.4.2. Sistema de 69-nodos modificado

#### a) Diagrama unifilar de la micro-red inteligente con GD + SVC

Figura 18 - Diagrama unifilar del sistema de 69 nodos modificado (GD + SVC)



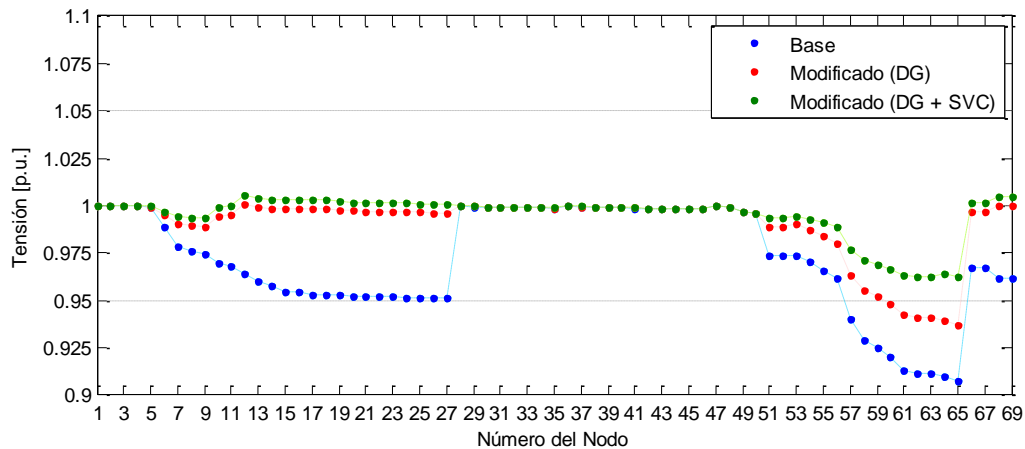
El diagrama unifilar del sistema IEEE de 69 nodos modificado (penetración de generación distribuida e inyección de potencia reactiva con SVC) se muestran en la Figura 18. Adicionalmente, en la Tabla 11, se muestra los datos del sistema compensador estático de potencia reactiva “SVC” que ha sido instalado.

**Tabla 11:** Datos del SVC instalado en el sistema de 69 nodos

	<b>SVC</b>
<b>Nodo</b>	63
<b>Tamaño [KVar]</b>	1350

### b) Resultados simulados

En la Figura 19 se muestra la comparación del perfil de tensión del sistema de 69 nodos modificado y el caso base. En el caso modificado (DG + SVC), el perfil mejora sustancialmente y todos los valores de tensión están dentro de los límites permitidos.

**Figura 19** – Perfil de tensión del sistema de 69 nodos modificado (GD + SVC)

En la Tabla 12 se describen los resultados de las tensiones máxima y mínima registradas en el alimentador, así como también, el valor de las pérdidas de potencia. Adicionalmente, se observa una reducción del 66.35% de las pérdidas de potencia del sistema de 69 nodos modificado (GD+SVC) con respecto al caso base.

**Tabla 12:** Resultados del sistema de 69 nodos modificado (GD + SVC)

Caso	Tensión Máxima		Tensión Mínima		Pérdidas de potencia	
	Nodo	Valor [p.u.]	Nodo	Valor [p.u.]	Valor [kW]	Reducción [%]
Base	1	1	65	0.9077	245.05	-
Modificado (GD)	12	1.001	65	0.9372	174.27	28.88
Modificado (GD+SVC)	12	1.007	65	0.9623	82.45	66.35

## **4.5. Síntesis**

Los ejemplos mostrados en este capítulo buscan identificar los efectos de la inclusión de la generación distribuida en los sistemas de distribución. Así mismo, se analizan los efectos de la inyección de potencia reactiva, utilizando compensadores capacitivos, en una micro-red que incluye micro-generadores. Como se pudo observar, en todos los ejemplos planteados las mejoras del perfil de tensión y la minimización de las pérdidas de potencia fueron notorias. Sin embargo, implementar una estrategia óptima de ubicación y dimensionamiento mejoraría aún más los resultados. Adicionalmente, implementar un sistema de control autónomo, que defina las capacidades de generación y los valores de inyección de potencia reactiva (cada hora), podría minimizar las pérdidas de energía en el sistema durante el período de operación seleccionado, por ejemplo un día, una semana, un año, etc.





# CAPÍTULO 5

## Conclusiones y futuros desarrollos

—

*En este capítulo se presentan las principales conclusiones, se destacan las más importantes contribuciones y se proponen futuros desarrollos. Por último, se enumeran los artículos que han sido puestos a consideración de la comunidad académica.*



# 5. CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS

## 5.1. Conclusiones generales

### **Evolución de las redes eléctricas:**

- Se ha desarrollado una síntesis sobre la evolución de las redes eléctricas, en las últimas décadas. Esta síntesis, muestra la forma natural como se ha ido integrando la generación distribuida y las diversas fuentes de energía renovables a los sistemas eléctricos convencionales.
- Adicionalmente, con esta síntesis se logra vislumbrar el panorama de la inclusión de nuevas tecnologías al sistema de potencia actual.
- Se infiere que los retos de las redes eléctricas del futuro, están enmarcadas principalmente en la búsqueda de la eficiencia energética, el uso masivo de los sistemas de generación distribuida, el almacenamiento de la energía y el intercambio dinámico y bidireccional de la energía.

### **Minimización de las pérdidas de energía:**

- Se han identificado los principales conceptos, elementos y tecnologías necesarios para minimizar las pérdidas de potencia en una red inteligente enmarcada en el concepto de las micro-redes.
- Una óptima distribución de la inyección de potencia activa o reactiva en la micro-red inteligente es un factor decisivo en la planificación y operación de las redes de distribución del futuro. Esta óptima distribución mejora el perfil de tensión y reduce al mínimo las pérdidas de potencia y energía en la micro-red inteligente.

### **Ejemplificación de redes inteligentes:**

- Se ha ejemplificado el funcionamiento de las redes inteligentes enmarcadas en el concepto de las micro-redes, mediante la implementación y simulación

- de casos de estudio básicos enfocados a la minimización de pérdidas de potencia.
- La metodología implementada para la mejora del perfil de tensión y la minimización de las pérdidas de potencia, arrojó excelentes resultados, garantizando un proceso eficiente y confiable. Esto, debido a que los sistemas de distribución de energía, escogidos como casos de estudio, hacen parte de las redes eléctricas de la base de datos de la IEEE “*Radial distribution test feeders N-bus IEEE*”.
  - Con la ejemplificación se identifican los efectos de la inclusión de la generación distribuida en los sistemas de distribución. Así mismo, se identifican los efectos de la inyección de potencia reactiva, utilizando compensadores capacitivos, en una micro-red que incluye micro-generadores.

## 5.2. Futuros desarrollos

Son muchas las direcciones en las que se podrían continuar este trabajo. Entre ellas se destacan las siguientes:

- Desarrollo en redes y sistemas de energía eléctrica:
  - Integración de las energías renovables en la red eléctrica
  - Impacto sobre la calidad de suministro eléctrico
  - Compensación de perturbaciones mediante dispositivos electrónicos
  - Diseño de equipos electrónicos de compensación serie DVR y paralelo STATCOM
  - Coordinación de protecciones en Redes Flexibles
  - Ubicación óptima de los dispositivos D-FACTS (*Distributed Flexible AC Transmission Systems*) utilizando algoritmos de optimización
- Desarrollos en sistemas de almacenamiento de energía.
  - Análisis en el dominio del tiempo y la frecuencia para sistemas de almacenamiento de energía.
  - Estudio de la adaptación de sistemas de almacenamiento para su funcionamiento en redes inteligentes

- Modelado dinámico no lineal de sistemas de almacenamiento y simulación en aplicaciones de minimización de pérdidas de energía.
- Interacción vehículo-red: carga y descarga de la batería del vehículo para su uso como almacenamiento en red

### 5.3. Discusión Académica

A continuación se relacionan los documentos que se han puestos en consideración de la comunidad académica durante la ejecución de este trabajo:

1. *ICHQP 2012:15th IEEE International Conference on Harmonics and Quality of Power*, “Visualizing Two- and Three-Dimensional Maps for Power Quality Loss Assessment”, Hong Kong (China), 17/06/2012.
2. *IAS 2014:IVIAS Colombian Workshop 2014*, “Una Revisión Prospectiva de la Inclusión del Vehículo Eléctrico en Colombia”, Medellín (Colombia), 10/09/2014,in review.

## Referencias bibliográficas

- [1] SEVILLA, Arturo Geovanny Peralta, and Ferney Orlando Amaya Fernández. "Evolución de las redes eléctricas hacia Smart Grid en países de la Región Andina." *Revista Educación en Ingeniería* 8, no. 15 (2013): 48-61.
- [2] WAKEFIELD, M. P., "Smart distribution system research in EPRI's smart grid demonstration initiative," *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1–4, 2011, DOI:10.1109/PES.2011.6039386
- [3] DÍAZ ANDRADE, C. A., and Hernández J. C. "Smart Grid: Las TICs y la modernización de las redes de energía eléctrica-Estado del Arte." *Revista Sistemas y Telemática*, Vol. 9, No. 18, 2011.
- [4] LASSETER, R.H.; Paigi, P., "Microgrid: a conceptual solution," *Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual*, vol.6, no., pp.4285,4290 Vol.6, 20-25 June 2004. doi: 10.1109/PESC.2004.1354758
- [5] TSIKALAKIS, AG.; Hatziargyriou, N.D., "Centralized control for optimizing microgrids operation," *Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE*, vol., no., pp.1,8, 24-29 July 2011. doi: 10.1109/PES.2011.6039737
- [6] PAHWA, A., and Venkata, S. S., "Preparing the workforce for smart distribution systems," *2011 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Asia (ISGT)*, 13-16 Nov. 2011.doi: 10.1109/ISGT-Asia.2011.6167152
- [7] ZHAO, J., Wang, C., Zhao, B., Lin, F., Zhou, Q., and Wang, Y., "A review of active management for distribution networks: Current status and future development trends," *Elect. Power Compon. Syst.*, Vol. 42, No. 3–4, pp. 280–293, 2014.
- [8] MARINESCU, C.; Deaconu, A; Ciurea, E.; Marinescu, D., "From Microgrids to Smart Grids: Modeling and simulating using graphs. Part I active power flow," *Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), 2010 12th International Conference on*, vol., no., pp.1245,1250, 20-22 May 2010. doi: 10.1109/OPTIM.2010.5510534
- [9] MOHAMED E. El-hawary "The Smart Grid – State-of-the-art and Future Trends," *Electric Power Components and Systems*, Vol. 42, No. 3-4, pp. 239-250, 2014. doi: 10.1080/15325008.2013.868558.
- [10] PATHIRIKKAT, G., Reddy, M. J. B., and Mohanta, D., "stability concerns in smart grid with emerging renewable energy technologies," *Elect. Power Compon. Syst.*, Vol. 42, No. 3–4, pp. 418–425, 2014.
- [11] CIGRE (1999). *Impact of Increasing Contribution of Dispersed Generation on Power System*, Working Group 37.23.
- [12] ACKERMANN, T., "Distributed Generation - A Definition", *Proceedings of the International Symposium on Distributed Generation: Power System and Market Aspects*, Estocolmo, Suecia, Junio 11-13, 2001.

- [13] W EL-KHATTAM, M.M.A Salama "Distributed generation technologies, definitions and benefits" *Electric Power Systems Research*, Volume 71, Issue 2, Pages 119-128, 2004.
- [14] J.A. Peças Lopes, N. Hatziargyriou, J. Mutale, P. Djapic, N. Jenkins "Integrating distributed generation into electric power systems: A review of drivers, challenges and opportunities" *Electric Power Systems Research*, Volume 77, Issue 9, Pages 1189-1203, 2007.
- [15] LIU QIANG; Zhou Lin; GuoKe, "Review on the dynamic characteristics of micro-grid system," *Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2012 7th IEEE Conference on* , vol., no., pp.2069,2074, 18-20 July 2012. doi:10.1109/ICIEA.2012.6361071
- [16] SHAMSHIRI, M.; Chin Kim Gan; Chee Wei Tan, "A review of recent development in smart grid and micro-grid laboratories," *Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO) Melaka, Malaysia, 2012 IEEE International* , vol., no., pp.367,372, 6-7 June 2012. doi: 10.1109/PEOCO.2012.6230891
- [17] KWHANNET, U.; Sinsuphun, N.; Leeton, U.; Kulworawanichpong, T., "Impact of energy storage in micro-grid systems with DGs," *Power System Technology (POWERCON), 2010 International Conference on* , vol., no., pp.1,6, 24-28 Oct. 2010 doi: 10.1109/POWERCON.2010.5666059
- [18] ZHENGZENG, Rongxiang Zhao, Huan Yang, Micro-sources design of an intelligent building integrated with micro-grid, *Energy and Buildings*, Volume 57, February 2013, Pages 261-267, ISSN 0378-7788, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.11.018>.
- [19] SIMING Li; Yunhui Chen; Jing He; Yongding Fu; Bangfeng Li; HuiHou; Jianzhong Zhou; Yongchuan Zhang, "Discussion on Smart Grid Development in China," *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2011 Asia-Pacific* , vol., no., pp.1,4, 25-28 March 2011. doi: 10.1109/APPEEC.2011.5749141
- [20] DRAGAN S. Markovic, DejanZivkovic, Irina Branovic, RankoPopovic, DraganCvetkovic, "Smart power grid and cloud computing", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 24, August 2013, Pages 566-577, ISSN 1364-0321, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.068>.
- [21] MELIKEYIGIT, V. CagriGungor, SelcukBaktir, "Cloud Computing for Smart Grid applications", *Computer Networks*, Volume 70, 9 September 2014, Pages 312-329, ISSN 1389-1286, <http://dx.doi.org/10.1016/j.comnet.2014.06.007>.
- [22] A. Salehi Dobakhshari, E, S. Azizi, and A. M. Ranjbar Control of Microgrids: Aspects and Prospects, 2011 International Conference on Networking, Sensing and Control, Delft, the Netherlands, 11-13 April 2011.
- [23] JONG-YOUNG Park; Jin-Man Sohn; Jong-Keun Park, "Optimal Capacitor Allocation in a Distribution System Considering Operation Costs," *Power Systems, IEEE Transactions on* , vol.24, no.1, pp.462,468, Feb. 2009 doi: 10.1109/TPWRS.2008.2009489.

- [24] DUONG QUOC Hung; Mithulanathan, N.; Bansal, R.C., "Analytical Expressions for DG Allocation in Primary Distribution Networks," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol.25, no.3, pp.814,820, Sept. 2010 doi: 10.1109/TEC.2010.2044414
- [25] ABDELLATIF Hamouda and Khaled Zehar, "Efficient Load Flow Method for Radial Distribution Feeders". *Journal of Applied Sciences*, 6: 2741-2748, 2006.
- [26] KHATOD, D.K.; Pant, V.; Sharma, Jaydev, "A novel approach for sensitivity calculations in the radial distribution system," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol.21, no.4, pp.2048,2057, Oct. 2006. doi: 10.1109/TPWRD.2006.874651
- [27] J.V.B. Subramanyam and C. Radhakrisna. "Distributed Generation placement and sizing in unbalanced radialdistribution system". *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2009, 52: 737-744.
- [28] M. A. Kashem, V. Ganapathy, G. B. Jasmon, and M. I. Buhari, "A novel method for loss minimization in distribution networks," in Proc. IEEE Int. Conf. Elect. Utility Deregulation Restruct. Power Technol., 2000, pp. 251–256.
- [29] M. E. Baran and F. F. Wu, "Optimum sizing of capacitor placed on radial distribution systems," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 4, no. 1, pp. 735–743, Jan. 1989.
- [30] DUONG Quoc Hung; Mithulanathan, N., "Multiple Distributed Generator Placement in Primary Distribution Networks for Loss Reduction," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol.60, no.4, pp.1700,1708, April 2013 doi: 10.1109/TIE.2011.2112316