

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**



**CALIDAD DE ENERGÍA EN GENERACIÓN  
DISTRIBUIDA**

**INFORME DE SUFICIENCIA  
PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERO ELECTRICISTA**

**PRESENTADO POR:  
REYNALDO GERÓNIMO CÓRDOVA ARONÉS**

**PROMOCIÓN**

**2008 – II**

**LIMA – PERÚ**

**2013**

# **CALIDAD DE ENERGÍA EN GENERACIÓN DISTRIBUIDA**

*A mis queridos padres.*

## **SUMARIO**

La necesidad de sistemas confiables de electricidad, el cambio de políticas regulatorias y económicas, el ahorro energético, la motivación al uso de energía renovable y el impacto ambiental son el gran impulso para el desarrollo de la Generación Distribuida (GD), que se prevé que desempeñan un papel creciente en el sistema de energía eléctrica del futuro.

Por estas razones en el presente informe se hace una breve reseña cronológica desde sus inicios de esta nueva filosofía, para luego hacer un enfoque de la aplicación e impactos de la GD, poniendo énfasis en sus repercusiones en la Calidad de Energía del sistema.

Se analiza las grandes ventajas de la aplicación de la GD en los sistemas eléctricos tanto para los que operan y los consumidores de la energía eléctrica, tales como: menor inversión en líneas de transmisión, reducción de pérdidas, aumento de confiabilidad, mejor control de la potencia reactiva y tensiones en barras, generación de energía limpia (energía renovable), etc.; todo esto conduce a una mejor calidad de energía eléctrica. Finalmente se expone las ventajas de la aplicación de la Generación Distribuida en algunos países del mundo.

## ÍNDICE

<b>PROLOGO.....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO.....</b>	<b>3</b>
<b>CONSIDERACIONES PREVIAS .....</b>	<b>3</b>
1.1 Objetivo.....	3
1.2 Antecedentes .....	3
1.3 Planteamiento del Problema.....	4
1.4 Estado del Arte.....	6
1.5 Alcances .....	10
<b>CAPITULO II.....</b>	<b>11</b>
<b>GENERACIÓN DISTRIBUIDA.....</b>	<b>11</b>
2.1 Concepciones de la Generación Distribuida.....	11
2.1.1 Aplicación en Sistemas de Potencia .....	11
2.1.2 Aplicación en Redes de Distribución .....	11
2.1.3 Aplicación en Redes de Electrificación Rural .....	13
2.1.4 Aplicación en Sistemas Eléctricos Aislados.....	13
2.2 Planeamiento de la Generación Distribuida .....	14
2.3 Ubicación Óptima de la Generación.....	16
2.4 Comparación entre Generadores Síncronos y Maquinas de Inducción en Generación Distribuida.....	16
2.4.1 Los Generadores Síncronos .....	17
2.4.2 Los Generadores de Inducción .....	17
2.5 Generación Distribuida con Energía Renovable.....	18
2.5.1 Generación con Micro turbinas a Gas .....	18
2.5.2 Generación con Biomasa .....	19
2.5.3 Generación Solar Fotovoltaica .....	22
2.5.4 Generación Eólica.....	24
2.5.5 Microturbina Hidráulica.....	26
2.5.6 Cogeneración.....	28

<b>CAPITULO III.....</b>	<b>30</b>
<b>CALIDAD DE ENERGÍA EN GENERACIÓN DISTRIBUIDA.....</b>	<b>30</b>
3.1 Efectos de la Integración de la Generación Distribuida al Sistema Eléctrico .....	30
3.2 Beneficios de la Generación Distribuida .....	30
3.3 Perfiles de Tensión en Régimen Permanente .....	31
3.4 Reduccion de Pérdidas de Potencia Activa .....	36
3.5 Descogestión de Lineas de Transmisión.....	38
3.6 Estabilidad .....	39
3.6.1 Estabilidad de Tensión.....	40
3.6.2 Estabilidad Transitoria.....	41
3.6.3 Protección .....	42
3.6.4 Control de flujo de potencia .....	43
3.6.5 Tensión SAG .....	44
3.6.6 Corrientes de cortocircuito.....	44
3.7 Seguridad .....	45
3.8 Confiabilidad .....	51
<b>CAPITULO IV.....</b>	<b>54</b>
<b>CASOS DE ESTUDIO DE LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA .....</b>	<b>54</b>
4.1 El proyecto más grande.....	54
4.2 Casos de estudio de la generación distribuida con biomasa.....	59
4.3 Aplicación en otros países.....	61
4.4 Aplicación en el Perú.....	66
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>67</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>69</b>

## PRÓLOGO

La Generación Distribuida (GD) incluye la aplicación de pequeños generadores, repartidos por todo un sistema de energía cerca de la carga, para proporcionar la energía eléctrica que necesitan los clientes y consumidores eléctricos. La GD a menudo ofrece una valiosa alternativa a las fuentes tradicionales de energía eléctrica para aplicaciones industriales, comerciales y residenciales si se hace un amplio uso de la última tecnología moderna y puede ser eficiente, confiable y simple para poseer y operar que pueda competir con los sistemas de energía eléctrica.

La necesidad de sistemas eléctricos más flexibles, el cambio de escenarios regulatorios y económicos, el ahorro de energía, impacto ambiental y la necesidad de proteger las cargas sensibles contra perturbaciones en la red están dando impulso al desarrollo de la generación distribuida y sistemas de almacenamiento basados en una variedad de tecnologías. En particular, la generación distribuida implica el uso de cualquier tecnología modular que se localiza en toda el área de servicio de una empresa eléctrica (de interconexión a la distribución o sub-redes de transporte) para bajar el costo del servicio. La GD puede incluir motores de combustión interna diesel y, pequeñas turbinas de gas, pilas de combustible y energía fotovoltaica. El propósito de estas plantas es hacer frente a la creciente demanda de electricidad en algunas zonas y hacer ciertas actividades autosuficientes en términos de producción de energía logrando así un ahorro de energía.

Las principales razones para el uso cada vez más extendido de la generación dispersa se puede resumir de la siguiente manera: unidades sistema eléctrico están más cerca de clientes, de modo que los costos de Transmisión y Distribución (T & D) son evitados o reducidos; la última tecnología han hecho centrales disponibles con capacidades que van de 1 a 15 MW. Algunas tecnologías se han perfeccionado y son ampliamente practicados (turbinas de gas, motores de combustión interna), otros están encontrando una aplicación más amplia en los últimos años (energía eólica, energía solar) y algunas tecnologías son especialmente prometedoras que se experimenta actualmente en marcha (pilas de combustible, paneles solares integrados en los edificios), porque es más fácil encontrar

sitios para pequeños generadores. Cogeneración (producción combinada de calor y electricidad) los grupos no requieren redes de calor muy grande y caro, el gas natural a menudo utilizado como combustible en las estaciones del sistema eléctrico se distribuye casi instantáneamente y los precios son de esperar estables, por lo general la GD de plantas requieren menor tiempo de instalación y el riesgo de la inversión no es tan alto, en las plantas de generación el rendimiento es bastante bueno, especialmente en la cogeneración y en los ciclos combinados (plantas más grandes) la liberalización del mercado de la electricidad contribuye a crear oportunidades de nuevas utilidades en el sector de generación de energía; los costos de T & D han aumentado mientras que los costos GD han caído, como consecuencia los costos evitados producido por la GD están aumentando, la GD ofrece grandes valores ya que proporciona una manera flexible para elegir una amplia gama de combinaciones de costos y la confiabilidad. Por estas razones, los primeros signos de un posible cambio tecnológico están comenzando a surgir en la escena internacional, que puedan suponer en un futuro próximo la presencia de una generación constante producido con plantas pequeñas y medianas de empresas directamente conectados a la red de distribución (MT y BT) y que se caracteriza por la buena eficiencia y bajas emisiones. En este contexto es necesario proporcionar acceso a la red de distribución a cualquier empresa que se propone instalar la GD con capacidad para gestionar los servicios de estas redes, el mantenimiento de niveles adecuados de seguridad y calidad. En consecuencia, las utilidades se enfrentan ahora no sólo con los problemas técnicos que participan en la gestión de las redes que han ido pasando de un estado pasivo de regulación activa de tensión (la política de protección, las perturbaciones y los problemas de interconexión) con nuevas tareas. Sin lugar a dudas, la planificación y operación del sistema se han convertido en una tarea mucho más incierto que en el pasado. Por ejemplo, las centrales eléctricas podrán decidir recurrir a la GD en lugar de cumplimiento con la transmisión y distribución a las plantas. Esto creará nuevos problemas y probablemente la necesidad de nuevas herramientas para desarrollar y gestionar estos sistemas.



# **CAPÍTULO I**

## **CONSIDERACIONES PREVIAS**

### **1.1 Objetivo**

El objetivo del presente informe es analizar los efectos en la calidad de energía y sus efectos técnicos, cuando se aplica la teoría de la Generación Distribuida (GD) en sistemas eléctricos de potencia o en redes de distribución, para poder conocer el impacto de la GD en el sistema eléctrico, tales como: Descongestión de Líneas de transmisión, reducción de pérdidas de potencia activa, mejoramiento de los perfiles de tensión en barras, estabilidad de tensión y transitoria, protección, control de flujo de potencia, corrientes de cortocircuito, seguridad y confiabilidad. Al final se establece conclusiones y recomendaciones para el mejor aprovechamiento de la Generación Distribuida.

### **1.2 Antecedentes**

El número cada vez mayor de sistemas de distribución e instalaciones de generación de energías renovables ha comenzado a afectar a la forma de los sistemas de mayor potencia. También la idoneidad de energía y la capacidad de planificación, los aspectos medio ambientales y consideraciones económicas, programas de Generación Distribuida y Energía Renovable que tengan en cuenta su efecto sobre la seguridad del sistema de transmisión probablemente aumenten las mejoras de la red a largo plazo. En particular la Generación Distribuida tiene el potencial de aumentar notablemente la seguridad de la red si los nuevos proyectos se ubican estratégicamente para disminuir los flujos de transmisión, y reducir la congestión. Debido al rápido aumento de la generación de energía, se han producido incrementos numerosos en las tasas de consumo eléctrico de crecimiento y altas densidades de carga. Este crecimiento y la necesidad de sistemas eléctricos más flexible, el cambio de escenarios regulatorios y económicos, el ahorro de energía, impacto ambiental y la necesidad de proteger las cargas sensibles contra perturbaciones en la red están dando impulso al desarrollo de la generación distribuida y sistemas de almacenamiento basados en la variedad de tecnologías. En particular, el termino generación distribuida implica el uso de cualquier tecnología modular que se

localiza a lo largo de un área de servicio de utilidad para disminuir el costo de los servicios. La GD puede incluir motores de combustión interna diesel y pequeñas turbinas de gas, pilas de combustible y la energía fotovoltaica. El propósito de estas plantas es hacer frente a la creciente demanda de electricidad en algunas zonas y hacer ciertas actividades de venta suficiente en términos de producción de energía logrando así un ahorro de energía. Las principales razones para el uso cada vez más extendido de la generación dispersa se pueden resumir de la siguiente manera:

- Las unidades de la GD están más cerca de los clientes de manera que los costos de transmisión y distribución se reducen.
- La última tecnología ha hecho que las centrales disponibles con capacidades que van desde 10 kW a 15 MW.
- Es más fácil encontrar ubicación para pequeños generadores.
- Por lo general, la GD de plantas requieren menor tiempo de instalación y el riesgo de inversión no es tan alto.
- Cogeneración (producción combinada de calor y electricidad) los grupos no requieren de la red de calor muy grande y costoso.
- El gas natural, a menudo utilizado como combustible en las estaciones que se distribuye en casi todas partes y los precios son de esperar estables.
- Plantas de la GD de eficiencia bastante bueno, especialmente en la cogeneración y ciclos combinados.
- La GD ofrece grandes valores, ya que proporciona una manera flexible para elegir una amplia gama de combinaciones de costes y de fiabilidad.

Por estas razones los primeros signos de un posible cambio tecnológico están comenzando a surgir en la escena internacional, lo que podría implicar en el futuro la presencia de una generación constante producido con plantas pequeñas y medianas de empresas directamente conectados a la red de distribución (BT y MT) y que se caracteriza por la buena eficiencia y bajas emisiones.

Esto creará nuevos problemas y, probablemente, la necesidad de nuevas herramientas y gestión de estos sistemas.

### **1.3 Planteamiento del Problema**

El problema es determinar el impacto del uso de la GD sobre todo con el cumplimiento de la calidad de energía y las normas de servicio eléctrico. La calidad de suministro, comprende la calidad de producto y la continuidad de suministro. El producto que reciben

los clientes es la onda de tensión. Por tanto la calidad de producto la conforman todas aquellas perturbaciones que afectan a las características más fundamentales de la onda de tensión.

Además, en años recientes la Generación Distribuida ha recibido un creciente interés y esto puede contribuir a alcanzar diversos objetivos de políticas energéticas. El mejoramiento de la seguridad de abastecimiento, la reducción de emisiones de gas de efecto invernadero, ganancia en eficiencia y mayor flexibilidad en inversiones son algunos de los objetivos asociados a la implementación de generación distribuida en los sistemas de distribución.

El mundo actualmente está enfrentado con un rango de problemas ambientales que amenazan el ecosistema, la salud, la economía y la calidad de vida de los usuarios. Incrementando la conciencia pública del rol del sector eléctrico en esta materia, y con la posibilidad de las opciones de cambio de futuros consumidores en fuentes de energía y electricidad, la industria podría aumentar la expectativa de reducción de emisiones de gases que ocasionan el efecto invernadero. Las soluciones preferidas para prevenir estas emisiones incluyen la conservación de los recursos y la utilización de fuentes de energía renovables y limpias. Es por eso que las fuentes de energía renovables como la eólica, solar, etc., juegan un rol importante como fuentes de energía mecánica y eléctrica, no para reemplazar las fuentes convencionales de energía eléctrica sino para complementarlas.

Con el objetivo de promover el desarrollo de la Generación Distribuida proveniente de fuentes de energía renovables, es necesario superar las barreras presentadas en los sistemas de distribución, como la gran inercia de los operadores del sistema de distribución debido a la falta de incentivos regulatorios y los altos costos de accesos a las redes y al mercado, como así también a las barreras técnicas encontradas en la mayoría de los sistemas operados en forma pasiva. A través de la evaluación del impacto de los costos de la generación dispersa a las distribuidoras, y en la medida que la penetración de la generación distribuida en las redes de distribución vaya en aumento, los estudios de los impactos sobre los costos de las redes se tornan esenciales.

Como resultado se obtiene que con el nivel óptimo de penetración de GD se reduce el costo de operación y funcionamiento de las redes de distribución debido al aplazamiento de la necesidad de inversiones en refuerzos y mejoramientos en la eficiencia energética transportada, con disminución en las pérdidas totales de las líneas de distribución. La elevada repercusión positiva que puede significar un nivel óptimo de Generación Distribuida dentro de los mercados desregulados, específicamente cuando conectados a las

redes de distribución, sugiere la investigación en los criterios y metodologías que permitan una evaluación cualitativa y cuantitativa del tamaño y el lugar óptimo de instalación de las centrales de generación distribuida, y por ende buscar la valoración del máximo beneficio técnico y social que brindaría la misma.

#### **1.4 Estado del Arte**

En ésta parte, se hace una revisión bibliográfica relacionada con los modelos de planificación óptima de la generación en sistemas eléctricos, haciendo énfasis en modelos relacionados con la planificación de la Generación Distribuida en redes de distribución.

A partir de la revisión bibliográfica se resumen las principales características de los modelos revisados, haciendo énfasis en cuál es el objetivo u objetivos a optimizar, técnicas de optimización utilizadas y restricciones tanto técnicas como económicas contempladas.

Crawford y Holt [1] analizan el problema de planificación de la ubicación, tamaño y área de servicio de las subestaciones de distribución. El problema formulado considera una función lineal de costes asociados directamente a las longitudes de los tramos y se resuelve mediante dos algoritmos; de Dijkstra para encontrar las rutas más cortas y de Ford y Fulkerson para determinar las áreas óptimas de servicio de las subestaciones. El modelo permite resolver problemas de tamaño relativamente grandes, pero tiene limitaciones de no incluir las restricciones de capacidad de transporte de potencia de los alimentadores.

Salamat Sharif [2] utilizan un algoritmo para la expansión de la generación en un sistema de distribución radial, el cual es llevado a cabo en dos pasos. En el primer paso se utiliza el concepto de árbol de expansión mínimo. En el segundo paso el problema de optimización es construido sujeto a las restricciones técnicas del sistema y es utilizada programación lineal entera mixta (MIP) para su solución. La función objetivo es el valor presente del coste de inversión.

El-Khattam [3] plantea un modelo basado en programación lineal mixta-entera para planificar el diseño óptimo de una red de distribución con Generación Distribuida donde se contemplan no solamente restricciones de operación técnicas de seguridad, sino que también se contempla la mejor alternativa para la ubicación y dimensionado óptimos de los generadores distribuidos, así como la selección de tipo de generadores y de rutas óptimas de las líneas de distribución.

Gözel y Hocaoglu [4] modelan un sistema de distribución para minimizar las pérdidas de potencia en la red. En este modelo es crucial definir el tamaño y ubicación de la generación local. Se tienen en cuenta algunas de las características de los sistemas de distribución,

tales como: estructura de radialidad, número de nudos y el rango de la relación X/R. En este estudio, un factor de sensibilidad de pérdidas, basado en inyección de corriente equivalente es formulado para el sistema de distribución. El factor de sensibilidad es empleado para la determinación del tamaño óptimo y localización óptima de la GD, así como para minimizar las pérdidas de potencia por un método analítico, sin el uso de la matriz de admitancias, la inversa de la matriz de admitancias o el Jacobiano de la matriz. Se muestra que el método propuesto está acorde con el algoritmo clásico basado en flujos de carga sucesivos.

Domínguez en el año 2004, presenta un algoritmo para obtener la localización óptima de generadores que permitan la adecuada operación de una red de distribución donde se incluye Generación Distribuida. El algoritmo propuesto ha sido desarrollado para sistemas de distribución de energía eléctrica y se basa en la técnica heurística conocida como búsqueda tabú. La función objetivo a optimizar es la minimización del coste de generación con penalizaciones debidas a sobrecargas en las ramas y caídas de tensión en los buses. Las restricciones técnicas son de operación y de variables de control.

Kuri, Li [5] proponen una estructura para optimizar la planificación de la generación distribuida enfatizando los riesgos e incertidumbres, toma en cuenta aspectos técnicos, medioambientales y comerciales debido a los cambios legislativos, precios de combustibles e innovaciones tecnológicas.

BergKrahl y Paulun [6] presentan un método para la evaluación y minimización de costes de la red con generación distribuida. Las herramientas para optimización de la red son para realizar la integración a un costo eficiente a largo plazo. La planificación a largo plazo de redes de distribución de media tensión está basada en un enfoque rural, con un horizonte de varias décadas. La planificación es llevada a cabo tomando en consideración restricciones geográficas tales como localización de subestaciones y rutas en mal uso, además de restricciones técnicas: suministro y carga de los consumidores, cantidad máxima de equipo y operación en condiciones normales y bajo fallo, límites de tensión permitidos y corrientes de cortocircuito son considerados, entre otros. El objetivo de la planificación es minimizar el coste de inversión y costes de operación anuales así como los costes de pérdidas de potencia. En esta contribución, una herramienta computacional es utilizada, la cual está basada en un método heurístico de dos etapas que considera todas las restricciones técnicas y geográficas relacionadas. En la primera etapa una solución inicial es generada con un algoritmo originalmente desarrollado para resolver el problema de la

ruta del vehículo, después es mejorado con un método basado en una búsqueda tabú.

Cormio [7] emplea una metodología basada en un modelo de flujo óptimo de cargas óptimo, utilizando programación lineal. El proceso de optimización es utilizado para disminuir los impactos medioambientales y económicos, tomando en cuenta la instalación de plantas de ciclo combinado, plantas eólicas, explotación de biomasa junto con sistemas industriales combinados de calor y energía. Este modelo describe el sistema de energía como una red de flujos de energía, combinando la extracción de combustibles primarios, a través de tecnologías de conversión y transporte, para cubrir la demanda de energía de un alto consumo de materiales. El horizonte de planificación es definido por periodos, generalmente de diferente tamaño. La función objetivo consiste en la minimización del coste actualizado de la conversión de la energía primaria sobre un horizonte de tiempo seleccionado. Las restricciones del modelo deben de satisfacer la demanda punta de electricidad en todos los periodos más un margen considerable, además de contemplar la energía exportada. Los límites de cada fuente de generación deben de ser contemplados para que no sea excedida la producción de energía anual.

Gallego - Preciado [8] proponen un método de optimización para la planificación de la expansión de una red de sub transmisión a medio y largo plazo de una red de sub transmisión. La técnica de optimización utilizada es programación no lineal mixta entera. La función objetivo minimiza el total de costes obtenidos a partir de la suma del coste de inversión, más los costos de operación.

Keane y O'Malley [9] proponen una nueva metodología para determinar la localización óptima de generadores distribuidos a lo largo de la red de distribución. El objetivo es maximizar la generación sujeta a las restricciones de porcentaje de penetración de energías renovables impuestas por la Unión Europea como parte de la estrategia del Protocolo de Kioto para reducción del efecto invernadero. La función objetivo se maximiza sujeta a restricciones, tales como: la corriente en las líneas no debe exceder su capacidad máxima, la cantidad de generación no debe exceder el rango de los transformadores a su rango de voltaje más alto, la capacidad de cortocircuito no debe exceder los niveles de capacidad de los equipos, el rango de cortocircuito de los generadores debe de estar de acuerdo al nivel de cortocircuito de los buses cercanos a cada generador, la potencia del generador en el bus donde se instale debe ser menor que la potencia disponible del recurso y mayor a la potencia instalada. Para determinar la localización óptima de la Generación Distribuida se utiliza programación lineal. Un método para regular la tensión en una red de distribución

radial con la instalación de Generación Distribuida es presentado por Kim y Kim en el año 2001. Es utilizado un compensador para la caída de tensión en las líneas de interconexión entre la red de distribución y la Generación Distribuida, el cual permite mantener la tensión dentro de niveles previamente establecidos operando el cambiador de taps del transformador principal. El nivel de tensión de cada sistema de Generación Distribuida puede ser controlado en forma autónoma y descentralizada para llevar a cabo la coordinación del sistema de regulación de tensión del sistema completo de distribución.

Dicorato [10] utilizan el modelo de flujo de cargas óptimo, basado en programación lineal para evaluar la contribución de producción y eficiencia de Generación Distribuida. La función objetivo a optimizar (minimizar) incluye costes debidos a la producción de energía en presencia de restricciones técnicas y de políticas energéticas.

Chaturvedy en el año 2005, presenta un algoritmo genético adaptativo fuzzy como una posible implementación para cualquier sistema de distribución tipo radial. El algoritmo es desarrollado en tres etapas. La primera etapa comprende una apropiada localización y dimensionamiento de las subestaciones utilizando flujo de cargas, que permiten conocer las tensiones en los nudos y las pérdidas totales de potencia activa y reactiva. En la segunda etapa son utilizadas reglas heurísticas basadas en los resultados de la simulación del flujo de cargas de la etapa primera, un apropiado número de líneas y sus correspondientes nudos son encontrados. En la tercera etapa la reconfiguración de la red es obtenida de manera que la estructura general permanece radial y todos los nudos están energizados. Un plan de minimización de pérdidas y un plan de minimización de coste son utilizados para minimizar las pérdidas de potencia activa y lograr un costo mínimo que incluye el costo de inversión y el costo variable.

Nara [11] aplica la técnica de Búsqueda Tabú para encontrar la localización óptima de generadores distribuidos desde el punto de vista de minimización de pérdidas. El propósito de esta investigación es únicamente proveer información acerca del tamaño y correcta localización de la Generación Distribuida, para saber la cantidad de pérdidas que se lograrían reducir. Se asume que el tamaño y la cantidad de los generadores son conocidos, así como las características de las cargas, las cuales están distribuidas en forma uniforme a lo largo del sistema de distribución.

Asakura et al. [12] presenta un método para la planificación de la expansión de la generación, reconfigurando la red y construyendo nuevas plantas de generación. El método considera un crecimiento natural de la demanda e instalación de clientes mayores. El

método primeramente trata de reconfigurar el objetivo de la red haciendo “switcheo” (abierto/cerrado). para minimización de pérdidas y analizando la seguridad de la red por medio de un análisis de contingencias. Si las restricciones de operación son violadas cuando la red es reconfigurada, entonces el método intenta la construcción de plantas de generación candidatas.

Atwa, El - Saadany [13] presentan un modelo para la localización óptima de sistemas de almacenamiento en un sistema de distribución donde hay una gran penetración de generación eólica. La metodología propuesta se basa en el almacenamiento de la energía producida excedente por los generadores eólicos, lo cual sirve para minimizar el coste de energía anual. La meta del almacenamiento de energía para este sitio es buscar el beneficio económico para los propietarios independientes, así que deben dimensionar apropiadamente la cantidad de energía excedida de los generadores eólicos para que sea almacenada. Métodos de predicción de la demanda y de generación eólica son utilizados para conocer con cierta precisión tanto la demanda como el suministro de energía producido anual.

Soroudi y Ehsan [14] presentan un modelo multiobjetivo dinámico para expansión de la red de distribución, considerando Generación Distribuida. El modelo optimiza simultáneamente dos objetivos, costes totales y satisfacción de restricciones técnicas con esquemas óptimos de dimensionado, localización y especialmente inversiones dinámicas de unidades de Generación Distribuida y/o reconfiguración de la red sobre el periodo de planificación. Un método de búsqueda heurística es propuesto para encontrar las soluciones no dominadas del problema formulado y un método fuzzy es utilizado para seleccionar la solución final.

### **1.5 Alcances**

En el presente trabajo se aborda el tema de la aplicación de la Generación Distribuida, poniendo énfasis en sus efectos desde el punto de vista técnico en cuanto a la calidad de energía eléctrica se refiere, analizando sus beneficios y ventajas. Asimismo se plantea su posible aplicación en el Perú, donde se tiene los primeros indicios del uso de la energía renovable pero no se ha hecho un estudio formal de la aplicación de la Generación Distribuida para evaluar sus ventajas.



## **CAPÍTULO II**

### **GENERACIÓN DISTRIBUIDA**

#### **2.1 Concepciones de la Generación Distribuida**

Si bien se podría definir a la Generación Distribuida como el conjunto de generadores conectados a las redes de baja y media tensión, no existe una definición universalmente aceptada de la misma. No obstante se asocia a la generación distribuida ciertas características generales tales como: no son resultado de un planeamiento centralizado, ni son despachadas centralizadamente; normalmente son de potencias inferiores a 50MW y usualmente conectadas directamente al sistema de distribución

El desarrollo de nuevas centrales eléctricas pequeñas que se conectan al Sistema Eléctrico significa un cambio en el paradigma de la generación de energía eléctrica centralizada.

Varias tecnologías están disponibles para la GD, incluyendo los generadores de turbina, motor de combustión interna, turbinas micro, fotovoltaica y paneles solares, turbinas de viento, y las pilas de combustible. La aplicación de tecnologías de energía renovable está avanzada en sistemas de generación distribuida, se presagia el avance más significativo en la eficiencia energética, la conservación y protección del medio ambiente para la próxima década.

##### **2.1.1 Aplicación en Sistemas de Potencia**

La Generación Distribuida incluye la aplicación de pequeños generadores, repartidos por todo un sistema de energía de potencia y ubicados muy cerca de la carga, para proporcionar la energía eléctrica que necesitan los clientes eléctricos, eliminando las pérdidas por transmisión y la congestión en las líneas, mejorando los perfiles de tensión entre otros beneficios.

Es la generación de energía eléctrica a pequeña escala cercana a la carga, ubicándolos mediante el empleo de tecnologías eficientes (optimización), existen muchas fuentes de generación distribuida destacando la cogeneración, generación eólica, a gas, solares, celdas de combustión, etc.

##### **2.1.2 Aplicación en Redes de Distribución**

La generación distribuida se utiliza Redes de Distribución para dar el suministro a las distintas edificaciones de fuente fotovoltaica ajuntada a cada edificación.

A medida que el mercado de la energía se va reestructurando en un significado más competitivo, muchas compañías de energía están considerando su instalación en generación distribuida, La generación distribuida en pequeñas escalas de generación de potencia es usualmente conectada a la distribución del sistema y podrían ser accionados con los generadores micro turbinas, cogeneración, producción combinada de calor y electricidad (CHP), con pilas de combustible, con turbinas eólicas, paneles solares y otras "cómo desperdiciables fuentes de energía".

La G.D. se puede instalar en el sistema de distribución de una Red eléctrica para mejorar la confiabilidad por:

- La Adición de la capacidad de generación en el sitio del cliente para brindar potencias continuas y suministro de seguridad.
- Adición de capacidad en el Sistema de generación.
- La liberación adicional de la generación del sistema, la transmisión y capacidad de distribución.
- El alivio de transmisión y distribución de los cuellos de botella.
- El apoyo del sistema de potencia es mantenido y las operaciones de restauración con la generación de potencia de la reserva temporal.

Pero la GD en el sistema de potencia va a cambiar la estructura de la red y tiene un gran impacto en tiempo real y la planificación de sistemas de potencia tradicionales. Se aumenta la complejidad para el control, protección y mantenimiento de los sistemas de distribución. La conexión de la Generación Distribuida a las partes vulnerables de la red de potencia, incrementará los niveles de falla, induce las variaciones de voltaje, la red de estabilidad transitoria se degrada y, dependiendo del tamaño relativo de la planta y las cargas locales, se revierte el flujo de potencia y aumentan las pérdidas. En el estado de equilibrio, transitorias variaciones lentas de los niveles de tensión relacionados con la conexión de una GD puede llevar a un funcionamiento no deseado del equipo de control de tensión en los transformadores en las subestaciones de la red primaria. Una inversión neta o el incremento del flujo de potencia en la línea debido a la presencia o la pérdida, respectivamente, de una GD pueden causar fluctuaciones de voltaje intolerable. El operador de la Red de Distribución que luego pide la GD de desconectar y puede arrojar una parte de la entera carga local.

### **2.1.3 Aplicación en Redes de Electrificación Rural**

Los cambios en las esferas económica y comercial de un diseño de sistemas y operación han necesitado considerar necesario la GD en distribución rural y la incorporación activa de fuentes de generación en redes pequeñas. Los sistemas de distribución de generación tienen la posibilidad de utilizar e integrar fuentes energía renovable. Que son abundantes en las zonas rurales y podría ser más económico. Viable alternativa al refuerzo de la red Rural y resulta necesario estudiar los efectos de dichas fuentes de generación en el rendimiento de un suplemento de generación en sistemas rurales existentes. En términos de niveles voltaje y eficiencia del sistema, se haya demostrado un aumento de carga de hasta 200% con la conexión de pequeñas fuentes de generación en varias barras de carga. Es posible mantener los niveles de tensión de barras por encima de 0.95 pu. a la carga nominal de cada transformador y alcanzar un sistema operativo de una eficiencia global de alrededor del 97% [16].

### **2.1.4 Aplicación en Sistemas Eléctricos Aislados**

Con el fin de satisfacer las necesidades energéticas en sistemas eléctricos aislados y la reducción de la contaminación, las aplicaciones con las tecnologías limpias de energía renovables, como la energía fotovoltaica (PV) y la energía eólica, se han desarrollado enérgicamente a lo largo de la última década en áreas remotas deficiente de energía. Sin embargo, un importante banco de almacenamiento de energía de batería es obligado a entregar una potencia fiable a la carga y extraer la máxima potencia de las matrices PV o turbinas de viento desde cualquiera de los dos tiene un carácter intermitente. La energía fotovoltaica y la energía eólica son complementarias, y a los días soleados suelen ser tranquilas y los vientos fuertes a menudo ocurren en los días nublados o de noche. La combinación de una unidad de energía fotovoltaica con una unidad de energía eólica se reducirá la potencia intervalos de cero. Por lo tanto, un viento-PV de energía del sistema híbrido tiene una mayor disponibilidad para ofrecer potencia continua de cualquiera de las fuentes individuales y por ello requiere menos dispositivos de almacenamiento de energía. La generación distribuida es una fuente de energía eléctrica a pequeña escala conectado directamente a la red de distribución y en el sitio del cliente.

La generación distribuida (GD) con estas tecnologías pueden ofrecer a los clientes soluciones de energía que son de mayor eficiencia de costos, más respetuosos del medio ambiente, o proporcionar la más alta calidad de la energía o la confiabilidad que las soluciones convencionales, y proporciona energía eléctrica a un sitio más cerca de los

clientes que la generación estación central. La premisa de la GD es proporcionar electricidad a los clientes a un costo reducido y una mayor eficiencia y reducir las pérdidas que la generación de planta de servicios centrales tradicionales con los cables de transmisión y distribución. Otros beneficios que la GD puede reducir la demanda pico de cargas y el uso global de energía. Además, el potencial para los pequeños usuarios, tales como complejos de viviendas y edificios de oficinas para cambiar la potencia en el sitio también es alto.

En consecuencia, es una buena solución para las zonas remotas deficientes de energía adoptar PV-energía eólica en un sistema de la GD de la formación de un híbrido de energía renovable sistema distribuido de generación (HREDG), que posee méritos de ambos, un sistema de direcciones generales y un sistema de energía renovable. Con el fin de poner en práctica tal sistema de energía renovable híbrido, varias entradas de una sola salida de los regímenes de dos se han propuesto una doble entrada y salida del convertidor-single-PV desarrollado para la generación de energía eólica combinada del sistema es descrito en [15]. El generador fotovoltaico y la turbina eólica se conectan en serie y cada uno de ellos tiene la misma valoración actual. Si una de las fuentes de corriente continua se ve disminuida, será muy difícil obtener la salida de tensión regulada ya que la variación de voltaje de entrada es importante. En [7], utilizando el transformador de alta frecuencia, el circuito tiene los méritos de aislamiento eléctrico. Además, una de dos entradas de corriente alimentada puente completo convertidor DC / DC con el pulso en diferido fase de modulación de ancho de pulso (PWM) de control se puede lograr poder ofrecer una visión posible combinar la energía de diferentes fuentes en un circuito de alta frecuencia aislados. Es necesario una multi-entrada de corriente continua o convertidor de corriente continua, que no sólo tiene capacidad para combinar diferentes fuentes de energía renovables en un circuito con un transformador de alta frecuencia, pero también tiene una ruta de almacenamiento de la batería para garantizar la sustitución de energía constante para cargas o red en los días de déficit de energía solar y eólica. De acuerdo con el objetivo, el desarrollo sistemático de cuatro direcciones de alta frecuencia aislado para el convertidor independiente del viento PV de energía del sistema híbrido.

## **2.2 Planeamiento de la Generación Distribuida**

Modernamente el planeamiento de la generación distribuida se desarrolla con la teoría basado en los algoritmos genéticos, algoritmos para el óptimo tamaño de las generadoras y ubicación de recursos de generación distribuida en redes eléctricas de diferentes niveles de

tensión.

En los últimos años el interés de los investigadores y empresas de servicio público, respecto a la generación distribuida ha crecido debido a las mejoras de algunas tecnologías establecidas, así la baja tasa de potencia de tales plantas de generación permite su instalación rápida en alguna barra en redes de distribución de MT y BT; por lo tanto la elección de la ubicación optima y el tamaño de distribución es un desafío para los ingenieros de planeamiento.

Debido a la naturaleza combinatoria del problema y de la diferenciación de la función objetivo este proceso de optimización implica una gran cantidad de onerosos cálculos y un gran tiempo de cálculo computacional utilizando los tradicionales enfoques tales como ramas y obligaciones o procedimientos heurísticos.

Por eso los algoritmos genéticos (AG) han sido adoptados con el fin de superar algunos límites de los tradicionales procedimientos. Los algoritmos genéticos son capaces de alcanzar una buena solución (con muy alta probabilidad para ser el mejor) por un número finito de evolucionados pasos realizados sobre un conjunto de posibles soluciones.

La Generación distribuida (GD) es el uso de pequeños conjuntos de generadores, conectados a las redes de alimentación de potencia tales como los motores de combustión interna, las micro y pequeñas turbinas de gas, pilas de combustible, la energía fotovoltaica y las plantas a viento.

Desde un punto de vista técnica y económica, las ventajas de generación distribuida son las siguientes: las plantas de energía pueden ser configuradas modularmente, programas de construcción más cortos que permiten que el desarrollo de las plantas con la suficiente rapidez para reaccionar a las fluctuaciones en el mercado o crecimiento de máxima carga demandada, menos emisiones contaminantes con respecto a las plantas tradicionales, posible instalación de grupos electrógenos cerca de los centros de carga, la posibilidad de explotar cogeneración (producción combinada de calor y electricidad).

Los algoritmos genéticos (AGs) es una herramienta eficaz para resolver problemas de optimización. Ellos siguen una estrategia evolutiva a partir de una población individual de individuos, cada uno representando una posible solución, el proceso de evolución modifica, por medio de los operadores adecuados, la población, a fin de formar la próxima generación hasta que un criterio de convergencia este cumplido, la solución se recupera del mejor individuo de la última población. AGs puede determinar fácilmente el óptimo de cualquier función objetivo aunque las variables son discretos o si sus derivados no están

definidos.

### **2.3 Ubicación Óptima de la Generación**

Recientemente varios tipos de generación distribuida (GD) se están haciendo disponibles y se espera que crecerá en los próximos años. La GD incluye la aplicación de pequeños generadores, repartidos por todo un sistema de energía, para proporcionar la energía eléctrica que necesitan los clientes eléctricos, tiene varias virtudes desde el punto de vista de la restricción del medio ambiente y las limitaciones de ubicación, así como transitorios y de estabilidad de tensión en el sistema eléctrico.

La solución exacta de la asignación de la GD se puede obtener una enumeración completa de todas las combinaciones factibles de sitio y el tamaño de las GDs en las barras de media tensión, lo que podría conllevar a un número muy grande, mientras que el flujo de carga se ejecuta para cada combinación posible. Sin embargo, la alta dimensión de la solución posible es la verdadera dificultad en la solución del problema.

Las técnicas de inteligencia artificial han llegado a ser el instrumento más utilizado para resolver numerosos problemas de optimización. Estos métodos (por ejemplo, algoritmos genéticos, recocido simulado y búsqueda tabú) parecen ser prometedores, siguen evolucionando. Los algoritmos genéticos (AG) se han convertido cada vez más popular en los últimos años en materia de ciencia y de ingeniería. Algunos trabajos han sido publicados que cubre la solución de la asignación de la GD mediante AG. Búsqueda Tabú (TS) es un procedimiento de optimización de gran alcance que ha sido aplicado con éxito a una serie de problemas de optimización combinatoria. Tiene la capacidad para evitar quedar atrapado en mínimos locales mediante el empleo de un sistema de memoria flexible.

### **2.4 Comparación entre Generadores Síncronos y Máquinas de Inducción en Generación Distribuida**

A continuación se presenta un breve análisis comparativo entre las máquinas síncronas y de inducción para aplicaciones de generación distribuida.

Los impactos de estos generadores en el rendimiento de la red de distribución se determinan y se compararon mediante el uso de simulaciones computacionales. Los factores técnicos analizados son en régimen de operación en estado estacionario, las pérdidas de energía eléctrica, estabilidad de voltaje, estabilidad transitoria, caídas de voltaje desequilibrado, fallas, y corrientes de corto-circuito. Los resultados mostraron que la mejor opción técnica depende de las características de la red; es decir, los principales

factores que podrían limitar el nivel de penetración de la generación distribuida.

Recientemente, el interés en la generación distribuida ha aumentado considerablemente debido a la desregulación del mercado, avances tecnológicos, los incentivos gubernamentales, y el medio ambiente preocupaciones de impacto. En la actualidad, la mayoría de instalaciones de generación distribuida emplea máquinas de inducción y síncronos, que se puede utilizar en térmica, hidráulica, eólica y la generación de plantas [17]. Aunque estas tecnologías son bien conocidas, hay no hay consenso sobre cuál es la mejor elección, en una amplia gama de técnicas perspectiva.

Con base en estos hechos, es importante entender los diferentes los impactos provocados por esta opción en varias técnicas factores. En esta parte se presenta resultados de la comparación teniendo en cuenta distintas escenarios y factores técnicos. Los factores analizados son en estado estacionario, perfil de la tensión, las pérdidas de energía eléctrica, estabilidad de voltaje, estabilidad transitoria, huecos de tensión durante las fallas no balanceadas, y las corrientes de cortocircuito.

Los resultados pueden ser una guía útil para los ingenieros técnicos de utilidad, y los productores de energía decidir qué máquina es más adecuada, teniendo en cuenta las principales características de su red.

#### **2.4.1 Los Generadores Síncronos**

En la actualidad, la mayoría de los sistemas de generación distribuida emplean generadores síncronos, que puede ser utilizado en térmica, hidráulica o plantas de energía eólica. En las simulaciones de transitorios electromagnéticos. Por lo general, los generadores síncronos conectados a las redes de distribución se gestionan como activa y constante fuentes de energía, de modo que lo hacen sin tomar parte en el sistema de frecuencia de control. Por lo tanto la potencia mecánica se considera constante, es decir, el regulador de velocidad y fuerza y la dinámica no se consideran. Por otra parte, típicamente, hay dos modos diferentes de controlar el sistema de excitación de generadores sincrónicos distribuidos. Uno tiene como objetivo mantener constante la tensión en bornes (modo control de voltaje), y el otro apunta a mantener constante el factor de potencia (modo de control de factor de potencia) [18].El modo de control de factor de potencia es generalmente adoptadas por los productores independientes para maximizar la producción de potencia activa. En consecuencia, el funcionamiento del factor de potencia unitario que se adopte. En los casos del regulador de voltaje, el controlador de punto de ajuste se fija en 1 pu.

#### **2.4.2 Los Generadores de Inducción**

Aunque la mayoría de los generadores de inducción en la operación se emplean en plantas de energía eólica [19], estas máquinas también se han utilizado en medianas hidroeléctricas y centrales térmicas. Por lo tanto, con el fin de mantener los resultados lo más genéricas posible, el par mecánico se considera constante, es decir, el regulador y la dinámica de velocidad y fuerza se desprecian. El generador de inducción de jaula de ardilla del rotor es representada por un modelo de sexto orden en los estudios de transitorios electromagnéticos, que es reducida por un modelo de cuarto orden en la transitoria simulaciones de estabilidad.

## **2.5 Generación Distribuida con Energía Renovable**

La tendencia en generación distribuida es utilizar la energía renovable, destacando entre ellas la generación eólica, solar fotovoltaica, biomasa y también micro turbinas a gas.

### **2.5.1 Generación con Micro turbinas a Gas**



Fig. 2.1 Micro turbina de 80 kW[30]

Son turbinas de combustión con potencias en el rango de 20-500kW, desarrolladas a partir de la tecnología de los turbo soplantes de la industria automovilística y los pequeños turborreactores de la industria aeronáutica. Están constituidas por un compresor, una turbina, un recuperador y un generador, generalmente montados en un único eje. Sus principales ventajas son el número escaso de partes móviles, su tamaño compacto, su gran variedad de tamaños y una menor emisión de ruidos y emisiones que una turbina de gas. Su principal desventaja es su alto coste. En la Figura 2.1 se muestra una foto de una microturbina de 80kW.

Permiten dos modos de funcionamiento:



- Con recuperador de calor, que permite transferir parte del calor de los gases de escape al aire de entrada al compresor, aumentando su temperatura y permitiendo una sustancial mejora de la eficiencia eléctrica de la microturbina que puede llegar a rendimientos en el entorno de 27-30%.
- Sin recuperador de calor, en aplicaciones de cogeneración, donde la utilización del calor residual prima sobre la producción de electricidad. En este caso, la eficiencia eléctrica disminuye a un 15-18%, pero el rendimiento total puede ser del orden de un 80%.

Las microturbinas pueden emplearse de diversas formas:

- a) Como energía de respaldo.
- b) Para satisfacer picos de demanda.
- c) En sistemas híbridos con celdas de combustible.
- d) En vehículos eléctricos híbridos.

Las microturbinas tienen cuatro modos distintos de operación: aislado de la red eléctrica, conectado a la red, en paralelo con exportación de energía, y de modo continuo o intermitente a la misma.

Sus principales características son: rango de 15 kW a 300 kW en una sola unidad; frecuencia de 1,600 Hz; mantenimiento mínimo; sus unidades ocupan muy poco espacio; son ligeras; operan sin vibración, prácticamente no hacen ruido; operan de 40,000 a 75,000 horas continuas y pueden utilizar como combustible, además del gas natural, el kerosene, gasolina, etanol, diesel, propano, y biomasa. Una de sus principales características es la reducción de emisiones contaminantes: 9 partes por millón (p.p.m.) de NO<sub>x</sub>, 40 p.p.m. de CO y emisiones totales de hidrocarburos por debajo de las 9 p.p.m.

### **2.5.2 Generación con Biomasa**

La fuente denominada como biomasa consiste en el aprovechamiento de elementos provenientes del reino vegetal o animal para la producción de energía eléctrica o térmica. En última instancia su origen es el sol, que permite a las plantas realizar la fotosíntesis para formar sustancias orgánicas a partir de complejos simples, sirviendo de base para las cadenas tróficas. Es una fuente de energía que se conoce y utiliza desde antiguo (leña) y cuyo uso desmedido acarrea problemas como la deforestación, desertización, reducción de la biodiversidad. Sin embargo, utilizada de modo sostenible, presenta ventajas interesantes. La primera de ellas es que tiene un saldo neto casi nulo de emisiones de CO<sub>2</sub>, puesto que la cantidad liberada es la misma que fijan las plantas. La segunda ventaja es que es un recurso

renovable y por lo tanto local; según el uso que se quiera hacer, es posible aprovechar residuos forestales (como cáscaras de coco) del propio emplazamiento ahorrando el transporte. Y la tercera es que, al contrario que otras fuentes renovables, el almacenamiento presenta menos problemas ya que puede hacerse en fase gaseosa, líquida o sólida y no necesita baterías o acumuladores.

Actualmente, la tecnología para aprovechamiento de la biomasa no está tan avanzada como para aplicarse en un proyecto grande. Existen diferentes tipos o fuentes de biomasa que pueden ser utilizados para suministrar la demanda de energía a instalación de diversas maneras (gasificación, combustión directa; etc.). Una de las clasificaciones posibles es la siguiente:

**Biomasa natural:** es la que se produce espontáneamente en la naturaleza sin ningún tipo de intervención humana, por ejemplo, los residuos de las podas naturales de un bosque.

**Biomasa residual seca:** se incluyen en este grupo los subproductos sólidos no utilizados en las actividades agrícolas, forestales, industrias agroalimentarias, etc. Por ello son considerados residuos. Algunos ejemplos de este tipo de biomasa son la cáscara de almendra, el orujillo, las podas de frutales, el aserrín, bagazo de caña de azúcar, etc.

**Biomasa residual húmeda:** son los vertidos denominados biodegradables: las aguas residuales urbanas e industriales y los residuos ganaderos (principalmente purines).

**Cultivos energéticos:** son cultivos realizados con la única finalidad de producir biomasa transformable en combustible. Algunos ejemplos son el cardo (*cynaracardunculus*), el girasol cuando se destina a la producción de biocarburantes, el miscanto, etc.

**Biocarburantes:** aunque su origen se encuentra en la transformación tanto de la biomasa residual húmeda (por ejemplo reciclado de aceites) como de la biomasa residual seca rica en azúcares (trigo, maíz, etc.) o en los cultivos, patata, etc.), por sus especiales características y usos finales este tipo de biomasa exige una clasificación distinta de las anteriores.

En los países más desarrollados existen tecnologías eficientes para realizar la gasificación solucionando además un problema como el de los purines de las explotaciones ganaderas intensivas. A esta escala la producción energética es económicamente rentable puesto que aprovecha recursos de valor nulo para generar electricidad, sin embargo, esta situación es diferente en los países en vías de desarrollo; allí no existen explotaciones ganaderas tan intensivas y el recurso está más disperso.

La biomasa permite generar energía térmica, eléctrica o incluso mecánica. Sus similitudes

con los combustibles fósiles la hacen sumamente versátil lo cual representa una ventaja importante. Sin embargo, habrá que valorar sus límites en cuanto a recurso y explotación sostenible.

Una sobreexplotación del recurso de la biomasa puede ser muy perjudicial para el medio ecológico y económico-social por lo que hay que tomar medidas en ese aspecto.

Las ventajas de la biomasa como recurso energético son muchas, pero describiremos las más importantes que en este caso son la ambiental y la socioeconómica, ya que a diferencia del recurso eólico o solar esta presenta una gran ventaja ya que su recurso puede ser predecible a contrariedad de las otras tecnologías de la GD.

- Una de las ventajas ambientales de la biomasa es que prácticamente todo el CO<sub>2</sub> emitido en su utilización ha sido previamente fijado en el crecimiento de la materia vegetal que la había generado, por lo que, en global, no contribuye al incremento de su proporción en la atmósfera y, por tanto, no es responsable del aumento del efecto invernadero.
- Los contenidos de azufre son prácticamente nulos, generalmente inferiores al 0.1%. Por este motivo, las emisiones de dióxido de azufre, que junto con las de óxidos de nitrógeno causantes de la lluvia ácida son mínimas.
- El uso de biocarburantes en motores de combustión interna supone una reducción de las emisiones generadas (hidrocarburos volátiles, partículas SO<sub>2</sub> y CO).
- La ventaja socio-económica primordial de la utilización de la biomasa, contribuye a la emancipación energética, siendo por tanto menos dependientes del precio del combustible fósil y sus derivados.
- El aprovechamiento de algunos tipos de biomasa (principalmente la forestal y los cultivos energéticos) contribuyen a la creación de puestos de trabajo y por tanto actúan generando oportunidades de riqueza para más gente.

Entre las potenciales desventajas de la utilización de biomasa como energía alternativa, surgen las siguientes:

- Los rendimientos de las calderas de biomasa son algo inferiores a los de las que usan un combustible fósil líquido o gaseoso.
- La biomasa como tal posee menor densidad energética, o lo que es lo mismo, para conseguir la misma cantidad de energía es necesario utilizar más cantidad de recurso.
- Los sistemas de alimentación de combustible y eliminación de cenizas son más

complejos y requieren unos mayores costes de operación y mantenimiento (respecto a los que usan combustible fósil líquido o gaseoso). No obstante, cada vez existen en el mercado sistemas más automatizados que van minimizando este inconveniente.

### **2.5.3 Generación Solar Fotovoltaica**

La generación distribuida se utiliza en Redes de Distribución para dar el suministro a las distintas edificaciones de fuente fotovoltaica ajuntada a cada edificación. Las edificaciones también están conectadas a la red y toman electricidad del suministro de la red cuando la demanda excede la salida fotovoltaica o del alimentador eléctrico a la red cuando la producción supera la demanda fotovoltaica. Esto debería ser notado en el precio de la electricidad con lo cual los generadores fotovoltaicos deberían competir siendo el precio al por menor, como generación distribuida evita la compra de la electricidad, el precio pagado por la utilidad de la electricidad exportada a la red depende de reglamentos gubernamentales en algunos países o en negociaciones entre propietarios de las edificaciones y la utilidad en edificios con la generación distribuida fotovoltaica tienen medidores que registran solo la importación neta de electricidad desde la red, es decir las exportaciones se acreditan con el mismo precio por kWh igual que las importaciones. El mejor programa para generación distribuida es el proyecto alemán de techo 2000, donde un promedio de alrededor de 3kWp ha sido instalado en los techos de más de 2000 casas. El programa suizo también tiene una fracción importante de las instalaciones en los techos nacionales. Sin embargo hay una discrepancia considerable entre la demanda interna y producción de electricidad fotovoltaica lo cual podría causar problemas importantes para servicios públicos si la energía fotovoltaica llegaría ser muy ampliamente usada.

En el Perú existe una propuesta de inversión por parte de la empresa concesionaria EDELNOR para implementar este tipo de electrificación en la zona de Lima Metropolitana, pero aún está en estudio.

En latitudes más altas, el bajo promedio del ángulo del sol, particularmente en invierno, hace el uso de la energía fotovoltaica como un revestimiento de la pared muy atractivo. La orientación vertical reduce la larga proporción de salida verano/invierno y cuando se aplica a edificios comerciales hay un razonable buen partido entre la demanda (principalmente durante horas de trabajo) y la producción de energía fotovoltaica. Los módulos fotovoltaicos (PV) hacen dos trabajos: primero, ellos actúan como un revestimiento para el edificio, el cual puede ser valuado entre 100- 1000 dólares/m<sup>2</sup>;

segundo, solo ellos generan electricidad y el resto de la instalación fotovoltaica es el costo con cargo a la generación de electricidad. Si el total de los costos del sistema fotovoltaico se reduce a 1000 dólares/m<sup>2</sup> y PV sustituye un convencional coste de revestimiento de 1000 dólares/m<sup>2</sup>, luego la electricidad sería un libre producto del revestimiento de la energía fotovoltaica. Recientemente estudios realizados de energía fotovoltaica en edificios comerciales en Inglaterra sugieren que un precio de módulo de 1.5 Euros/Wp-1 permitiría que la electricidad que se genere a un costo aproximadamente igual al precio de la venta actual, si los módulos fotovoltaicos sustituyen medio intervalo de periodo.

La gran ventaja de generación distribuida para edificios es la gran área que podría abarcar sin el empleo de alguna zona terrestre adicional. Un típico centro comercial de la ciudad podría generar un promedio anual cerca de 10MW por kilómetro cuadrado de la superficie terrestre, más en climas soleados, por lo que el total de recursos es muy grande. Cuanto menor sea la latitud, eso se convierte en el más beneficioso de energía fotovoltaica en techos y paredes, porque de los grandes ángulos del sol, pero la superficie de los techos en la mayoría de ciudad y zonas comerciales de la ciudad también es grande dando la probabilidad de una gran capacidad de generación distribuida.

Este mercado es probablemente cercano a la realidad y que en algunas situaciones en la actualidad se convertirá muy grande a principios del próximo siglo.

El sistema fotovoltaico no obstante tiene características de planta de carga base, alto costo de capital pero bajos precios de operación, así que debe ser que garantice el uso de toda la producción que puede dar.

A medida que más plantas se añaden en un sistema de servicios público, la producción de la energía fotovoltaica se llena más y más del pico de carga, finalmente empezar a competir con los generadores de la carga base. La planta fotovoltaica está compitiendo así contra las diferentes clases de plantas generadoras convencionales; por lo que la fracción de PV de la capacidad total se eleva, y los costos de la electricidad a partir de PV deben de bajar al competir con estas diferentes plantas. El mercado de las estaciones centrales PV así pues, primero se selecciona áreas por el pico de la carga máxima, y como los costos de PV caen este será capaz de competir para una mayor participación por una mayor parte del día los picos de carga en un gama más amplio de utilidades.

Zonas turísticas y otros servicios recreativos suelen incrementar un gran aumento en la demanda de electricidad durante los meses de verano, y una central de planta fotovoltaica podría ser un componente útil de su capacidad de generación. Incluso podría ser una

atracción turística en sí misma. Excepto en áreas donde cielos despejados son la norma, ingenieros de servicios públicos preocupados acerca de la incorporación de una fuente el cual es variable entre tal vez 100% y el 10% de la producción máxima en escalas de tiempo de segundos hacia arriba, plantas PV son usualmente las que un factor de capacidad de alrededor del 20% de la producción nominal de placa y de las comparaciones de costo realizadas en esta base. Todos estos datos se basan en mediciones solares en un punto, los datos de irradiación solar es efectivamente la salida de un solarímetro. Sin embargo, la entrada a la red de un gran número de plantas muy dispersadas que presentan características muy diferentes. La producción media de la planta fotovoltaica en lugares más dispersos geográficamente es probable que sea mucho menos variable y su variación tiene plazos de minutos en lugar de segundos. Esto por lo tanto debería ser mucho más fácil para la red de suministro eléctrico para responder sin transitorios peligrosos y el uso de una fracción de la capacidad de PV no debería causar inestabilidades en la red de funcionamiento. Los datos sobre contribuciones solares promedio durante una amplia zona geográfica, y la variabilidad de esta media no parece ser disponible en la actualidad. Estas mediciones se efectuaron durante varios años para permitir el análisis estadístico bueno como parte de la estrategia de marketing para la venta a empresas de servicios.

Las utilidades también tienen preocupaciones sobre la influencia de un gran número de sistemas fotovoltaicos de suministro de energía en sus redes. Esto es esencial para estudiar la influencia de estos generadores distribuidos en la estabilidad y seguridad de la red de distribución.

Hacia el año 2016, el mercado de conexión de red se convertirá en un mercado comercial real, pero de un tamaño y un crecimiento que en un principio al menos, refleje las decisiones políticas de los próximos 10 años.

#### **2.5.4 Generación Eólica**

La generación de la turbina de viento (GE) se ha desarrollado últimamente, para convertirse en la más competitiva en términos de costo de energía generado. Actualmente, el costo de energía de GE está bajando en casi todo el mundo, tales como Alemania, Estados Unidos, España, Dinamarca y la India donde todavía dominaba la producción energética eólica en el mundo.

La GE genera energía eléctrica convirtiendo la energía cinética del viento en salida mecánica rotatoria y entonces a la energía eléctrica de CA.

La turbina puede operar de tres modos: de velocidad constante con el control activo, casi

de velocidad constante, y la velocidad-variable. Actualmente, la tendencia de las turbinas de viento en su funcionamiento está en el modo de la velocidad-variable. Los objetivos principales de este modo de operación son optimizar su eficacia maximizando captura de la energía y al mismo tiempo reducir dramáticamente las variaciones de tensiones.

Por su naturaleza, el viento es altamente variable. La geografía del sitio es muy importante porque la salida de energía y la producción energética anual son fuertemente dependientes en el régimen del viento predominante.

Varios factores incluyendo velocidad del mal viento, la variación, y la velocidad del viento máxima tienen que considerarse cuidadosamente antes de determinar el tipo de sistema conveniente para un sitio particular.

### Descripción del sistema

Se considera un sistema de distribución radial simple según se ilustra en la Figura 2.2 y un sistema de generación eólica asociado en la Figura 2.3.

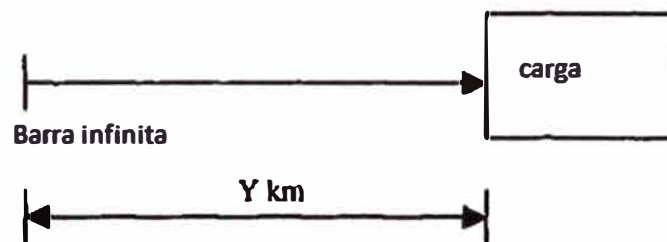


Fig. 2.2 Sistema de distribución radial con generación eólica

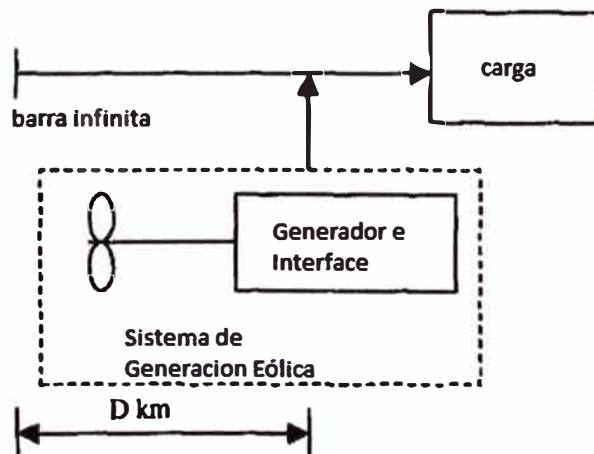


Fig. 2.3 Esquema de un sistema de distribución radial con Generación Eólica

Las asunciones siguientes se hacen en generación Eólica:

- 1) La carga absorbe energía con un cierto factor de energía especificado.
- 2) La carga está conectada en Y; la corriente de línea es igual que corriente de la fase;  $I_L = I_p$ .
- 3) El voltaje de la fase en RMS y el fasor de referencia esta contra la barra infinita.

- 4) Se desprecia la resistencia de línea; solamente la reactancia de línea se considera en la línea modelo.
- 5) La salida de energía clasificada del Generador Eólico es de carga mínima.
- 6) El Generador Eólico inyecta potencia con el factor de potencia de la unidad.

### **2.5.5 Microturbina Hidráulica**

La forma más común de hidroelectricidad consiste en el aprovechamiento de la energía potencial al embalsar un río, debido a la diferencia de alturas se tiene agua a alta presión que es conducida hacia una turbina hidráulica desarrollando en la misma un movimiento giratorio que acciona un alternador donde se genera una corriente eléctrica.

Todas las plantas hidroeléctricas utilizan el agua pluvial como recurso renovable, sin embargo la construcción de grandes plantas hidroeléctricas, las que tienen una cortina de más de 15 m de altura, por lo general generan serios impactos ambientales y sociales debido a la gran superficie que ocupa el embalse y a la necesidad de reubicar a la población desplazada. Debido a estos inconvenientes ambientales y a los altos costos que implica el mitigar esos impactos la generación con grandes centrales hidroeléctricas es una opción a la que cada vez se recurre menos.

En cambio, las pequeñas centrales hidroeléctricas, debido a su menor tamaño, generan menos impactos ambientales y dado a sus beneficios sociales que incluye la prevención de inundaciones, la disponibilidad de agua para riego y uso doméstico, usualmente tienen una mejor aceptación social.

Según su capacidad instalada la generación a pequeña escala se divide en pequeñas centrales hidroeléctricas (mayores a 5 MW y menores a 30 MW), mini hidroeléctricas (entre 1 y 5 MW) y micro hidroeléctricas (menores a 1 MW).

En el caso concreto de la microturbina hidráulica, se distinguen porque son de baja potencia, inferiores a 1 MW. Sus beneficios son la poca contaminación ambiental, su nivel de mantenimiento mínimo y su rendimiento es superior al de las demás tecnologías de Generación Distribuida.

En lo que respecta a microturbinas hidráulicas, existen diversas configuraciones que brindan un aporte significativo a la hora de generar energía mediante esta tecnología de la generación distribuida. La modalidad de la microturbina hidráulica es de central de agua pasante y tiene la ventaja de no necesita obra civil ni tuberías forzadas lo que redundaría en un bajo costo y un menor impacto ambiental. Aprovechan el agua que fluye por el propio cauce del río o canal en el que están instaladas para producir la energía.



Otra de las modalidades de las microturbinas hidráulicas es la que se conoce como Central hidroeléctrica de palas de desplazamiento longitudinal. Esta central con palas de desplazamiento longitudinal, va dotada de flotadores que obligan a un determinado calado permanente de pala. Se genera la energía durante el recorrido de la pala a lo largo del aparato, 10 metros, con un área de 2 metros cuadrados. La potencia se ha analizado en un canal cuya forma es trapezoidal a velocidades de 1,13 m/s resultando una potencia activa de 25 kW. tal como se muestra en la Figura 2.4.

Por último, la modalidad de las microturbinas hidráulicas es la conocida como: Central hidroeléctrica de poco calado con ruedas de palas “alabes”. Esta disposición por su distribución ofrece la ventaja competitiva en su poco calado comparada con la anterior, de esta manera es adaptable a más emplazamientos. La potencia se ha analizado en una canal cuya forma es trapezoidal a velocidades de 1,13 m/s, el área de trabajo activo por pala es de 20,000 centímetros cuadrados. Resultando una potencia activa de 18 kW.

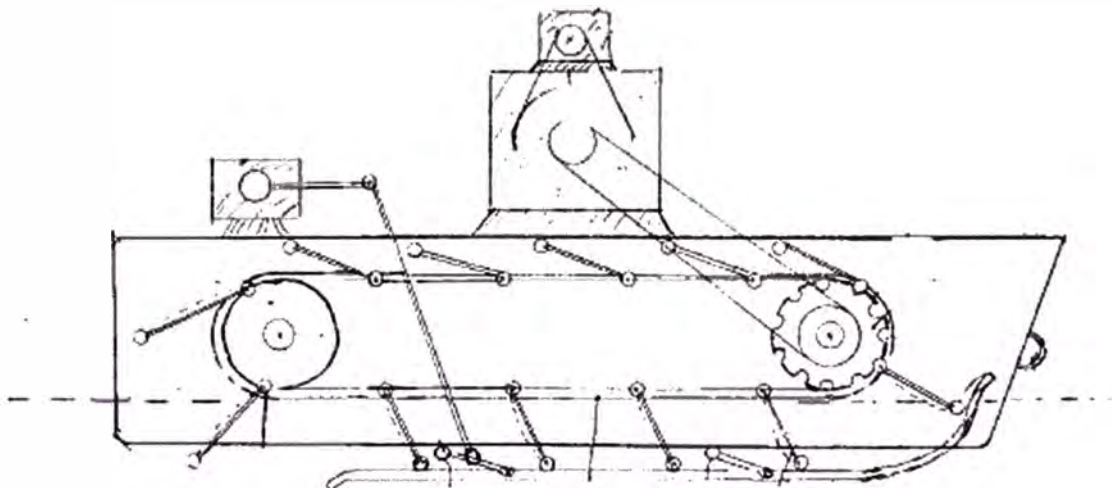


Fig. 2.4 Turbina microhidraulica en modalidad central de palas de desplazamiento.

Fuente [30]

Existen tres tipos de tecnologías de generación mini hidráulica:

- **Fluyentes** (poca diferencia de cota, mucho caudal, turbinas Franklin y tienen pocas posibilidades de regular la potencia de salida).
- **Media cota.**
- **Alta cota** (mucha diferencia de cota, poco caudal fácilmente regulable y turbinas Pelton).

Una planta hidráulica permite un arranque rápido, lo que la convierte en una tecnología adecuada para adaptarse a las variaciones de la demanda. Adicionalmente la posibilidad de

instalar grupos de bombeo que permiten elevar el agua durante los periodos de precios bajos de la electricidad para posteriormente turbinarla en periodos de precios altos, permite contar con un arma contra el riesgo ante el precio.

### 2.5.6 Cogeneración

Se llama "cogeneración" a la producción simultánea e integrada de energía eléctrica (o mecánica) y energía térmica, a partir de una misma fuente de energía primaria. Con esta tecnología se aprovecha la energía de los gases de escape de los motores de combustión interna o la que se disipa en los radiadores. El rendimiento de estos equipos supera sensiblemente a los que se obtendrían mediante procesos de generación independiente de calor y electricidad.

La fuente primaria es generalmente un combustible fósil (petróleo o gas natural) ó residuos agrícolas y la potencia de los equipos puede variar entre 10 y 250 MW, según el tamaño del establecimiento donde sean instalados.

La utilización más frecuente de la cogeneración es en la industria, pero se la utiliza también en el sector servicios, aunque con módulos más pequeños.

Tabla 2.1 Coeficiente energético de cogeneración en actividades industriales diversas [30]

Rama Industrial	Sk=Calor/Electricidad	Sistema adecuado
Aceites	3,5	Turbo vapor
Frigoríficos	3,2	-
Lácteos	4,1	-
Textiles	2,6	-
Celulosa y papel	4,6	-
Hierro y acero	5,6	-

La relación entre calor y electricidad, expresada en las mismas unidades, se conoce como "Sk o Coeficiente Energético". A cada gama de valores de Sk le corresponde una determinada tecnología de equipos de cogeneración. Los valores medios de la relación Sk que se adecuan a los procesos de diferentes industrias se muestran a continuación, a título de ejemplo en la Tabla 2.1

Partiendo del conocimiento del consumo de energía (calórica y eléctrica) por rama industrial, revelados en censos y/o encuestas industriales, se puede calcular el coeficiente Sk de cada rama y, a partir de estos valores se puede seleccionar el equipo que mejor se adapte a esa actividad y así calcular el potencial de energía susceptible de cogeneración en el sector industrial.

Existen dos formas de redefinir la cogeneración en su forma más usual, por topping (alcances) con máquinas térmicas:

- Desde el punto de vista del primer principio de la Termodinámica, como el aprovechamiento calórico del calor residual de una máquina térmica.
- Desde el punto de vista del segundo principio de la Termodinámica, como la sustitución de las irreversibilidades de la transferencia térmica en los usos calóricos de la energía térmica generada por la combustión, por una conversión a trabajo mecánico con una eficiencia marginal ideal del 100%.

La segunda de las dos definiciones es la que preferimos porque da una visión más conceptual de las posibilidades de aplicación y sus implicancias. A manera de ejemplo, tomando el caso de una industria petroquímica básica, con una demanda de vapor sobrecalentado de alta presión para usos energéticos, en el que la producción del vapor, de más de 200 T/hora, se hace en su casi totalidad mediante calderas convencionales que degradan más del 60% de la energía que insumen. Si la misma calidad y cantidad de vapor se generara en una instalación de cogeneración con turbinas de gas y calderas de recuperación de tecnologías actuales, sería posible la producción de alrededor de 150 000 kW. de energía eléctrica con una eficiencia ideal del 100%, y si esta producción sustituyera la misma cantidad de generación convencional actual, se ahorrarían más de 100 millones de metros cúbicos de gas natural por año, y se reduciría la emisión de CO<sub>2</sub> en unas 150,000 toneladas por año.

La viabilidad de la implementación de la cogeneración se da cuando existe una demanda de calor de cierta magnitud y características, siendo también relevantes otros factores tales como la calidad de la solución tecnológica adoptada, los costos de capital que involucra, las tarifas de combustible y de energía eléctrica, y el marco legal vigente, entre las principales. La principal barrera de la cogeneración es la de origen regulatoria que impide el desarrollo de la aplicación de estas tecnologías. Lamentablemente, mientras esto sucede, miles de calderas y otros dispositivos degradan inútilmente enormes cantidades de energía transformables en trabajo mecánico, que de otro modo, mejorarían sustancialmente la eficiencia de la producción de trabajo mecánico (o electricidad) e impactarían de una menor las emisiones de gases de efecto invernadero, y por ende al medio ambiente.

## **CAPÍTULO III**

### **CALIDAD DE ENERGÍA EN GENERACIÓN DISTRIBUIDA**

#### **3.1 Efectos de la Integración de la Generación Distribuida al Sistema Eléctrico**

El medio ambiente frente a la inminente desregulación de las centrales eléctricas en el siglo XXI es un reto y una oportunidad para una variedad de tecnologías y de funcionamiento de escenarios. La necesidad de ofrecer una calidad de energía aceptable y la confiabilidad crearán un clima muy favorable para la entrada de los recursos distribuidos y las prácticas innovadoras de explotación.

De todas las diferentes partes de un sistema de energía eléctrica, se tiene que identificar clientes cercanos al subsistema de distribución debido a su proximidad y visibilidad sobre una base diaria. Varios acontecimientos recientes han alentado el ingreso de la generación de energía y de almacenamiento de energía en el nivel de distribución. Recursos Distribuidos (RD) es un término que se utiliza tanto la Generación Distribuida (GD) y de almacenamiento de energía distribuida (DS). Una Empresa de servicios públicos de distribución utilizará tanto recursos distribuidos y gestión de la carga para lograr su objetivo. También muchas tecnologías compactas de generación distribuida se están convirtiendo rápidamente en viables económicamente. La integración de la GD puede resultar en varios beneficios. Estos beneficios incluyen la reducción de la pérdida de la línea, la reducción de impactos ambientales, el aumento de la eficiencia energética global, aliviara la congestión de la transmisión y distribución, el apoyo a la tensión y las inversiones diferidas para mejorar la existente generación, transmisión y sistemas de distribución. Los beneficios no se limitan a la utilidad. Los clientes también se benefician de la GD en términos de mejor calidad de la oferta a menor costo. Entre los muchos beneficios de la generación distribuida es una reducida pérdida en las líneas.

#### **3.2 Beneficios de la Generación Distribuida**

Debido a que la Generación Distribuida (GD) se conecta a la red de distribución en media o en baja tensión, cada vez se están dedicando más esfuerzos al estudio del impacto que ocasiona la generación distribuida en las redes de distribución a las cuales se conecta, para

analizar el cumplimiento con las normas de calidad de servicio eléctrico. Los estudios más importantes se centran en:

- Incentivos a las tecnologías de GD para su desarrollo (mecanismos regulatorios: primas, tarifas, certificados verdes, etc.)
- Las nuevas inversiones y la planificación de la distribución teniendo en cuenta la GD.
- Las potencias de cortocircuito en la red con GD.
- Los servicios complementarios en la red con GD (regulación frecuencia-potencia, procedimientos necesarios para la recuperación de la red ante un apagón total – blackstar, control tensión-reactiva).
- Las pérdidas en la red con GD.
- La operación y explotación de red con GD.
- La seguridad del personal de mantenimiento con GD.

Producto de las evaluaciones y estudios mencionados líneas arriba, se ha concluido en varias ventajas de la Generación Distribuida en cuanto a calidad de energía se refiere, dichas ventajas son:

- Ayuda a la conservación del medio ambiente al utilizar fuentes de energía renovables.
- Descongestionan los sistemas de transporte de energía.
- Aplazan la necesidad de re-adecuación de los sistemas de transmisión.
- Ayuda al suministro de energía en periodos de gran demanda.
- Mejora la confiabilidad del sistema.
- Mejora la calidad del servicio eléctrico.
- Evita costos de inversión en transmisión y distribución.

A continuación, como objetivo principal del presente trabajo, se va realizar un breve análisis de la Generación distribuida con respecto al cumplimiento de las Normas Técnicas de Calidad de Servicio Eléctrico (NTCSE) y que enfatiza en los márgenes de caídas de tensión, límites de variación de la frecuencia, periodos de interrupciones, entre otros que determinan la calidad de servicio en un sistema eléctrico.

### **3.3 Perfiles de Tensión en Régimen Permanente**

Por la presencia de generadores distribuidos ya sea síncronos o asíncronos, las violaciones de tensión se pueden limitar considerablemente por la cantidad de energía suministrada por estos generadores en las redes de distribución. Antes de la instalación (O permitir la

instalación de) un generador distribuido, los ingenieros deben analizar los peores escenarios de explotación para garantizar que las tensiones de red no se verá afectada por los generadores; por lo contrario se mejorarán los perfiles de tensión, los escenarios considerados en esta parte son:

- Demanda máxima y sin generación;
- Demanda máxima y máxima generación;
- Demanda mínima y máxima generación.

El diagrama unifilar de la red utilizada para este caso se muestra en la Figura 3.1. Dicho diagrama consiste de una red de sub-transmisión, de 132 kV, de 60 Hz, con nivel de cortocircuito de 1000 MVA, representado por un Thévenin equivalente (Sub), que alimenta un sistema de distribución de 33 kV a través de un transformador de 132/33-kV. La relación X/R es de 4,3.

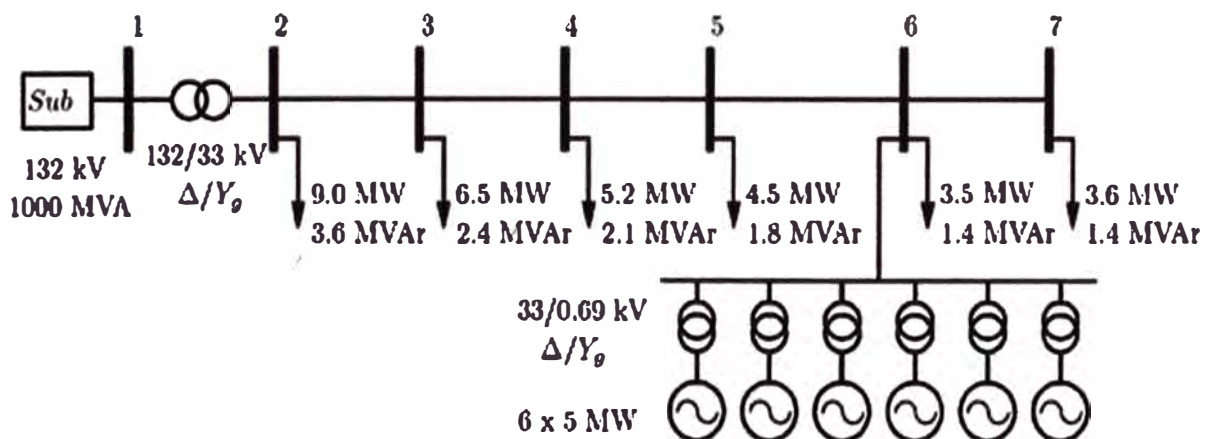


Fig. 3.1 Diagrama unifilar del Sistema 1. Fuente [31]

El perfil de tensiones de la red teniendo en cuenta demanda máxima y mínima y diferentes generadores se presenta en la Figura 3.2., donde los valores permitidos de voltaje en barras (p.u.) están representados por líneas horizontales de puntos. En este caso, se consideró que los seis generadores inyectaban potencia activa nominal (5 MW). Se puede observar que algunos voltajes de barra violará el límite superior durante la demanda mínima, se adopta un factor de potencia constante y generadores síncronos; mientras que si se eligen generadores de inducción, algunos voltajes nodales se situarán por debajo del límite inferior durante la demanda máxima.

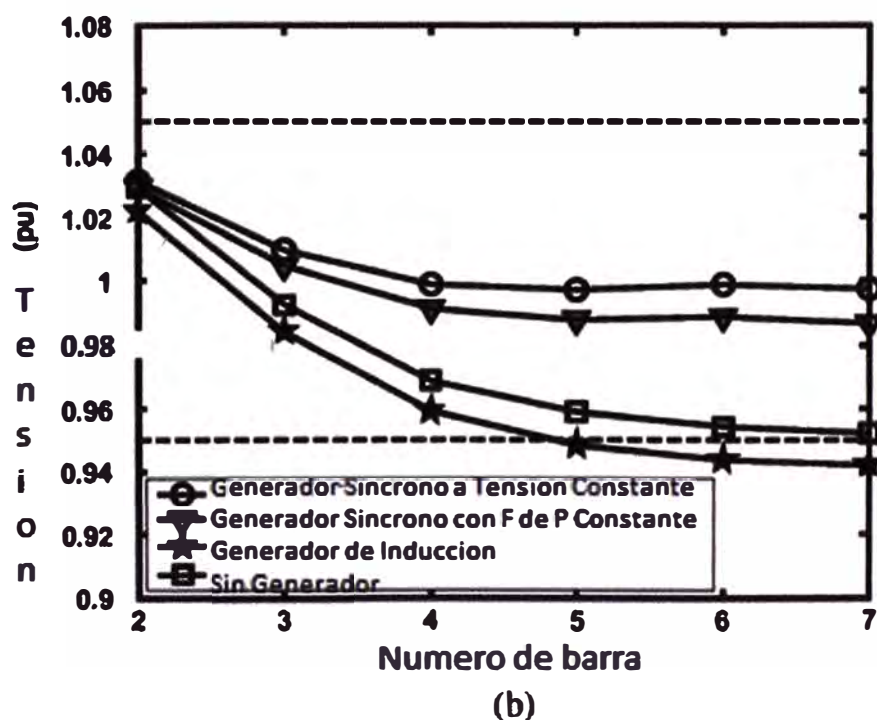
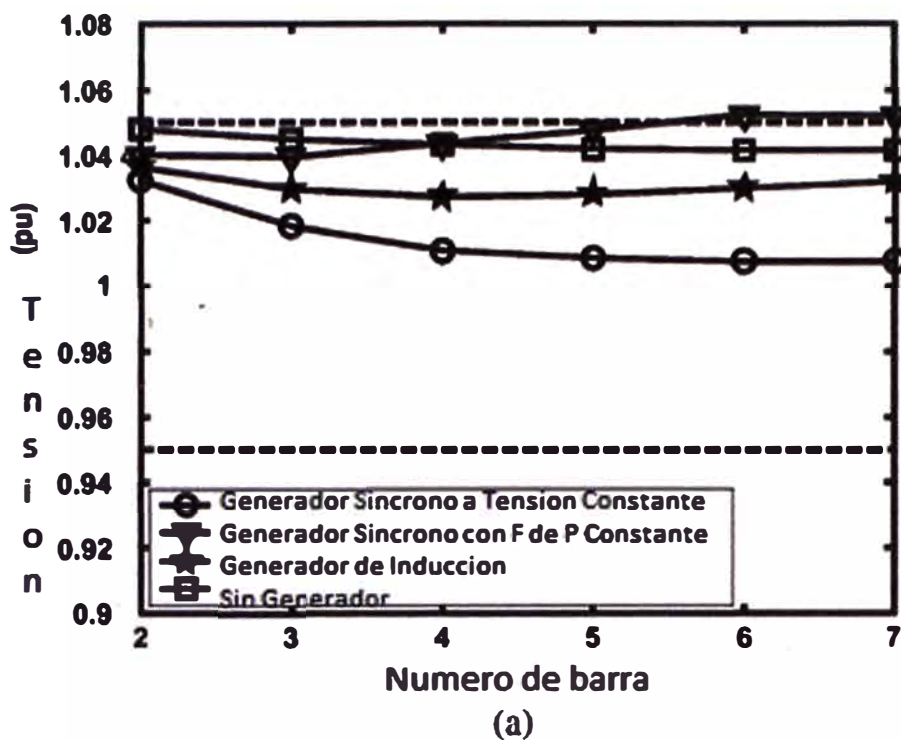


Fig. 3.2 Perfil de tensiones para los diferentes generadores en estado (a) Mínima Demanda (10%). (b) Máxima Demanda (100%). Fuente [31]

Por otra parte si son empleados generadores síncronos de tensión constante, entonces las tensiones en barras permanecen dentro del rango permitido en ambos casos la demanda. En este caso, el factor de potencia del generador síncrono variara de 0,986 inductivo a 0,990capacitivo para el mínimo y valores máximos de la demanda respectivamente. Los voltajes en bornes del generador se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Tensiones en bornes del generador. Fuente [31]

	Demanda Mínima	Demanda Máxima
Tipo de Generador	Tensión Terminal (pu)	Tensión Terminal (pu)
Generador Síncrono a Tensión Constante	1.0000	1.0000
Generador Síncrono con F de P Constante	1.0514	0.9876
Generador de Inducción	1.0286	0.9359

Con el fin de determinar el número máximo de generadores de corriente alterna que se puede instalar sin violaciones de voltaje en estado estable, los voltajes en barras fueron calculados para cada generador añadido en una proporción de uno por uno (de uno a seis generadores). Los resultados se presentan en la Tabla 3.2. Si el voltaje se pone constante en los generadores síncronos, es posible instalar los seis generadores sin violaciones de tensiones en estado estacionario. Por otra parte, en los otros casos, habrá violaciones de tensión. La tercera columna en la Tabla 3.2, muestra lo que será el problema si un nuevo generador es instalado. El caso más restrictivo se relaciona con el factor de potencia constante del generador sincrónico.

Tabla 3.2 Violaciones de límites de tensión considerando generadores síncronos y de inducción. Fuente [31]

Tipo de Generador	Número Máximo de Generadores	Factor limitante
Generador Síncrono a Tensión Constante	6	No hay problema
Generador Síncrono con F de P Constante	2	Violación del límite superior durante la demanda mínima
Generador de Inducción	5	Violación del límite inferior durante la máxima demanda

### Variación de voltaje en estado estacionario debido a desconexión de generador

Una cuestión importante relacionada con el perfil de tensiones en estado estacionario es para determinar la cantidad de violación de los voltajes en barras cuando uno de los generadores distribuidos de repente se desconecta, porque el tiempo de accionamiento de los controladores de voltaje en sistemas de distribución es lento, por ejemplo, en el cambio de tomas de transformadores. Por lo tanto los operadores de redes eléctricas desearían que estas variaciones sean tan pequeñas como sea posible.



Para analizar esta cuestión, el siguiente índice global mostrado en la expresión 3.1 puede ser utilizado para cuantificar el impacto provocado por el generador desconectado:

$$VI1 = \frac{1}{nb} \frac{\sum_{i=1}^{nb} \|V_i^g - V_i^n\| \times 100}{\sum_{i=1}^{nb} V_i^n} \quad (3.1)$$

Dónde: nb, es el número total de barras,  $V_i^n$  es la magnitud de la tensión nodal de barras en la presencia de los generadores distribuidos, y  $V_i^g$  es la magnitud de la tensión nodal de barras generadores, sin distribuir.

Los resultados se resumen en la Tabla 3.3, teniendo en cuenta que los seis generadores hayan sido accionados durante el máximo y mínimo de la demanda. Se puede observar que los casos con generadores de inducción o de factor de potencia constante las variaciones de tensión son más leves que con generadores síncronos. En el caso de generadores síncronos con factor de potencia constante, inyectan o consumen energía reactiva casi nada. Por lo tanto, la diferencia de la distribución de corriente reactiva entre este caso y el caso sin generadores es pequeña. Así, cuando los generadores estén desconectados, el punto de funcionamiento en estado estacionario no cambia considerablemente.

Del mismo modo, en el caso de los generadores de inducción, los generadores prácticamente no se inyectan o se consume energía reactiva, recordando que parte de la potencia reactiva consumida por el generador de inducción es a nivel local por los condensadores. Por otra parte, en el caso de tensión constante con generadores síncronos, la variación de tensión es mayor. En esta situación, el importe de la potencia reactiva inyectada / suministrada por los generadores es significativo. Así, el estado de equilibrio en el punto de trabajo varía considerablemente después de la desconexión de los generadores.

Tabla 3.3 variaciones de tensión debido a las desconexión de un generador. Fuente [31]

Tipo de Generador	Tensión Nominal (%)	
	Mínima Demanda	Máxima Demanda
Generador Síncrono a Tensión Constante	3	3.0800
Generador Síncrono con F de P Constante	0.61	2.29
Generador de Inducción	1.23	0.97

### Regulación de voltaje en estado estacionario

Otra cuestión importante relacionada con la tensión de estado estacionario es la característica de regulación de la red, es decir, cuánto será el cambio de las tensiones en

barras cuando la demanda sea máxima y mínima. Es deseable que los voltajes nodales tengan un cambio menos posible durante las variaciones de carga. Para analizar esta cuestión es empleado el índice global que se encuentra con la siguiente ecuación 3.2

$$VI2 = \frac{1}{nb} \sum_{i=1}^{nb} \|V_i^{max} - V_i^{min}\| \times 100 \quad (3.2)$$

Dónde:  $V_i^{max}$  es el valor de la tensión nodal de la barra durante la demanda máxima, y  $V_i^{min}$  es la magnitud de la tensión nodal de barra durante la demanda mínima.

Los resultados se muestran en la Tabla IV. Se puede observar que el uso de generadores síncronos de tensión constante conduce a las mejores características de regulación de voltaje (variación mínima). Este hecho se produce porque los generadores inyectan potencia reactiva de acuerdo a los cambios en las variaciones de carga, resultando en una buena regulación de voltaje. Por otro lado, el uso de los generadores síncronos de factor de potencia constante o la de generadores de inducción implica peores tensión (variación máxima), porque estas máquinas no son de tensión auto-reguladas.

Tabla 3.4 Regulación de tensiones en barras. Fuente [31]

Tipo de Generador	V12 (%)
Generador Síncrono a Tensión Constante	0.88
Generador Síncrono con F de P Constante	4.77
Generador de Inducción	6.40
Sin Generador	6.74

### 3.4 Reducción de Pérdidas de Potencia Activa

Aunque las pérdidas de potencia activa no son un factor técnico que puede limitar la cantidad de la generación distribuida, es un importante factor económico. Por lo tanto, en esta sección, las pérdidas eléctricas del sistema que se muestra en la Figura 3.1 se evalúan para diferentes escenarios de generación y carga. Las pérdidas fueron calculadas utilizando la siguiente ecuación:

$$P_{losses} = P_{substation} + P_{generator} - \sum P_{loads} \quad (3.3)$$

Dónde:  $P_{losses}$  es el total de pérdidas de potencia activa del sistema,  $P_{substation}$  es la potencia activa suministrada por la subestación,  $P_{generator}$  es la potencia activa suministrada por los generadores, y  $P_{loads}$  es la potencia total activa consumida por las cargas.

Los resultados se presentan en la Tabla 3.5. Los valores de las pérdidas de potencia activa para el caso de que no tienen generadores distribuidos también se indican.

Tabla 3.5 Pérdidas de Potencia Activa en MW. Fuente [31]

Máxima Demanda (Pérdidas sin GD = 0.7608 MW)			
Numero de Generadores	Generadores Síncronos a Tensión Constante	Generadores Síncronos con F de P Constante	Generador de Inducción
1	0.5016	0.5453	0.5626
2	0.3774	0.419	0.4557
3	0.3389	0.3758	0.4258
4	0.3784	0.4119	0.477
5	0.4928	0.5254	0.6119
6	0.6798	0.7161	1.0132
Mínima Demanda (Pérdidas sin GD = 0.2107 MW)			
Numero de Generadores	Generadores Síncronos a Tensión Constante	Generadores Síncronos con F de P Constante	Generador de Inducción
1	0.2524	0.2348	0.2343
2	0.3663	0.3262	0.3229
3	0.5499	0.4839	0.4763
4	0.8032	0.7080	0.6959
5	1.1265	0.9998	0.9845
6	1.5189	1.3619	1.4963

Los siguientes acontecimientos se pueden observar:

**a) Máxima demanda:** Se puede comprobar que durante que el sistema está alimentando considerable carga, por lo general, la instalación de generadores distribuidos conduce a una disminución de las pérdidas eléctricas. Inicialmente, cada generador añadido implica una reducción de las pérdidas. Sin embargo, después de que el tercer generador está instalado, entonces, si un nuevo generador es conectado a la red, las pérdidas comienzan a aumentar. Este hecho indica que la mejora de la pérdida de potencia activa ha alcanzado un punto de saturación. La adopción de generadores sincrónicos de tensión constante conduce a la más grande reducción de las pérdidas debido a que este generador suministra las cargas activos y cargas reactivas a nivel local, reduciendo la magnitud de la corriente en los alimentadores. Por otro lado, el uso de generadores de inducción no causa una gran reducción en las pérdidas de potencia activa y, de hecho, cuando los seis generadores están funcionando, el sistema aumenta las pérdidas. En este caso, los generadores consumen reactivos de alimentación de la red, aumentando la magnitud de las corrientes que circulan en los alimentadores. El comportamiento de las pérdidas en presencia de generadores sincrónicos con factor de potencia constante se encuentra entre los otros dos casos, ya que

estos generadores suministran potencia activa a nivel local, pero no proporcionan o consumen energía reactiva.

**b) Mínima demanda:** En este caso, por lo general, la presencia de los generadores aumenta las pérdidas de potencia activa, independiente del generador de empleo. En esta situación una gran cantidad de energía activa generada se exporta al sistema de sub-transmisión, que influyen negativamente en las pérdidas del sistema de distribución. El uso de generadores sincrónicos de tensión constante pueden estar relacionados con en el peor de los casos, porque a fin de mantener la tensión en bornes de 1 pu, el generador consume una gran cantidad de potencia reactiva.

En conclusión, se ve claramente que la GD puede reducir la pérdida en la línea de un sistema. Esto se debe al hecho de que la GD da suministro de una parte de la potencia activa y reactiva a la carga. Así, la corriente en el alimentador se reduce de la fuente a la ubicación de la GD, resultando en una menor pérdida en la línea eléctrica. Sin embargo, la GD de mayores capacidades no siempre se puede garantizar una menor pérdida de línea. Se conoce que a medida que aumenta la GD, la tasa de la reducción de la pérdida en la línea en realidad disminuye. Esto indica que la GD puede causar una pérdida de la línea más alta en el sistema de distribución si la localización de la GD no tiene justificación. Por lo tanto, este hecho debe ser tenido en cuenta antes de determinar la calificación y la ubicación de la GD. En la calificación adecuada de la GD sobre todo depende de la cantidad y la ubicación de la carga en el alimentador. En general, la implementación de la GD, para mayor cantidad de carga puede ser más alta sin causar mayor pérdida de línea eléctrica en el del sistema.

### **3.5 Descongestión en Líneas de Transmisión**

Es evidente que al colocar los centros de generación eléctrica muy cerca de la carga, los flujos de potencia en las líneas de transmisión van a disminuir y por lo tanto estarán más holgadas.

Además una empresa puede ahorrar los costos de distribución de expansión de las líneas de transmisión si un nuevo gran cliente localizado en un circuito débil decide construir la generación para cubrir parte de su carga, en lugar de depender exclusivamente de la empresa. En estos casos, la empresa no tendrá que construir una nuevas instalaciones de transmisión o distribución, o reforzarlas instalaciones existentes, para satisfacer la gran demanda del cliente. Por ejemplo, los servicios públicos están ya instalando GD para grandes almacenes, fábricas, prisiones, áreas recreativas y complejos turísticos situados

remotamente. Estos suelen ser grandes generadores de combustión interna.

Por otro lado, el sistema no obtendrá ningún beneficio si un gran cliente nuevo construye su propia generación para satisfacer su demanda de energía propia, pero tiene la intención de apoyarse en la empresa para respaldo de energía, especialmente en el momento de pico. En ese caso, la empresa podría aún tener que reforzar sus instalaciones de transmisión o de distribución para atenderla demanda máxima del cliente

### **3.6 Estabilidad**

La generación distribuida tiene un gran impacto en la operación y la planificación en tiempo real de sistemas de potencia tradicionales. Se aumenta la complejidad de controlar, proteger y mantener los sistemas de distribución. Un esquema novedoso de control de estabilidad para sistemas de generación distribuida fue propuesto por Liu Zhengyi[22]. Las características para la generación distribuida son discutidas en esa publicación y los modelos de control para el estado de emergencia son desarrollados. El sistema de generación distribuida en condiciones de falla se suele dividir en dos partes: el sistema interconectado y el sistema aislado de esquemas de controles diferentes fueron desarrollados en sistemas diferentes. En el sistema interconectado, el control de la estabilidad se mantiene gracias a la red del sistema. En el sistema aislado, un esquema para el control de estabilidad se analiza de acuerdo al modelo dinámico de la generación de distribuida. El esquema de control de estabilidad para el sistema de generación distribuida fue probado en un modelo dinámico en el laboratorio. El control de la estabilidad se ha desarrollado, los resultados mostraron que el esquema tiene un rendimiento bueno en los sistemas de generación distribuida.

Pero la GD en el sistema de potencia va a cambiar la estructura de la red y tiene un gran impacto en tiempo real y la planificación de sistemas de potencia tradicionales. Se aumenta la complejidad para el control, protección y mantenimiento de los sistemas de distribución. La conexión de la Generación Distribuida a las partes vulnerables de la red de potencia, incrementará los niveles de falla, induce las variaciones de voltaje, la red de estabilidad transitoria se degrada y, dependiendo del tamaño relativo de la planta y las cargas locales, se revierte el flujo de potencia y aumentan las pérdidas. En el estado de equilibrio, transitorias variaciones lentas de los niveles de tensión relacionados con la conexión de una GD puede llevar a un funcionamiento no deseado del equipo de control de tensión en los transformadores en las subestaciones de la red primaria. Una inversión neta o el incremento del flujo de potencia en la línea debido a la presencia o la pérdida,

respectivamente, de una GD pueden causar fluctuaciones de voltaje intolerable. La Red de Distribución del operador que luego pide desconectar la GD y puede arrojar una parte de la entera carga total.

### 3.6.1 Estabilidad de Tensión

Normalmente, se espera que la instalación de generadores cerca de la carga lleve a una ganancia en el margen estabilidad de voltaje del sistema. Sin embargo, el impacto en el margen depende de la potencia reactiva intercambiada entre el generador y la red, que es diferente en tecnologías diferentes. Por lo tanto, en esta sección las curvas PV del sistema que se muestra en la Figura 3.3, se analizarán. Esta es una red de sub-transmisión de 132 kV, de 60 Hz, con sistema de nivel de cortocircuito de 1500 MVA, representado por un equivalente de Thévenin (Sub), que alimenta un sistema de distribución de 33 kV a través de dos transformadores 132/33 kV,  $\Delta/Y_g$ . Un generador de corriente alterna con capacidad de 30 MVA está conectado en la barra 6, conectado a la red a través de un transformador 33/0.69 kV, de conexión  $\Delta/Y_g$ . Esta máquina puede representar a un generador de una planta de generación térmica, así como un equivalente de varios generadores pequeño de viento o hidro- generación. En algunos casos se simuló, como una máquina generador de inducción y en los demás como un generador síncrono. Las curvas PV se obtuvieron mediante la variación de la carga activa y reactiva y mantener la potencia activa inyectada por el generador en el nivel nominal (30 MW). La potencia activa suministrada por el generador se mantiene constante, ya que, generalmente esos generadores no se reprograman por el operador del sistema. Además, los resultados de simulación muestran que los casos extremos (es decir, el más pequeño/más grande margen de estabilidad) se obtienen cuando el generador está suministrando la potencia nominal.

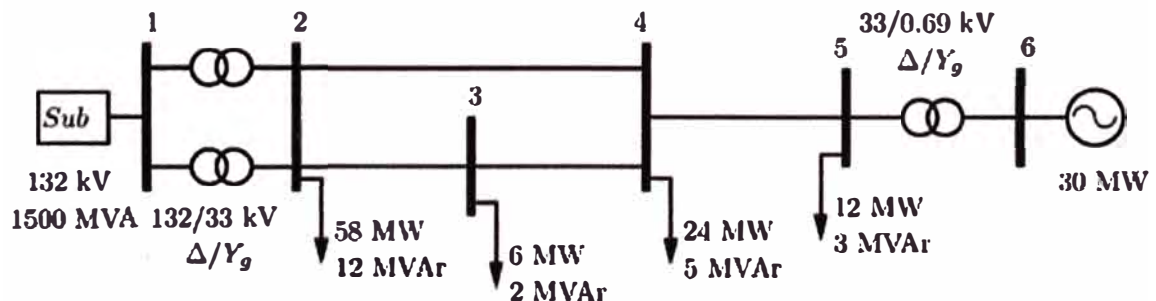


Fig. 3.3 Diagrama unifilar del Sistema 2. Fuente [31]

La curva PV de la barra 4 se muestra en la Figura 3.4. Se puede comprobar que la presencia de los generadores síncronos aumenta al sistema el margen de estabilidad, independientemente del modo de control del sistema de excitación. Además, el uso del

generador síncrono de tensión constante produce las mayores ganancias, pues este tipo de generación proporciona la energía activa y reactiva a las cargas locales. Por otra parte, en el caso de un generador de inducción, el margen de estabilidad del sistema se reduce.

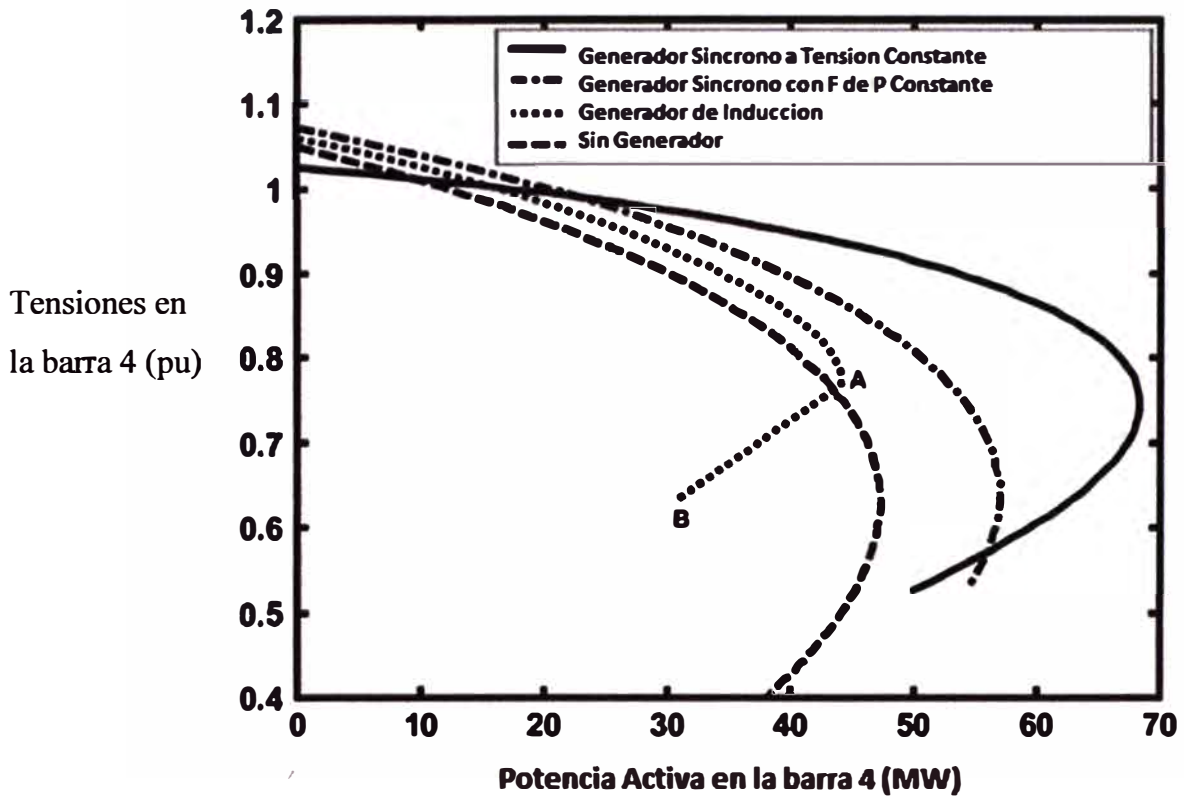


Fig. 3.4 Curvas PV de la barra 4. Fuente [31]

En este caso, el punto de funcionamiento del sistema va desde el punto A a B de la curva después de sólo un paso en el incremento de carga. Se puede comprobar, mediante el uso de simulaciones dinámicas, que el punto A de la curva PV representa el límite de estabilidad en estado estacionario del generador de inducción. Si la carga aumenta más, la máquina aumenta la velocidad del rotor monótonamente. Este hecho se debe a que cuando la carga va en aumento, la tensión del generador en bornes disminuye. Como el par eléctrico es proporcional a la tensión en los terminales, este también disminuye, en consecuencia, aumenta la velocidad del rotor para compensar la reducción del par eléctrico. Desde un punto determinado, aumenta la velocidad del rotor ilimitadamente, lo que lleva el sistema a un colapso de voltaje. Por supuesto, en este punto, el generador se desconecta por el sistema de protección y el sistema volverá a la curva PV para el caso de que no tienen generadores, si no hay cargas dinámicas.

### 3.6.2 Estabilidad Transitoria

Normalmente, el tiempo de accionamiento del sistema de protección de la distribución la

red es bastante lento [20]. Además, el valor de la constante de inercia de generadores de corriente alterna distribuido es bajo, aunque lo habitual es menores de 2 s. Por lo tanto, las cuestiones de estabilidad transitorias pueden limitar la cantidad de potencia activa exportada por los generadores distribuidos al sistema. Así, en esta sección, el comportamiento dinámico de los generadores durante las fallas de las tres fases-tierra se analiza. El sistema empleado en esa investigación es el mismo que se presentó en la Figura 3.3. Durante los cortocircuitos, por lo general, los generadores síncronos aceleran, de modo que se puede volver inestable debido a la pérdida de sincronismo.

La estabilidad de generadores síncronos se puede determinar mediante el análisis de la respuesta dinámica del ángulo del rotor [23].

Por otra parte, en el caso de los generadores de inducción, estos generadores también aceleran durante un cortocircuito, y como resultado, la potencia reactiva consumida por los generadores se incrementa considerablemente, lo cual puede llevar al sistema a un colapso del voltaje. Así, en este caso, el fenómeno de estabilidad se puede verificar mediante el análisis de la respuesta dinámica de la velocidad del rotor o la tensión en bornes.

### **3.6.3 Protección**

Tradicionalmente las redes de distribución han sido diseñadas para funcionar radialmente para poder manejar los niveles de tensión superior hacia abajo, a los clientes situados a lo largo de líneas radiales. Esto ha permitido una estrategia de protección relativamente sencilla. Cuando la aplicación de la protección de la sobre intensidad de corriente (por ejemplo), ha sido posible suponer que la corriente de falla puede tener una sola dirección. Sin embargo, esto no es siempre cierto cuando hay unidades de generación distribuida (GD) tales como turbinas de viento en la red. Como la proporción de los aumentos de la generación distribuida son cada vez más, las redes de distribución como redes de transporte se mezclan los nodos de generación y carga, y un diseño más complejo sistema de protección es inevitable. Con el fin de analizar los efectos de la generación distribuida sobre los requisitos para la protección de las redes de distribución, los estudios de alimentación del sistema de simulación son obligatorios. El modelamiento dinámico de los diversos tipos de GD como la energía eólica es una necesidad. Los problemas más frecuentes son los siguientes:

- Falso disparo de alimentadores (disparo simpático)
- Los disparos de unidades de producción
- Cegadoras de protección



- Aumento o disminución de los niveles de falla
- Islas no deseados
- Prohibición de cierre automático
- Reconexión no sincronizados

La aparición de este tipo de problemas depende de las características de la red y la GD. Por ejemplo, en las fallas de cortocircuito de una planta de energía eólica se genera corriente de falla que depende en gran medida tanto en el tipo de viento generador de turbina y la configuración de red. Los generadores sincrónicos son capaces de alimentarse bien gran falla sostenida mientras que los sistemas actuales basados en el inversor puede ser controlada para que su producción puede ser limitado, incluso a la corriente nominal. Desde el punto de vista de la coordinación de la protección, la ubicación de la falla en relación con el generador y los dispositivos de protección dicta el resultado del caso de falla.

#### **3.6.4 Control de Flujo de Potencia**

Las unidades de generación distribuida con fuentes de energía pequeñas, como las pilas de combustible, micro-turbinas, y dispositivos fotovoltaicos, se puede conectar a la red de servicios públicos, como fuentes alternativas de energía, además de proporcionar energía a sus cargas locales. Estas unidades generalmente están articuladas con la red de suministro eléctrico mediante tres inversores de fase. Con el control del inversor, la potencia activa y reactiva, inyectada a la red de suministro eléctrico de las unidades de generación distribuida puede ser controlado. El control del flujo de potencia reactiva permite que las unidades de generación distribuida puedan ser utilizadas como unidades estáticas de compensación VAr además de fuentes de energía.

Mín Dai presentó en un artículo [24] una unidad de generación distribuida que proporciona la técnica de control de regulación de voltaje combinada con la eliminación de armónicos en la corriente de control en modo de operación tipo isla del flujo de potencia separada de la potencia activa y reactiva en el modo conectado a la red. La técnica de control, que combina en tiempo discreto el modo de control de deslizamiento actual, control robusto de tensión mediante servomecanismo y de control de potencia integrado, permiten la integración de conmutación entre el modo de isla y el modo conectada a la red y garantiza la corriente de fase sinusoidal con carga no lineal local. La cuestión de acoplamiento PQ está dirigida y la estabilidad del lazo de control de potencia se prueba utilizando el método directo de Lyapunov.

### 3.6.5 Tensión SAG

En esta sección se presenta un breve análisis de huecos de tensión debido a fallas desequilibradas mediante simulaciones electromagnéticas transitorias realizadas por Samuelsson [25]. La incidencia de desequilibrio de corto circuitos en las redes de distribución es relativamente frecuente. Durante estos cortocircuitos, el voltaje se hunde, esto se puede producir en las barras del sistema. La presencia de generadores de corriente alterna puede influir en la magnitud y la duración de estas caídas de voltaje. Esto dependerá del nivel de la repercusión de estos generadores en el sistema de cortocircuito y el comportamiento dinámico de la potencia reactiva intercambiada entre el generador y la red.

Con el fin de obtener una mejor comprensión de la influencia de cada tipo de generación de huecos de tensión, muchas simulaciones repetidas se hicieron teniendo en cuenta los plazos de despacho de diferentes generadores. Bajadas de tensión pueden ser caracterizadas por su magnitud (valor mínimo de tensión) y duración (período de que la tensión se mantiene por debajo de un valor determinado).

### 3.6.6 Corrientes de cortocircuito

La instalación de generadores de corriente alterna puede elevar los valores de las corrientes de cortocircuito, pase a ser obligatorio para actualizar el protección y / o los dispositivos de red. Por otra parte, el relé de configuración necesita ser reajustados para detectar fallas correctamente. Así, en esta sección, las corrientes de cortocircuito suministrado por los generadores de corriente alterna durante las fallas balanceadas y no balanceadas se determinan mediante el uso de simulaciones electromagnéticas transitorias. La falla de resistencia de tierra se hace igual a 0,001 ohmios.

La Figura 3.5 presenta el comportamiento dinámico de las corrientes suministradas por los generadores (corriente del estator) durante un período de cortocircuito tres fase A-tierra aplicadas en la barra 5 en  $t=50$  ms. El sistema empleado es el mismo que se presentó en la Figura 3.3.

Aunque inicialmente la magnitud de las corrientes es alta, que disminuyen rápidamente porque esta máquina no tiene capacidad para ofrecer corrientes sostenida de cortocircuito durante las fallas en tres fases. En esta situación, la red trifásica caída de tensión a cero y el banco de condensadores se convierte en la descarga. En consecuencia, no hay fuente de excitación externa para el generador, y se vuelve incapaz de producir tensión.

Teóricamente, este hecho podría convertirse en la detección de fallas por los sistemas de

protección basado en relés de sobrecarga de corriente más difícil.

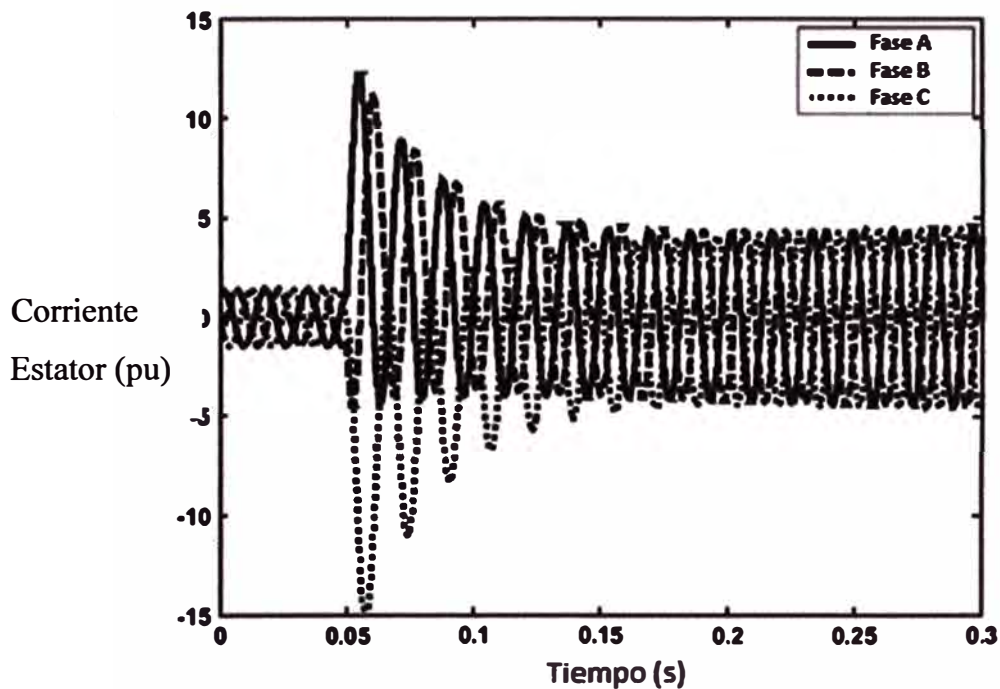


Fig. 3.5 Corriente de cortocircuito en el estator durante una falla Fase A-Tierra.

Fuente [31]

Sin embargo, en este caso, basado en relés de voltaje puede ser utilizado. En el caso de los generadores síncronos, se puede observar que el uso del sistema de excitación como un regulador de tensión permite que el generador suministre una sostenida corriente de corto circuito. Sin embargo, si el sistema de excitación se utiliza como un regulador de factor de potencia, esta capacidad disminuye.

### 3.7 Seguridad

Además de la idoneidad de la energía y la gran capacidad de planificación, los aspectos medioambientales y consideraciones económicas, programas de generación distribuidos y con energías renovables, cuenta el efecto de los beneficios sobre la seguridad del sistema de transmisión que es probable que aumenten a largo plazo. En particular, la generación distribuida tiene notablemente el potencial de aumentar la seguridad de la red si los nuevos proyectos son estratégicamente ubicados para disminuir los flujos de transmisión, y reducir congestión [26].

Como la instalación de generación distribuida y con energías renovables es más extendida, y que empieza a afectar al sistema de transmisión de alta tensión y, en consecuencia los sistemas de transmisión de forma que se explotan y planifican mejor [27, 28]. Las fuentes de Generación Distribuidas y renovables pueden tener beneficios significativos en comparación con la generación convencional. Además de proporcionar mejor adecuación

de energía y menos dependencia de las fuentes convencionales, la generación renovable puede ofrecer beneficios de confiabilidad del sistema. El efecto puede ser positivo si la generación distribuida está estratégicamente ubicada de una manera que cumpla con la carga local, disminuye los flujos de transporte, y mejora la seguridad. Por otra parte, la planificación se centra sólo en la adecuación de los recursos siendo más óptima y sin querer introducir a largo plazo problemas en la red de transporte, la congestión y de altos precios. En consecuencia, la ubicación estratégica de distribución y generación de energía renovable tiene un gran potencial para ayudar a los sistemas de avanzar hacia niveles de mayor seguridad.

La seguridad de la red de transporte para un escenario dado se puede determinar con simulaciones de análisis de contingencias. El análisis de contingencias define un conjunto de posibles contingencias que representan eventos como la insuficiencia o desconexión de los dispositivos. Cada contingencia se implementa para determinar las violaciones de seguridad resultantes, como límites térmicos de la línea. Los resultados de los análisis de contingencia se pueden tabular a fin de identificar las contingencias que puedan crear problemas de funcionamiento en el sistema y determinar acciones correctivas, como el re-expedición o la desconexión de carga. Análisis de contingencia también se puede utilizar para determinar las líneas de transmisión o transformadores que presentan graves violaciones para uno o múltiples contingencias. Es importante que los problemas se clasifiquen, de modo que mejoras en el transporte o la ubicación estratégica de generación puede ser perseguida. A continuación se enumeran varias medidas que se pueden utilizar para identificar de los puntos débiles y priorizar los recursos para la transmisión:

- a) Elemento de cierto número de contingencias por sobrecargas. Es un indicador, aunque no tiene en cuenta la gravedad de la sobrecarga.
- b) Porcentaje máximo de sobrecarga en el elemento. Esta métrica no tiene en cuenta el número de sobrecargas.
- c) Suma de porcentaje de sobrecargas del elemento por debajo todas las contingencias de sobrecarga.

La medida última se conoce como el porcentaje total por Contingencia de sobrecarga (APCO), que se calcula como:

$$APCO_{BRANCHjk} = \sum_{\text{Contingencies that overloaded branch } jk} (\%Overload - 100) \quad (3.4)$$

Este índice APCO no es capaz de discriminar entre los niveles de tensión, y por lo tanto una sobrecarga de 10% en un elemento de baja tensión tendría el mismo rango que una sobrecarga de 10% en un elemento de mayor tensión. En la actualidad, sin embargo, la sobrecarga de alta tensión es claramente más grave. La APCO es necesario multiplicado por el número de línea a fin de que estos valores para la misma escala. La medida resultante se llama el total de Megavatios de Contingencia de sobrecarga (AMWCO), que es calcula como:

$$AMWCO_{BRANCHjk} = APCO_{BRANCHjk} X MVAR_{Rating_{BRANCHj}} \quad (3.5)$$

El AMWCO de un elemento de transmisión es la suma de todos los Megavatios de sobrecarga que aparecen en el elemento dado un conjunto de contingencias. Esta medida captura la debilidad del elemento y se puede utilizar para la clasificación y establecimiento de prioridades en la planificación de transmisión convencional. Los elementos que no estén sobrecargados en algún caso arrojan un AMWCO igual a cero. Para otros elementos, la más alto AMWCO es el más débil elemento.

La Figura 3.6 ilustra una visualización del contorno AMWCO de líneas de transmisión y transformadores del sistema de prueba de la IEEE- 118-barras. La gama AMWCO fue 0 a 325. Esta visualización del elemento débil ilustra la distribución espacial de elementos congestionados en el sistema, y proporciona la penetración en métodos para resolverlos, en asociación con generación distribuida.

Como cada elemento de una región o sistema tiene un valor AMWCO, es posible determinar un sistema como el AMWCO de la suma de los AMWCO de los elementos de transmisión (sucursales) dentro de la región:

$$AMWCO_{SYSTEM} = \sum_{\substack{j \text{ and } k \\ \text{in SYSTEM}}} AMWCO_{BRANCHjk} + \frac{1}{2} \sum_{jkt \text{ in lines}} AMWCO_{BRANCHjk} \quad (3.6)$$

Una manera de normalizar estas métricas independientes del tamaño del sistema es dividirlo por el número de líneas de transmisión y transformadores, para obtener la contingencia Megavatios promedio que presentan sobrecarga en las líneas de una región asumiendo un conjunto de contingencias.

### **Lugares que favorecen la seguridad**

En esta sección se presenta un método de cálculo que asigna a cada barra de la red un escalar único que mide el cambio marginal en AMWCO con una inyección de potencia al sistema. Este índice se basa en una transmisión ponderada de sensibilidad de carga de socorro (WTLR), que permite una clasificación y visualizar los lugares donde las

inyecciones de nueva generación mejorarían la seguridad del sistema.

Estamos interesados en la determinación y clasificación de los nodos la red (barras), donde si se conecta, generadores distribuidos y con generación renovables daría lugar a una lucha contra el flujo de elementos congestionados.

Dado que las inyecciones en cualquier lugar en el sistema al menos marginalmente afectan los flujos en todas partes el sistema, se busca un mecanismo que al mismo tiempo maximizar la mitigación de la sobrecarga de contingencia en múltiples elementos congestionados, y reducir al mínimo nuevas sobrecargas en el del sistema. Un análisis de sensibilidad puede llevarse a cabo para determinar los mejores lugares en los que las inyecciones mitigarían sobrecargas para un único elemento débil.

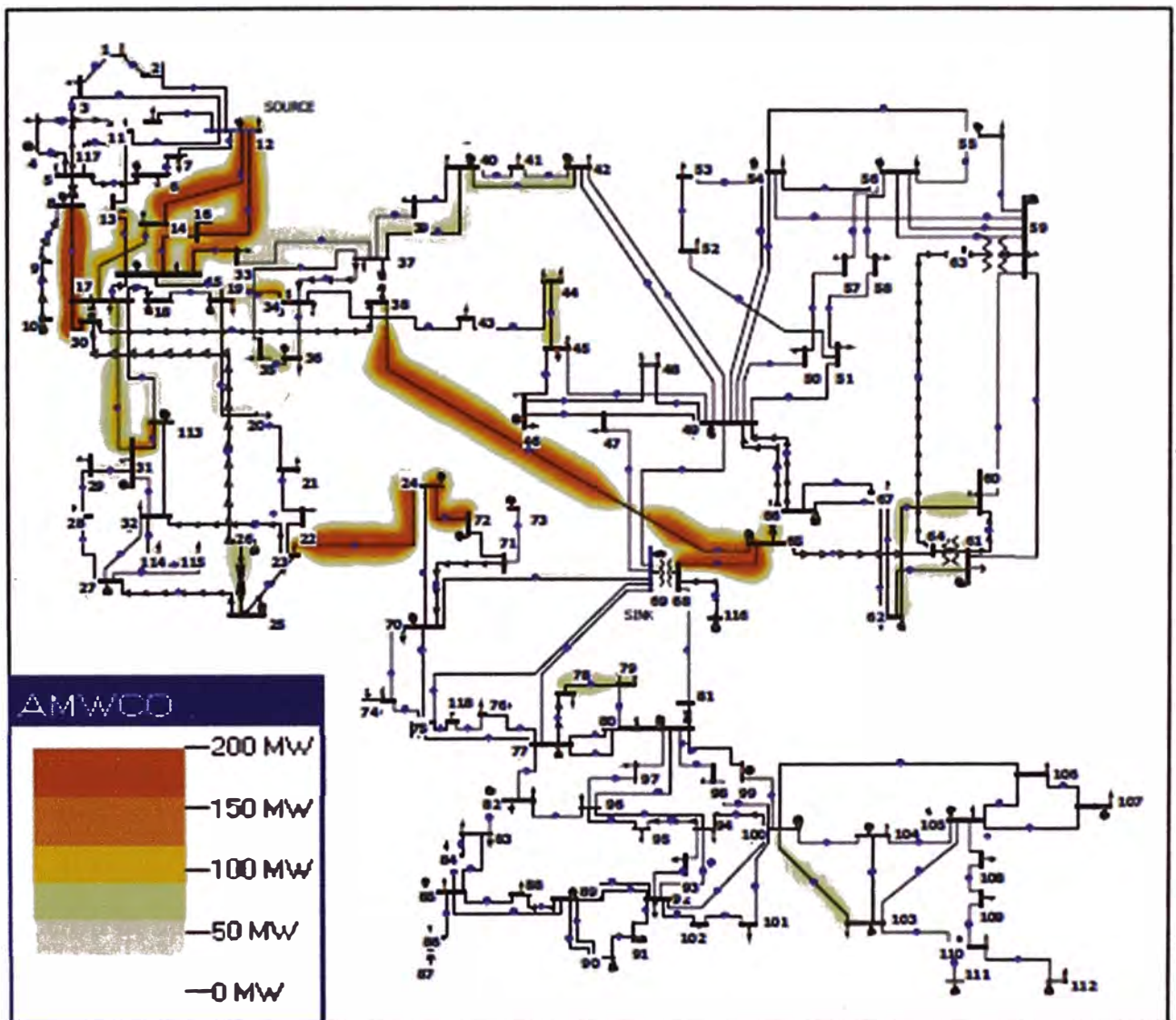


Fig. 3.6 Visualización AMWCO del sistema IEEE-118 barras. Fuente [26]

El método se basa en factores del alivio de la carga de transmisión (TLR), definida como la cambio en el flujo de acuerdo con una inyección en una barra determinada. Este cálculo

supone un fregadero de transferencia, que por lo general corresponde a toda una zona:

$$TLR_{BUSi, BRANCHjk} = \frac{\Delta MW_{Flow_{BRANCHjk}}}{\Delta MW_{Injection_{BUSi}}} \quad (3.7)$$

Designando por  $n$  el número de barras en el sistema, es evidente que para cada elemento débil, un arreglo de tamaño de  $n$  barras, la sensibilidad TLR se puede determinar. La mayor TLR negativo en esta matriz corresponde a la barra donde una inyección de potencia resulta en la mayor reducción del flujo de operación normal en ese elemento. Es política del sistema de electricidad, no definir la seguridad basada en los flujos de operación normal, sino más bien en condiciones de contingencia. Así TLR de contingencia son necesarios.

Un método de aproximación de los TLR de contingencia, es aproximada utilizando TLR funcionamiento normal según se define en ecuación (4). Esta aproximación se comporta bien en grandes sistemas de mallas. Las sobrecargas en la condición de contingencia a menudo aparecen en las líneas de transmisión que tienen una pesada normal flujo de la operación, y reducir el flujo de la operación normal reduce eficazmente las sobrecargas de contingencia y el elemento AMWCO.

Las sensibilidades de barras TLR con respecto a los múltiples elementos débiles forman una matriz en barras y las dimensiones de debilidad de los elementos. Se requiere un valor único para cada barra que captura toda la información contenida en la matriz. Esto es alcanzado por un mecanismo de ponderación, que asume la mitigación de inyecciones proporcional a la debilidad de los elementos, es decir, a cada elemento un AMWCO. De esta manera, la sensibilidad resultante, define aquí como el alivio de transmisión de carga ponderado (WTLR), es calcula como:

$$WTLR_{BUSi} = \frac{N_{CONT}}{AMWCO_{SYSTEM}} \times \sum_{jk \in Branches} \left( \begin{array}{c} CODir_{BRANCHjk} \\ \times TLR_{BUSi, BRANCHjk} \\ \times AMWCO_{BRANCHjk} \end{array} \right) \quad (3.8)$$

Donde  $N_{CONT}$  es el número de contingencias durante la prueba del análisis de contingencias y  $CODir$  de un elemento débil se define como:

$$CODir_{BRANCHjk} = \begin{cases} 1 & \text{All are forward overloads} \\ -1 & \text{All are reverse overloads} \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (3.9)$$

Si la sobrecarga en una línea se produce en distintas direcciones para diferentes contingencias, la expresión (6) anterior es cero. La no inyección simultáneamente es capaz

de la mitigación de las sobrecargas, la sobrecarga se incrementa por una contingencia o la otra. Por lo tanto, la resolución de las sobrecargas en este particular elemento requiere actualizar la transmisión, ya sea del elemento o sus circuitos en paralelo.

La Figura 3.7 muestra la distribución espacial de la WTLR correspondientes a los elementos débiles que se mostró en la Figura 3.6. Notar que el mayor WTLRs negativos se encuentra en la recepción final de los elementos sobrecargados. Es evidente que las inyecciones de los flujos en las barras se producen de venta libre en los elementos sobrecargados, que disminuya su AMWCO. Por otra parte, inyecciones en las barras con WTLR positiva producirá flujos que sería un aumento de las sobrecargas durante contingencia condiciones.

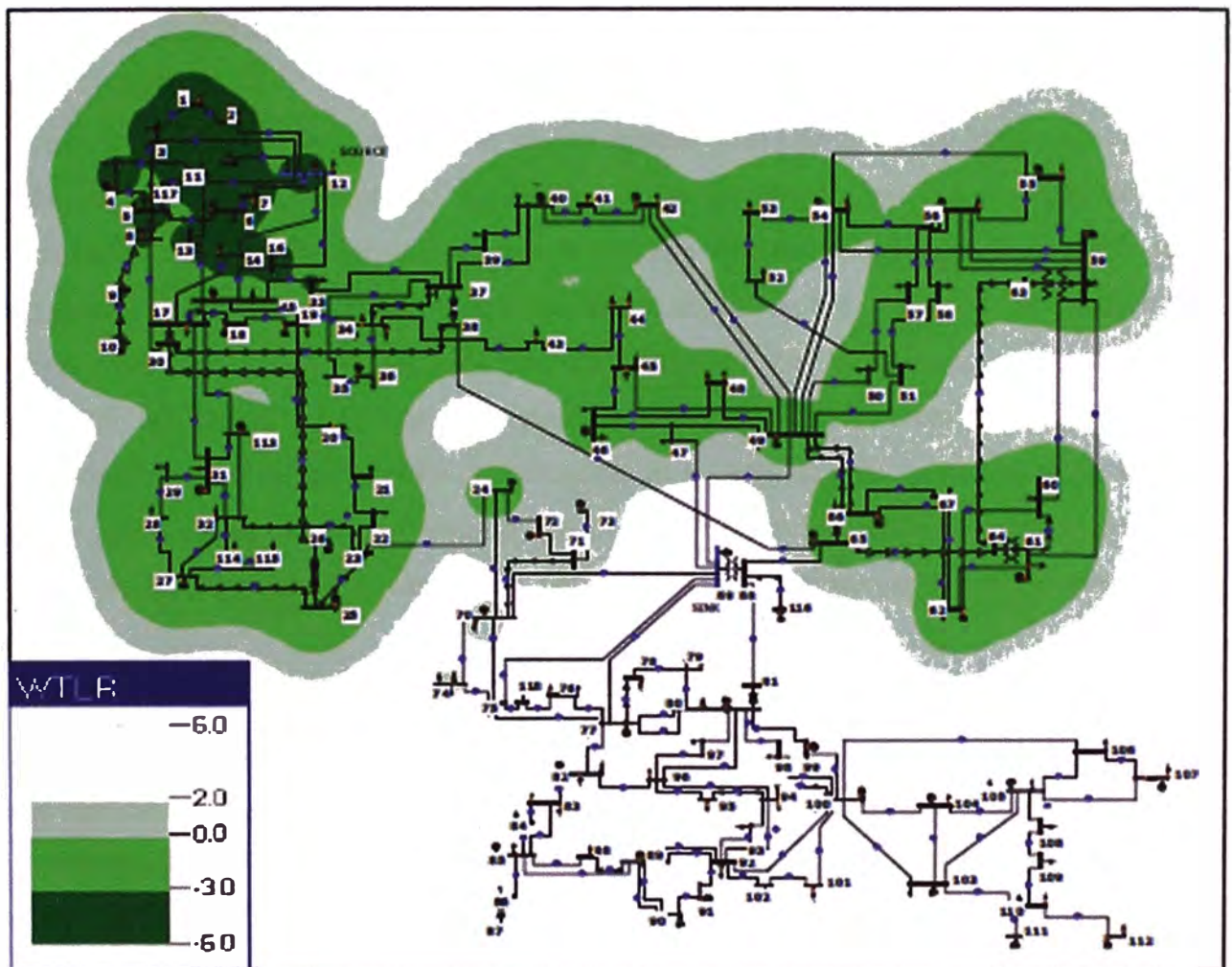


Fig. 3.7 Visualización WTLR del sistema anterior. Fuente [26]

El WTLR de una barra es un indicador que se aproxima al cambio total en el sistema de AMWCO que se obtendrían con una inyección de 1-Megavatios en una barra particular. El WTLR representa el valor de ubicación de la prestación de seguridad obtenidos con la nueva generación y se mide en AMWCO por Megavatio instalado.



### 3.8 Confiabilidad

La confiabilidad de los sistemas eléctricos donde se aplica la generación distribuida fue bien estudiado por Richard E. Brown [29]. Investigó el aspecto de la confiabilidad de la generación distribuida mediante el examen de la confiabilidad de un sistema de prueba de tres diferentes curvas de duración de carga que representa la carga residencial, comercial, carga industrial, y la carga de un distrito de negocios.

La red de distribución tiene impactos de medición de la confiabilidad, ya que cambia las características de flujo de potencia de distribución de alimentadores. Considere la posibilidad de un alimentador de diez millas sirviendo diez Megavatios de carga distribuida de manera uniforme. Los diez Megavatios completan el flujo desde la subestación de distribución y poco a poco disminuyen hasta el final del alimentador que se llegó.

Considerar el impacto de la colocación de una unidad de la GD de cuatro Megavatios en el punto medio de este alimentador. En esta situación, la potencia medida al comienzo del alimentador es de seis Megavatios en vez de la carga total del alimentador. Esto puede ser engañoso ya que las transferencias de carga se han medido sobre la base de los datos en la subestación, pero puede ser limitado por más secciones muy cargadas aguas abajo de la unidad de la GD. Allí, la GD de carga puede enmascarar el crecimiento y la previsión de carga causada y las dificultades de planificación. Si la carga en crecimiento no se reconoce por la presencia de la GD, y permitió que crezca demasiado grande, la pérdida de una unidad de la GD durante la carga pico puede dar lugar a sobrecargas e interrupción de equipos.

Si la salida de una unidad de la GD es más que la descendente carga de alimentación, la energía fluirá desde la ubicación de la GD para la subestación. En algún lugar a lo largo de este camino habrá un punto cero donde fluye la corriente. La oportunidad para mejorar la confiabilidad es mayor cuando el punto cero se convierten en el más cercano de la subestación, pero la probabilidad de funcionamiento y la coordinación de las dificultades de protección aumentan también.

Tener un punto cero en la entrada de la subestación es generalmente inaceptable, ya que el resultado será a la inversa del flujo de potencia en el sistema de transmisión.

Si el flujo de potencia de una unidad que va desde la GD hacia la subestación es suficientemente grande, el equipo cerca de la unidad de GD puede experimentar una carga más elevada que si no estaban presentes la GD.

El sistema de ensayo utilizado en su trabajo se muestra en la Figura 3.8. Este consta de dos alimentadores en bucle, cada uno con tres secciones conmutables a cada dos millas de longitud. Cada sección de conmutador también tiene una fusión lateral también de dos millas de longitud. Las fallas se supone que son un 0,1 por milla por año y tiempos de reparación se supone que son cuatro horas. Se supone que los interruptores son totalmente automatizados y capaces de considerar niveles de carga pre-falla de manera que las transferencias de carga se les impiden si se sobrepasará los niveles de carga de emergencia. Cuando con poca carga, cada cliente (las flechas en la Figura 3.8) experimentará una interrupción sostenida existen fallas en el correspondiente lateral y existen fallas en la sección asociada conmutable. Para todas las otras fallas, ya sea sin interrupción o de conmutación automática se producirá que restablece rápidamente la potencia. En este caso cargado ligeramente, cada cliente puede tener 1,6 horas de duración interrupción por año.

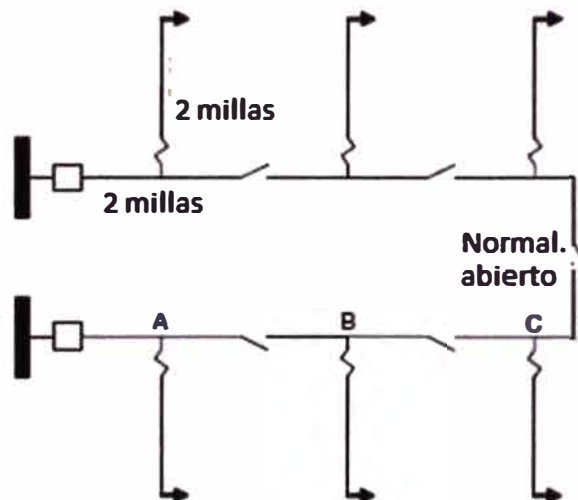


Fig. 3.8 Sistema de Prueba. Fuente [29]

A medida que el sistema se vuelve más cargado, llega un momento en las secciones B y C no se puede restaurar después de una falla en la sección A. Para aún más con mucha carga en el sistema, Sección C no pueda ser rehabilitada en una falla en la sección B. Estas limitaciones se producen cuando la carga necesaria para la transferencia dará lugar en el alimentador conectado a un número superior de emergencia (en todos los casos, todas las cargas son tratados como iguales y los dos alimentadores se supone para la misma emergencia características).

Para explorar los efectos sobre la confiabilidad de la GD en alimentadores de gran medida de distribución de carga, la carga máxima de un alimentador es medido como la carga máxima de alimentación dividida por el alimentador de emergencia. Por ejemplo, si el nivel de emergencia es de 600Amperios y la carga máxima es de 450 Amperios, el pico de

alimentación de la carga es, por definición,  $450 \div 600 = 75\%$ .

Por supuesto, los alimentadores rara vez se cargan hasta los valores de pico. El porcentaje de tiempo que un alimentador es cargado en o por debajo de un valor particular se llama una curva de duración de carga.

En conclusión, aunque estas fuentes de alimentación pueden crear muchas complicaciones, también tienen la capacidad de mejorar la confiabilidad del sistema debido a la eliminación de la reconfiguración post-falla con limitaciones de producción durante las condiciones de carga pesada. Aquí se ha expuesto por este efecto de confiabilidad para un sistema experimental de curvas de duración de carga típica de las zonas residenciales, en el centro de los distritos financieros y comerciales y zonas industriales.

Basado en el sistema de prueba y supuestos de confiabilidad, las siguientes reglas generales pueden ser observadas. Para sistemas de alimentadores que se cargan cerca de sus puntuaciones en el pico de emergencia, la GD mejorará en un 1% por cada 1% de penetración en áreas comerciales e industriales, en alrededor de 1% por cada 2% de penetración en los distritos comerciales, y no son sustancialmente a mejorar la confiabilidad en las zonas residenciales. Estas mejoras en la confiabilidad se deben a la reducción de la post-carga de restauración en falla, que para cerca de 15% la penetración de la GD, y asumir que toda la GD está disponible durante el pico de carga en condiciones de trabajo. Si el sistema de alimentación particular que no está bien representado por el sistema de prueba puede no estar bien representado en el presente reglamento. En estos casos, la confiabilidad de las mejoras debidas a la GD debe ser calculada por el modelado de sistemas de alimentación real en la evaluación de la confiabilidad con software de predicción.

## **CAPÍTULO IV**

### **CASOS DE ESTUDIO DE LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA**

#### **4.1 El Proyecto más grande**

Existe una particularidad debido a la necesidad urgente en Costa Rica por energía eléctrica, por lo que ellos han denominado el proyecto más grande la aplicación de la GD con fuentes de energía solar, biomasa, eólica y la hidroelectricidad.

El objetivo del Plan Piloto actual de Generación Distribuida para Autoconsumo es analizar las nuevas tecnologías de generación a pequeña escala y su efecto en las redes de distribución, con el propósito de diseñar posteriormente programas de desarrollo de la generación distribuida usando fuentes renovables y establecer los ajustes adecuados al sistema eléctrico y al marco tarifario y regulatorio. Para lograr este objetivo, el Plan busca estimular la instalación de pequeños sistemas de generación en el corto plazo, cubre únicamente pequeños sistemas de generación conectados a la red y basados en fuentes renovables, para ser usados para autoconsumo.

En el año 2010 se establecen los principios y fundamentación del Plan, se definen el funcionamiento básico y se elabora la documentación del mismo. La fecha de inicio del Plan Piloto fue el 25 de octubre del 2010, con una vigencia de 2 años y una meta de 5 MW de los cuales 1 MW fue destinado a proyectos del sector residencial.

En octubre del 2012, el Gerente de Electricidad del ICE, aprueba la extensión del Plan Piloto por 3 años más y una ampliación de la meta a 10 MW. Por lo tanto el Plan Piloto estará en proceso de recopilación de información y análisis de barreras para su eliminación y/o disminución, hasta el año 2015.

En los dos meses de vigencia del Plan Piloto del año 2010 solamente un cliente se interconectó. En el año 2011 se conectaron 23 proyectos con un total de 98.29 kW. En el año 2012 se interconectaron 43 clientes con 233.22kW. En la Figura 4.1 se muestran los clientes interconectados y la respectiva potencia total instalada de los años 2010, 2011 y 2012.

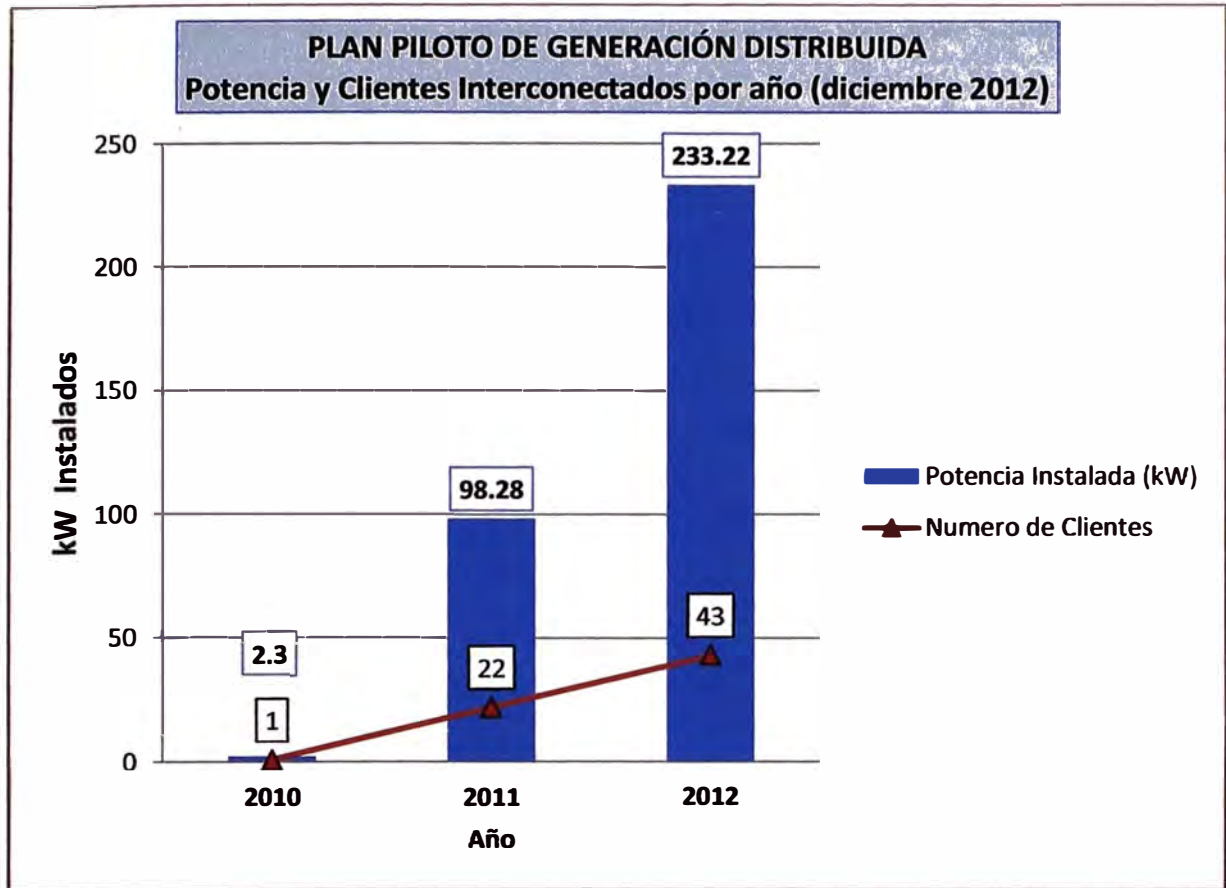


Fig. 4.1 Potencia de los clientes conectados. Fuente [32]

Además de estos proyectos se han visitado clientes potenciales para realizar recomendaciones técnicas para que puedan participar en el Plan Piloto.

Dentro de estos clientes se encuentran algunas agro-industrias que tienen potencial de generación con biomasa, algunos con potenciales de interconexión de hasta 5 MW.

En total se han recibido 73 solicitudes (acumulado) para participar del Plan Piloto, para una potencia de 360.94 kW, sin embargo al momento se han conectado solamente 333.80 kW. Los restantes 27.14 kW se encuentran en proceso de instalación de sus sistemas. En la Tabla 4.1, se muestra un resumen de las solicitudes recibidas.

Tabla 4.1 Resumen de solicitudes recibidas. Fuente [32]

<b>PLAN PILOTO DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA</b>	
Resumen de Proyectos	
Diciembre 2012	
Total Solicitudes Recibidas	73
Total Solicitudes Aprobadas	73
Total Clientes Interconectados	66
<b>Total kW Interconectados</b>	<b>333.80</b>
<b>Total kW</b>	<b>360.94</b>
Pendiente Interconectar	27.14

Las regiones que mayor cantidad de solicitudes han recibido son Brunca San Isidro con 26 y Chorotega con 17 solicitudes cada una.

La Agencia que tiene mayor cantidad de proyectos dentro del Plan Piloto de Generación Distribuida para Autoconsumo sigue siendo Dominical con 19 proyectos para una capacidad instalada de 90.33 kW.

Sin embargo el proyecto más grande en capacidad instalada se ubica en la Agencia de Limón con 31,60 kW y el más pequeño para 0,5 kW en San Isidro del General. Esto se muestra en la Tabla 4.2. De las 73 solicitudes presentadas la mayoría son sistemas fotovoltaicos

- 66 sistemas fotovoltaicos
- 1 eólico
- 3 microhidro
- 3 sistemas híbridos:
  - 2 sistemas fotovoltaicos con sistemas eólicos
  - 1 sistema fotovoltaico con una planta hidroeléctrica

Del total de proyectos aprobados en el Plan Piloto, un 75 % son del sector residencial, un 21% son del sector general, en su mayoría hoteles y pequeños negocios, y un 4% están ubicados en instalaciones de Parques Nacionales.

Un evento que ha ayudado a impulsar la participación de clientes en el Plan Piloto ha sido la modificación al artículo 38 de la Ley 7447 (Regulación del uso racional de la energía), que exime del pago de impuestos a equipos generadores de electricidad a pequeña escala como son fotovoltaicos, eólicos, micro-hidros, etc.

Un acontecimiento de relevancia para el Plan Piloto es que el día 15 de abril del año 2011, se publica en el Diario Oficial La Gaceta No. 74 la directriz No. 14 del MINAET, donde se incentiva el desarrollo de sistemas de generación de electricidad a pequeña escala para autoconsumo, utilizando fuentes renovables de energía como solar, eólica, biomasa y la hidroelectricidad a pequeña escala; así como las aplicaciones de cogeneración de electricidad y calor.

Tabla 4.2 Plan piloto de la GD. Fuente [32]

<b>PLAN PILOTO DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA</b>			
Solicitudes por Agencia			
Diciembre 2012			
<b>REGIÓN</b>	<b>AGENCIA</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>POTENCIA INSTALADA (Kw)</b>
<b>BRUNCA RIO CLARO</b>	Puerto Jimenez	3	8.94
	Ciudad Cortes	1	2.20
	<b>Total</b>	<b>4</b>	<b>11.14</b>
<b>BRUNCA SAN ISIDRO</b>	Dominical	19	90.30
	San Isidro	4	4.77
	Pejibaye	2	6.00
	Las Mercedes	1	2.00
	<b>Total</b>	<b>26</b>	<b>103.07</b>
<b>CENTRAL</b>	Alajuela	2	2.21
	Atenas	1	1.88
	Grecia	4	8.99
	San Ramón	1	4.00
	Puriscal	2	13.24
	<b>Total</b>	<b>10</b>	<b>30.32</b>
<b>CHOROTEGA</b>	Cañas	1	2.50
	Cobaño	4	29.65
	Coyote	2	3.92
	Guayabo	2	4.10
	La Cruz	1	5.46
	Liberia	2	9.87
	Los Chiles	1	1.44
	Nosara	4	28.99
	<b>Total</b>	<b>17</b>	<b>85.93</b>
<b>LIMON</b>	Limon	1	31.60
	Bribri	3	11.58
	<b>Total</b>	<b>4</b>	<b>43.18</b>
<b>PACIFICO CENTRAL</b>	Esparza	1	2.30
	Jaco	4	49.93
	Parrita	3	17.92
	Quepos	3	14.15
	Puntarenas	1	3.00
	<b>Total</b>	<b>12</b>	<b>87.30</b>
<b>TOTAL PAIS</b>		<b>73</b>	<b>360.94</b>

El artículo 2º dice: “Las instituciones del Subsector Electricidad deberán elaborar y poner en marcha, planes piloto de desarrollo de la generación distribuida para autoconsumo, en los que el cliente del servicio eléctrico, pueda instalar su propio sistema de generación de electricidad conectado en paralelo con la red de la distribuidora...”.

En el artículo 5° se *“Solicita a la Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos, preparar la reglamentación necesaria que permita que la actividad de generación distribuida pase de una etapa piloto a programas y proyectos de alcance nacional.”*

A raíz de la publicación de la directriz No. 14 del MINAET, la Dirección de Servicios de Energía de la ARESEP propone un reglamento técnico para que las empresas del Subsector Electricidad analicen y realicen los comentarios para que éste regule la actividad de generación distribuida. La Dirección de Servicios de Energía elevó la propuesta al Regulador General, señor Dennis Meléndez Howell en enero del 2012 para su presentación a la Junta Directiva, y que a su vez ésta lo someta a un proceso de audiencia pública.

Las barreras legales y regulatorias están ligadas al quehacer de las instituciones involucradas. Por lo tanto, parte de las actividades ejecutadas y en proceso de ejecución son visitas y encuentros con los diferentes actores participantes de este tipo de iniciativas. Se incluyen empresas privadas dedicadas al tema de energías renovables, otras empresas distribuidoras, ministerios, entidades financieras, etc.

Uno de los aspectos propuestos para investigación en el Plan Piloto fue realizar análisis financieros de las diferentes tecnologías de energías renovables a pequeña escala para determinar la viabilidad de implementación en nuestro país.

Algunos bancos cuentan con financiamiento para energías renovables a pequeña escala, sin embargo en el país hay otras organizaciones que tienen fondos que se pueden adecuar a este tipo de proyectos. Los entes financieros solicitan al interesado una garantía para darles el préstamo, estas garantías son dinero en sus cuentas, o propiedades que respalden el dinero entregado. Se han sostenido reuniones con personal de estos entes para analizar la posibilidad de que la garantía sea los equipos del proyecto. Estos indican que debiera crearse un seguro que cubra a los posibles deudores que no puedan cumplir los compromisos de pago del préstamo. En este momento se está promoviendo el financiamiento de algunos proyectos a la pequeña industria (PYMES), a través del Proyecto ARECA (Acelerando las Inversiones en Energía Renovable en Centroamérica y Panamá), mediante fondos provenientes de instituciones como GEF, PNUD, BCIE y la banca estatal.

### **Efectos en la red de distribución**

Se realizó análisis de informes (en campo y mediante simulaciones), realizados a nivel mundial (España, USA, Argentina, Alemania) para determinar los efectos de la generación distribuida en las redes de distribución. Los estudios indican:



- La generación distribuida a pequeña escala no tiene impacto significativo sobre las redes de distribución y tiende a mejorar los niveles de tensión en la red eléctrica adjunta.
- La afectación de las perturbaciones a la red eléctrica de baja y media tensión de pequeños sistemas de generación distribuida a base de fuente solar fotovoltaica, eólica y biomasa es mínima y casi despreciable.
- Fluctuaciones, huecos (sags), elevaciones (swells) y niveles de tensión no tienen mayor impacto en la red eléctrica a raíz de proyectos de generación distribuida a pequeña escala.
- Conforme se incrementa y se concentra la generación distribuida en una zona específica (aun no se da en el caso de nuestro país), por ejemplo, una urbanización grande de casas y edificios, los estudiosos recomiendan evaluar mediante mediciones en sitio las variables que pueden distorsionar la señal eléctrica de la red de distribución. Con mayor frecuencia se debe analizar el contenido de las armónicas de la energía solar fotovoltaica y el aporte de los inversores en la generación de armónicas, para que no superen el nivel máximo permitido por las normas establecidas.

#### **4.2 Casos de estudio de la generación distribuida con Biomasa**

La Generación Distribuida ha comenzado a ganar importancia en todos los países y puede llegar a ser la respuesta para aumentar la potencia porque la falta de energía conduce a la interrupción de servicio que conduce a un sistema de potencia inseguro y poco confiable. A continuación se describe dos casos de la aplicación de esta filosofía con el uso de la biomasa en forma sencilla pero muy beneficiosa para comunidades en desarrollo.

##### **Caso I**

En esta parte se va a considerar un caso de estudio de un pequeño pueblo de Maharashtra (India) llamado Khopoli. La población total de este distrito es un total de 65000 pero tiene alrededor de 150 pequeñas industrias a gran escala en este lugar y alrededores. El consejo municipal que aquí tuvo que enfrentar el problema de la gestión de los residuos generados. Así que han comenzado una planta de conversión de biomasa que genera energía eléctrica suficiente para iluminar las luces de la calle. La generación diaria de residuos en Khopoli es entre mínimo 300 y 400 kg de residuos recogidos. Es en forma de basura, sedimentos recuperados de los desagües y las varios fuentes de residuos son los residuos domésticos, hotel y el restaurante de residuos, los residuos de mercado, eliminación de sedimentos del drenaje residuos y desperdicios podridos vegetales. Se recoge mediante el uso de sistema de encintado de recogida y se eliminará finalmente fuera a un gran campo abierto situado a 8 km del municipio principal. La planta entonces se llena de agua en la que los

desperdicios animales, drene el agua sucia y podrida. El material es a continuación, cargado al digestor después de 10 días de descomposición. Los residuos se agitan y digerido manteniendo la temperatura a nivel deseado. La alimentación regular y el horario a continuación, removiendo seguido con regularidad. La planta está situada en el espacio abierto que suficiente luz solar como la temperatura se mantendrá entre 15°C a 30°C para tener una óptima generación de gas. Se ha comprobado experimentalmente que bacterias metano-génicas crece mejor en la temperatura de 33 a 40°C y la tasa de generación de gas aproximadamente duplica por cada aumento de temperatura de 10°C.

El gas liberado se da entonces a una turbina de gas que es acoplado a un generador que convierte la energía de bio-energía eléctrica y se utiliza por la carga del municipio. Los experimentos también van a utilizar este gas como combustible alternativo los medios de transporte municipales. Algunas de las medidas de precaución también se toman por ellos como por ejemplo:

1. Temperatura del digestor se mantiene constante.
2. La pendiente mínima del 1% se mantiene con el transporte del gas.
3. La planta de la cubierta no se abre de repente.
4. Khopoli tiene una larga temporada de los monzones así que el cuidado se toma para ver que el agua del monzón no se mezcla con la pasta.
5. La cubierta de plástico da la creación de "efecto invernadero" se utiliza para mantener la temperatura.

## **Caso II**

Una fábrica de acero llamada Bhushan Steel y Pvt. tiras. Ltd. Qué está a sólo 8 km del municipio principal de Khopoli ha iniciado la generación de energía por el método de recuperación de calor. La energía térmica que se desperdicia en su horno se recupera y se utiliza para producir vapor y generar energía. El punto básico en la generación de energía es utilizando el calor liberado por el líquido es decir, el combustible fueloil. Se han utilizado dos generadores diesel conjunto para generar energía. Cada sistema puede producir 12 MW y la capacidad de reserva es de 12,6 MW. La eficacia de los dos conjuntos son 97%. El sistema sólo tiene un inconveniente de que es el factor de potencia es muy baja sólo 0.7. Ambos conjuntos son eléctricamente sincronizados y funcionan en paralelo. La carga distribución se realiza tanto manual y modo automático. Aproximadamente 200 galones de combustible se consume por kWh pero varía según la calidad de los combustibles y la energía que se generará.

El escape de gas que se genera también se utiliza para la fabricación de vapor, que a su vez se utiliza para diferentes medios como el aire, productos químicos fascinantes, etc. La energía generada es suficiente para cumplir con sus demandas de energía y hacerlos autosuficientes. También están planeando vender la energía adicional a las cercanas industrias. Este tipo de generación de energía se aplica comúnmente con la tecnología de hoy en día y es fácilmente disponible. Las utilidades favorecen este tipo de generador móvil conjuntos montados en remolques para que puedan ser trasladados a sitios donde sea necesario. Los grupos electrógenos diesel son muy populares entre los usuarios finales para volver a usarlos. Pero uno de los graves inconvenientes de esta tecnología es de alta emisión de NOx y SOx. Esto limita severamente el número de horas de operación y las unidades generados. Así son populares sólo en la cogeneración de calor y de cogeneración.

### **4.3 Aplicación en otros países**

Actualmente, los gobiernos de varios países han visto la conveniencia de actuar para que las energías renovables encuentren mayores oportunidades en los mercados mediante su uso como generación distribuida, lo cual ha dado algunos beneficios técnicos y económicos expuestos en este trabajo.

#### **Caso de Alemania**

En Alemania [30], la ley concebida con el nombre de “Acto para la venta de electricidad a la red” fue establecida en 1990, resultando ser una poderosa arma para el desarrollo de esta industria, pues garantizaba un precio fijo para la electricidad producida por generadores eólicos. Gracias a este incentivo, la industria alemana de la energía eólica pasó de tener una capacidad instalada de solamente 10 MW en 1989, hasta lograr para fines de 1999 una capacidad de 4,400 MW, exportando además dicho aprendizaje tecnológico a unos 20 países en todo el mundo ese mismo año. Como resultado de esa capacidad exportadora, la tasa promedio de crecimiento anual de este mercado fue de un 58% entre 1993 y 1999, cifra comparable sólo con industrias tan explosivas como los sectores de la computación y las telecomunicaciones, logrando además la creación de cerca de 25,000 nuevos empleos, con un volumen anual de negocios superior a los 2,300 millones de dólares en 1999.

Posteriormente y sobre la base experimentada gracias a los resultados de la ley anteriormente expuesta, el Parlamento Alemán adoptó una nueva ley a comienzos del año 2000, denominada como “Ley de energías renovables” y con la cual se ha intentado continuar el apoyo que ha sido crucial para el crecimiento de las energías limpias asociadas a la generación distribuida en un mercado liberalizado. Esta nueva ley fija precios

específicos para la energía producto de fuentes renovables, acotadas en tiempo según el tipo y el tamaño de las plantas a construir, y con base en costos reales; de esta manera, se retribuye a los pequeños generadores la contribución que hacen a la reducción de emisiones de gases con efecto invernadero y al ahorro en las reservas de combustibles fósiles.

De esta forma, un objetivo económico importante de esta segunda ley es apoyar el establecimiento de un mercado auto sostenido para las energías renovables asociadas a la generación distribuida, pues opera sobre la base de un esquema de remuneraciones que pueden durar hasta 20 años por planta, para instalaciones que requieran mayores períodos de amortización. Según el Ministro Federal para el Medio Ambiente de Alemania, el sistema de remuneraciones establecido no significa abandono de los principios de mercado, sino que crea la seguridad necesaria para las inversiones en energías renovables bajo las actuales condiciones de mercado. Como objetivos a mayor plazo, existen fundamentados estudios para creer que producto de la implementación de esta ley, las emisiones de CO<sub>2</sub> en Alemania se reduzcan al menos en un tres por ciento para el año 2010 y que la contribución de las energías renovables mediante generación distribuida a la producción total de energía en ese país, sea superior al 10% el mismo 2010.

La Reforma al impuesto ecológico, establecida en 1999 y que estará vigente hasta el presente año, pretende ser otro instrumento garantizador de mayores proyecciones al uso de energía producto de fuentes renovables para generación distribuida, ya que con ella el gobierno alemán reduce a los trabajadores su carga fiscal, pero la transfiere a las actividades que involucren el uso de recursos naturales no renovables y también a las que generan impactos negativos sobre el medio ambiente. En otras palabras, esto significa que los impuestos sobre la energía convencional se incrementan en pasos pequeños pero calculados, mientras que las contribuciones fiscales de los trabajadores, destinadas fundamentalmente a servicios para el bienestar social, se reducen en forma proporcional; así, el gobierno busca no sólo mejorar el medio ambiente sino además promover la creación de empleos asociados con actividades en energía renovable, ahorro y uso eficiente de la energía, con lo cual se estaría combatiendo el desempleo y, en consecuencia, el gasto en beneficios sociales para los desempleados.

La ley aborda de manera explícita el caso de las energías renovables asociadas a la generación distribuida, pues establece una exención al impuesto sobre electricidad para aquellos autogeneradores con capacidades menores a 2 MW (10 MW para minicentrales

hidroeléctricas).

### **Caso de España**

Como segundo caso de análisis de un mercado asociado activamente a las energías renovables y generación distribuida, se tiene a España. Después de la crisis energética de 1973, España comenzó los denominados “Planes Energéticos Nacionales”, que trajo como consecuencia el establecimiento del “Primer Plan de Energías Renovables” en 1986, seguido por el “Plan de Energías Renovables 1989-1995”, y el “Plan de Fomento de las Energías Renovables en 1999”. Consecuente con dichos planes, la Ley del Sector Eléctrico Español estableció desde 1997, un trato especial a este tipo de tecnología, de modo de garantizar el acceso a la red para los generadores distribuidos localmente que utilizan energías renovables, y establecer una prima en el precio de la electricidad proveniente de estas fuentes de energía.

Fue así como durante el mes de diciembre del año 1998, se emitió el “Real Decreto 2818” mediante el cual se establecen los procedimientos administrativos para adaptarse y acogerse al nuevo régimen especial, tanto en las tarifas como en las relaciones entre los productores con energía renovable y las empresas distribuidoras de electricidad.

Actualmente, el denominado “Plan de Fomento de las Energías Renovables en España 2000 – 2010” establece objetivos energéticos, socioeconómicos y medioambientales específicos para ese país, de modo que se espera que para el año 2010, la participación de estas formas de energía en el consumo primario será de 12.3%, el doble de lo que es actualmente.

### **Caso de Chile**

El potencial de masificación de la GD se sustenta en los siguientes factores: aumento en la calidad del suministro eléctrico, evitar o atrasar inversiones en líneas y transformadores de distribución, disminución de pérdidas óhmicas y protección al medioambiente. La reestructuración de los sistemas eléctricos en base a la creación de mercados competitivos, incentiva la introducción de nuevos agentes y productos, la asociación de clientes y la especialización de Empresa de Distribución (ED) como suministradores de energía (comercialización) y como proveedores de servicios complementarios. En este escenario es factible desarrollar sistemas de formación de precios competitivos para los distintos productos y servicios. En este contexto, el objetivo chileno es contribuir al conocimiento del potencial de integración de unidades de GD, a través de un modelo de mercado de adquisición de energía de una ED, que respetando sus restricciones técnicas realiza

compras de potencia activa y reactiva a estas unidades dentro de su área de control. La aplicación de las tecnologías asociadas a GD, de las estructuras de mercado y productos ofertados entrega las bases para proponer un modelo matemático del proceso de adquisición de energía (denominado Distributed Generator Optimal Dispatch, DGOD) por parte de una empresa de distribución en cuya zona de concesión operan unidades de GD propias y de terceros.

La participación de la Generación Distribuida como nuevo agente de Mercado Chileno interviene directamente en la tradicional segmentación del sector eléctrico, requiriendo nuevas normativas y una reglamentación clara que permita una adecuada compatibilidad entre los distintos elementos componentes del sistema eléctrico. La variabilidad de precios de fuentes primarias de energía (petróleo, gas), la dependencia energética y la búsqueda del aseguramiento del suministro eléctrico hacen que Chile no esté ajeno al crecimiento sostenido de la penetración de la GD en el mundo, en donde los cambios introducidos al marco normativo por medio de las Leyes N° 19.940 y N° 20.018 (Ley Corta I y II respectivamente) buscan fomentar y regular la generación eléctrica primordialmente con energías renovables no

Convencionales (ERNC), incluyendo Pequeños Medios de Generación (PMG), Medios de Generación No Convencionales (MGNC) y Pequeños Medios de Generación Distribuidos (PMGD). La anterior regulación se encuentra concentrada en el Decreto N° 244 y su correspondiente Norma Técnica de Conexión y Operación (NTCO).

### **Caso de Colombia**

Durante el año 1991 se presenta en Colombia la más fuerte sequía de los últimos cuarenta años, debida al denominado fenómeno de “El Niño”. Este fenómeno meteorológico puso en evidencia la vulnerabilidad del sector eléctrico colombiano. La caída en el nivel de los embalses de las centrales hidroeléctricas y el lento desarrollo de algunos proyectos de generación, así como la paralización de otros, resultado de los problemas financieros existentes en las empresas estatales responsables, se suma a la falta de mantenimiento de las centrales térmicas del país, lo que desencadena una crisis energética y un racionamiento energético de trece meses (marzo de 1991 hasta abril de 1992). Este acontecimiento lleva a acelerar los cambios estructurales previstos para el sector (entre los que se cuenta el aumento de la disponibilidad de las centrales termoeléctricas, la construcción de nuevas centrales térmicas de generación y el cambio en las políticas de generación, transmisión, distribución

y compra/venta de energía los cuales configuran parte del actual estado de la energía eléctrica en Colombia. Para el 2002 se generan en el sistema de interconexión nacional 45.242,3 GWh, de los cuales el 74,6% proviene de recursos hídricos, 17,6% de plantas que operan con gas natural, 4,4% de plantas que operan con base en carbón mineral, y el restante 3,4% de plantas menores, autogeneradores y cogeneradores.

Estos factores han definido la activa participación de la GD en Colombia, especialmente de las energías renovables, que junto al incentivo proveniente de las políticas estatales, son piezas fundamentales para lograr un posicionamiento efectivo y permanente de la GD en el sistema energético de un país. Aunque en Colombia el desarrollo e implementación de energías renovables resulta un proyecto a largo plazo, existe la posibilidad del empleo de energías convencionales, basadas fundamentalmente en combustibles fósiles, que permitan de forma eficiente y limpia la generación de energía eléctrica no centralizada, empleando sistemas de producción con energía renovable. Esta alternativa ha complementado el enfoque renovable en la generación eléctrica en muchos países europeos. Sin embargo, aún en este caso el apoyo e incentivo estatal a este tipo de generación es vital para el surgimiento de esta alternativa en un país. Aunque estas políticas de apoyo e incentivo, en el actual estado del sistema eléctrico nacional colombiano, no se encuentran implementadas de forma concreta, la actual organización del sector da cabida a mecanismos de incentivo para el desarrollo de sistemas basados en energías renovables, así como para la implementación de tecnologías que aumenten la eficiencia de los procesos de generación y el desarrollo de iniciativas para llevar energía a zonas no interconectadas (función desempeñada por el IPSE-Instituto de Promoción de Soluciones Energéticas para Zonas no Interconectadas, a través del Fondo de Apoyo Financiero para la energización de Zonas no Interconectadas - FAZNI). Para este caso (sector eléctrico colombiano) se plantea que la GD puede ofrecer cuatro beneficios principales como: (i) Diversificar las fuentes de energía destinadas a la generación eléctrica, la cual en la actualidad se encuentra limitada por la capacidad en las fuentes hídricas, permitiendo al país aumentar el nivel de respuesta del sistema eléctrico ante situaciones que comprometan la integridad del mismo, tales como sequías, atentados terroristas y otros. (ii) Fortalecer la dimensión social en la prestación de servicios públicos fundamentales, posibilitando el suministro eléctrico en áreas rurales apartadas y desintegradas de la estructura de interconexión eléctrica. (iii) Permitir al sector industrial aumentar la eficiencia y reducir los costos en la producción, con el suministro de energía confiable, de

calidad y a precios estables que sean independientes de la hora de consumo. (iv) Ofrecer nuevas oportunidades de negocio para la comercialización de energía en la bolsa, con la conexión de plantas de GD en el sistema de interconexión eléctrica nacional, que puedan suplir la creciente demanda energética en el país.

#### **4.4 Aplicación en el Perú**

En nuestro país aún no se ha propuesto la aplicación de la Generación Distribuida, ni se han dado las bases legales para viabilizar su aplicación. Sin embargo, desde el año 2008 se promueve el uso de la energía renovable para la generación; en dicho año se convocó a una subasta por primera vez, quedando favorecida algunas empresas nacionales y extranjeras para utilizar la energía eólica, solar y geotérmica. Lamentablemente hasta la fecha no se ha construido plantas de generación geotérmica ni parques eólicos como se programó, mientras que existe en Moquegua una planta de generación solar en construcción con potencia mínima.

Existe, asimismo la tendencia a la cogeneración sobre todo por parte de algunas empresas azucareras del norte y la generación con biomasa por parte de la empresa Petromas en la localidad de Huachipa– Lima; con una potencia instalada de 4.8 MW.



## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **Conclusiones**

1. En el presente informe se presenta un breve estudio sobre los impactos provocados por la conexión de los generadores de inducción y generadores síncronos a las redes de distribución bajo la filosofía de la Generación Distribuida.
2. Se puede concluir, que desde el punto de vista de operación en estado estacionario, el perfil de tensiones, la estabilidad de voltaje y estabilidad transitoria, es más ventajosa con el uso de generadores síncrono de tensión constante para aplicaciones de la GD.
3. El uso de generadores de inducción puede ser interesante en redes que sufren de limitaciones relacionadas con el aumento en los niveles de corto circuito.
4. En el caso de que la tensión cae abruptamente, el uso de generadores síncronos de voltaje constante pueden mejorar la operación dinámica en el punto de instalación.
5. El uso de generación distribuida es una de las muchas estrategias para que las centrales eléctricas tengan la posibilidad de operar sus sistemas en el entorno liberalizado independientemente del operador del sistema.
6. Varias tecnologías ya sea en niveles de baja tensión, en media tensión o sistemas aislados han mostrado una gran promesa cuando se aplica la GD. Entre ellos: el alivio de la congestión, reducción de pérdidas, el apoyo de tensión, picos, y una mejora general de la eficiencia energética, confiabilidad y calidad de la energía.
7. En este documento también se considera el beneficio, en el caso de la pérdida de una línea simple de distribución radial con la carga conectada en el extremo y un generador de aplicación de GD. Los resultados indican claramente que la GD puede reducir el efecto de la pérdida de dicha línea eléctrica.
8. Los beneficios económicos obtenidos por la introducción de la GD debe compararse con los costos implicados antes de decidir sobre el uso de la GD. Verificar que las tecnologías de la GD mejoran y disminuyen los costos, por lo que su utilización en los países en vías de desarrollo, se espera que aumente.
9. En este informe se observa que, en los países donde se aplicó la GD (España, USA,

Argentina y Alemania), se verificó los efectos en la calidad de energía es mínima y despreciable y no tiene impacto significativo más bien ayuda a mejorar los niveles de tensión en la red adjunta expuesta en la literatura internacional.

10. En términos generales, al implementar proyectos de GD lo que se busca es aumentar la calidad de energía, entendiendo por esto: contar de forma ininterrumpida con la energía eléctrica, con sus adecuados parámetros eléctricos que la definen acordes a las necesidades.

### **Recomendaciones**

1. La posibilidad de resolver eficientemente la ubicación óptima y el tamaño de generaciones distribuidas a través de un programa de Algoritmos Genéticos es importante.
2. Diferentes funciones objetivos deben probarse, con el fin de dar cuenta de los diferentes beneficios de GD (minimización del costo de las pérdidas de potencia)
3. La técnica de optimización para la aplicación de la GD es de cálculo intensivo, pero esto es ventajoso si comparamos a una exhaustiva investigación sobre redes de distribución de tamaño real.
4. En el análisis del informe realizado a nivel mundial según la literatura internacional expuesta, los estudiosos recomiendan evaluar mediante mediciones en sitio las variables que puedan distorsionar la señal eléctrica de la red de distribución cuando se incrementa y se concentra la generación distribuida en una zona específica.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] CRAWFORD, D. M., HOLT, S. B., JR., "A mathematical optimization technique for locating and sizing distribution substations, and deriving their optimal service areas." Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on: Vol:94: (#2): 230235. 1975
- [2] SALAMAT SHARIF, S., SALAMA, M. M. A., "Optimal model for future expansion of radial distribution networks using mixed integer programming". Electrical and Computer Engineering, 1994.Conference Proceedings.1994 Canadian Conference on. 1994.
- [3] EL-KHATTAM, W., HEGAZY, Y., "Stochastic estimation of the contribution levels of customer operated distributed generation". Power Engineering Society General Meeting, 2004. IEEE. 2004.
- [4] GÖZEL, T., HOCAOGLU, M. H., et al. (2009). "An analytical method for the sizing and siting of distributed generators in radial systems." Electric Power Systems Research: Vol:79:(#6):12918,Consulta:<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V304VGDNPX3/2/903bbe687e9e4782d45dd93fa53434bd>.
- [5] KURI, B., LI, F., "Distributed generation planning in the deregulated electricity supply industry". Power Engineering Society General Meeting, 2004. IEEE. 2004.
- [6] BERG, A., KRAHL, S., "Cost efficient integration of distributed generation into medium voltage networks by optimized network planning". Smart Grids for Distribution, 2008.IETCIRED.CIRED Seminar.
- [7] CORMIO, C., DICORATO, M., et al. (2003). "A regional energy planning methodology including renewable energy sources and environmental constraints." Renewable and Sustainable Energy Reviews: Vol:7: (#2): 99130, Consulta:<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6VMY47X1M271/2/bd4caa6019476063d34182d85e247cfb>
- [8] M. A. GALLEGOPRECIADO, T. G., JESÚS P. PECO, JUAN RIVIER ,“A mixinteger NLP approach for subtransmission expansion planning”. I Congreso de la Asociación Española para la Economía Energética (AEEE), Madrid, España. 2006.
- [9] KEANE, A., O'MALLEY, M., "Optimal Allocation of Embedded Generation on Distribution Networks." Power Systems, IEEE Transactions on: Vol:20: (#3): 16401646. 2005.

- [10] DICORATO, M., FORTE, G., et al. (2008). "Environmental constrained energy planning using energy efficiency and distributed generation facilities." *Renewable Energy*: Vol:33: (#6): 12971313, Consulta:<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V4S4PYMWMM1/2/7e28b950e7cfa99222e24b9043858c14>
- [11] NARA, K., HAYASHI, Y., Application of tabu search to optimal placement of distributed generators. *Power Engineering Society Winter Meeting*, 2001. IEEE.
- [12] ASAKURA, T., GENJI, T. "Longterm distribution network expansion planning by network reconfiguration and generation of construction plans." *Power Systems, IEEE Transactions on*: Vol:18: (#3): 11961204. 2003.
- [13] ATWA, Y. M., ELSAADANY, E. F., "Optimal Allocation of ESS in Distribution Systems With a High Penetration of Wind Energy." *Power Systems, IEEE Transactions on*: Vol:PP: (#99): 11, Consulta:10.1109/TPWRS.2010.2045663. 2010.
- [14] SOROUDI, A. & EHSAN, M. "A distribution network expansion planning model considering distributed generation options and techno economical issues." *Energy*: Vol:35:(#8):33643374,Consulta:<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V2S504CNBC1/2/13ea9cda31c91eb01a113db1f16ff1aa>. 2010.
- [15] L. Solero, F. Caricchi, F. Crescimbin, o. Honorati and F. Mezzetti, "Performance of a 10 kW Power Electronic Interface for Combined Wind/PV Isolated Generating Systems," *Proceedings of IEEE PESC*, 1996, pp. 1027-1032.
- [16] Chen Y.M, Liu Y.C, Wu F.Y and Wu T.F, "Multi-input DC/DC converter based on the flux additivity," *Industry Applications Conference*, 2001. Thirty-Sixth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2001 IEEE, Volume 3, Oct, 2001, pp: 1866 – 1873 vol.3.
- [17] N. Jenkins, R. Allan, P. Crossley, D. Kirschen, and G. Strbac, "Embedded Generation", 1st ed. London, U.K.: Inst. Elect. Eng., 2000.
- [18] J. D. Hurley, L. N. Bize, and C. R. Mummert, "The adverse effects of excitation system var and power factor controller," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 14, no. 4, pp. 1636–1641, Dec. 1999.
- [19] V. Akhmatov, H. Knudsen, A. H. Nielsen, J. K. Pedersen, and N. K. Poulsen, "Modeling and transient stability of large wind farms," *Int. J. Elect. Power Energy Syst.*, vol. 25, no. 1, pp. 123–144, 2003.
- [20] N. Jenkins, R. Allan, P. Crossley, D. Kirschen, and G. Strbac, *Embedded Generation*, 1st ed. London, U.K.: Inst. Elect. Eng., 2000.
- [21] S. K. Salman, "The impact of embedded generation on voltage regulation and losses of distribution networks," *Proc. IEE Colloq. Impact Embedded Generation Distribution Networks*, 1996.

- [22] Liu Zhengyi, ZengXiangjun, Tan Shuntao, GuoZigang ,“A Novel Scheme of Stability Control for Distributed Generation Systems Power System Technology” - POWERCON 2004 Singapore, 21-24 November 2004
- [23] P. Kundur, Power System Stability and Control. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [24] Min Dai, Mohammad N. Marwali, Jin-Woo Jung, and Ali Keyhani “Power Flow Control of a Single Distributed Generation Unit with Nonlinear Local Load” Conference Record of the IEEE 2004.
- [25] O. Samuelsson and S. Lindahl, “On speed stability,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 20, no. 2, pp. 1179–1180, May 2005.
- [26] SantiagoGrijalva, and Anthony M. Visnesky Jr., “Assessment of Distributed Generation Programs Based on Transmission Security Benefits” IEEE Trans. Power Syst, California USA- 2005.
- [27] R.E. Brown, “Modeling the Reliability Impact of Distributed Generation”, IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, vol. 1, pp. 442-446, 21-25 July 2002.
- [28] Y.G. Hegazy, M.M.A Salama, A.Y. Chikhani, “Adequacy Assessment of Distributed Generation Systems Using Monte Carlo Simulation”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, No. 1, February 2003.
- [29] Richard E. Brown “Reliability Benefits of Distributed Generation On Heavily Loaded Feeders” IEEE Trans. Energy Convers, Nov. 2007
- [30] Héctor Vinicio González, “Generación Distribuida por medio de Energías Alternas Renovables y su influencia en la Evolución del Sistema Eléctrico secundario de Distribución Tradicional”, Tesis de Ingeniero, Guatemala, nov. 2008.
- [31] Walmir Freitas, Jose C. M. Vieira, Andre Morelato, Luiz C. P. da Silva, Vivaldo F. da Costa, and Flavio A. B. Lemos. “Comparative Analysis Between Synchronous and Induction Machines for Distributed Generation Applications”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 21, No. 1, February 2006.
- [32] Alexandra Arias. “Plan piloto Generación Distribuida para autoconsumo”, Instituto Costarricense de Electricidad -Gerencia Electricidad, Informe año 2012, Diciembre 2012.