

LOS SERVICIOS AUXILIARES EN REDES DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA EN PRESENCIA DE GRAN CANTIDAD DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICA DE BAJA POTENCIA

THE AUXILIAR SERVICES IN NETWORKS OF ELECTRIC DISTRIBUTION IN PRESENCE OF A GREAT QUANTITY OF LOW POWER FOTOVOLTAIC GENERATION

José Antonio Aquino Robles

Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas del IPN
jaquinor@gmail.com

Cecilia Fernández Nava

Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas del IPN
cfernandezn@ipn.mx

Leonel G. Corona R.

Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas del IPN
lcoronaramirez@hotmail.com

Resumen

Esta investigación tiene como propósito, presentar uno de los problemas que podría impedir la introducción masiva de la generación fotovoltaica, en redes de distribución eléctrica, de acuerdo a la normativa actual. Este problema es debido principalmente a que la curva de demanda de energía no coincide precisamente, con la curva de generación fotovoltaica. Que es la más utilizada en baja y media tensión. Produciendo con ello lo siguiente: A determinadas horas del día se llegarán a tener flujos de potencia eléctrica de los generadores fotovoltaicos hacia la red eléctrica; superando según sea el caso, el consumo propio de cada cliente que instale dichos generadores. El problema será evidente con la introducción masiva de generadores fotovoltaicos y que estos producirán incrementos en los niveles de tensión que podrían superar los niveles permitidos por la normatividad vigente, entre otros problemas más que serán descritos en este trabajo. Ahora bien con los incentivos que existen para promover la generación fotovoltaica domiciliaria, en

México, pronto ésta forma de generación crecerá aún más. Por lo que será necesario trasladar el concepto de servicios auxiliares que se utiliza en los sistemas eléctricos de potencia hacia las redes de distribución eléctrica, con generación distribuida renovable. Este hecho no solo producirá una mayor penetración de la generación renovable lo cual por sí mismo ya tiene un impacto medioambiental positivo. De igual forma producirá un impacto social y local, ya que se aprovechará una fuente de energía abundante, aunque dispersa, como lo es la luz solar. La cual es un recurso renovable por excelencia. Y por último se cumplirá con una de las directrices de la hoja de ruta que marcan el camino a seguir por el modelo de mercado de energía eléctrica en México y que es la no discriminación y el libre acceso a la red eléctrica hacia terceros.

Palabra(s) Clave: servicios auxiliares, red eléctrica inteligente, penetración de la generación fotovoltaica en la red.

Abstract

This research is intended to present solutions to one of the problems that could prevent the massive introduction of renewable generation, in electrical distribution networks, in accordance with the current regulations. This problem is mainly due to the fact that the energy demand curve does not exactly coincide with the electric generation curve produced by photovoltaic generation, which is the most used in low and medium voltage. Producing the following phenomenon: at certain times there will be electrical energy flows coming out of the photovoltaic generators, towards the electrical network, achieving thereby exceed the consumption of each customer installing said generators. The problem will be evident with the massive introduction of photovoltaic generators and that these will produce increases in the voltage levels that could exceed the levels allowed by the current regulations. Now with the incentives that exist to promote the home photovoltaic generation, in Mexico, soon this generation will grow even more. As a result, it will be necessary to transfer the concept of auxiliary services that are used in large power systems to electrical distribution networks, with renewable distributed generation. This fact will not only produce a greater penetration of the renewable generation which by itself

already has a positive environmental impact. It will also have a social and local impact, since it will take advantage of an abundant but scattered energy source, such as sunlight. And lastly, one of the guidelines set out in the roadmap that marks the path to be followed by the liberalized markets for electric power in Mexico will be fulfilled and that it is non-discrimination and free access to the electricity grid towards third parties.

Keywords: *auxiliary services, renewable distributed generation, smart grid, penetration of the photovoltaic generation in the grid.*

1. Introducción

Debido a que las redes de distribución y en particular las redes de baja tensión no fueron diseñadas para recibir inyecciones de potencia, se han detectado varios efectos en la red derivados de la conexión de micro generadores [1]. Estos efectos varían con el tipo de generador instalado, así como también con la cantidad de potencia instalada. Al depender de circunstancias particulares como la casuística relacionada con las fuentes renovables, específicamente a fuentes de energía primarias no firmes como la luz solar o la eólica. La generación y microgeneración distribuida puede disminuir o aumentar la calidad de producto técnico (calidad de la energía) recibida por los usuarios de la red de distribución. Por ello los fenómenos claves a analizar en un escenario con generación y micro generación distribuida basada en renovables son:

- El efecto de la amplitud de la onda de tensión, mismo que es un factor clave que limita la cantidad de capacidad de generación y microgeneración distribuida adicional, que se pueden conectar a redes de distribución radiales.
- El desequilibrio de tensión en las redes, dependiendo del tipo de generación (monofásica o trifásica).
- Las variaciones transitorias de tensión, debido a la utilización de inversores en sistemas fotovoltaicos.
- Variación en la frecuencia de suministro en la red.
- El factor de potencia.

- Distorsión armónica en la red de distribución, debida también al uso de dispositivos de electrónica de potencia, tanto en las cargas, como en las fuentes.
- Estabilidad

2. Marco Teórico

Respecto a los efectos de la integración a gran escala de energía fotovoltaica en las redes de distribución eléctrica, en [2], se hace un estudio tanto en las ciudades de Helsinki en Finlandia, como en Lisboa en Portugal en las cuales denota cambios significativos respecto a la producción energética de estas ciudades aún en las mismas épocas del año y con el mismo clima, también menciona que en estas ciudades las curvas de carga difieren significativamente, llegando a la conclusión también de que los diferentes niveles de penetración de la generación fotovoltaica causa un efecto no lineal en la red. Dentro de las soluciones que sugiere, menciona que los transformadores conectados en media y baja tensión pueden tener una influencia significativa para dar cabida a más generación, siempre y cuando el transformador pueda adaptarse a los cambios de tensión causada por la generación distribuida, lo cual implicaría que tuviera un cambiador de derivaciones bajo carga, cosa que un transformador convencional, no puede hacer.

Los resultados de las simulaciones que se hacen en [2] muestran que altos niveles de penetración de generación fotovoltaica puede causar problemas de tensión en la red eléctrica, pero también esto depende del tipo de red.

En [3] se hace un estudio similar respecto a los niveles de tensión en una red con un cierto nivel de penetración de generación fotovoltaica en Australia, coincidiendo con [2], menciona la posibilidad de tener transformadores apropiados, que puedan interactuar con los niveles de tensión para que estos no aumenten más allá de lo establecido en las normativas locales, de acuerdo a sus ensayos determinan que debajo del 50% de penetración, permite tener niveles de tensión, dentro de lo que marca la normativa, sin embargo deja entrever que de tener una mayor penetración de fuentes fotovoltaicas serán necesarios elementos que permitan una más amplia regulación de tensión, como reguladores de voltaje u otros elementos, sí se

requiere una mayor penetración de fuentes fotovoltaicas (acá es donde encuentra cabida la idea de introducir el concepto de servicios auxiliares basados en generadores fotovoltaicos con inversores fuente de tensión (VSI).

En [4] se hace un estudio del impacto de la distorsión armónica de pequeños sistemas fotovoltaicos conectados a la red de distribución de baja tensión en Grecia, con diferentes niveles de penetración y de acuerdo a la normativa europea y americana EN 50160 y IEEE 1159 respectivamente, no muestra violación de los límites armónicos de estas normativas.

En [5] se hace un estudio completo de la calidad de suministro en presencia de generación fotovoltaica incluyendo el análisis de parpadeo o flicker y manifiestan que el efecto del flicker con y sin presencia de generación fotovoltaica es similar y que no viola los límites establecidos en la normativa europea EN 50160.

Respecto al desequilibrio de tensión en presencia de generación fotovoltaica en [6 y 7] se analiza este fenómeno, sin embargo, ambos trabajos terminan recomendando, que se debe planear adecuadamente, en caso de generar en conexión monofásica, aunque lo más recomendable sería utilizar inversores trifásicos, para no causar problemas de desequilibrio de tensiones.

Tradicionalmente, para el diseño y en la operación de las redes de distribución no se necesitaba contemplar los estudios de estabilidad considerando que las redes de distribución eléctrica son de naturaleza pasiva y conservarían su operación en estado estable bajo la mayoría de las circunstancias, siempre y cuando la red de transporte o transmisión opere en estado estable, figura 1.

Incluso actualmente los estudios de estabilidad de los sistemas eléctricos de potencia apenas se considera (la estabilidad en la red) en el nivel de distribución eléctrica, pero ahora con la planeada inserción de generación distribuida renovable y no renovable, es necesario realizar los estudios correspondiente de estabilidad, tanto transitoria, como dinámica y de estado permanente incluso también contemplar casos de colapsos de tensión, obviamente será ya el caso cuando se estime una presencia considerable de generación renovable, ya que su operación implica una alta casuística, no solo considerando que a nivel distribución inyecten energía los pequeños generadores que podrían solo generar para autoconsumo e

intercambio energético, sino también considerando medianos generadores que participen con parques fotovoltaicos ó eólicos de mediana capacidad [8].

Cuando la penetración de la generación distribuida es alta, la energía generada no solo altera el flujo de energía en el sistema de distribución (figura 1), sino también en el sistema de transporte o transmisión en [9] se menciona que esto se podría traducir en incertidumbre en términos de estabilidad, sobre todo si llegará a producirse una gran perturbación.

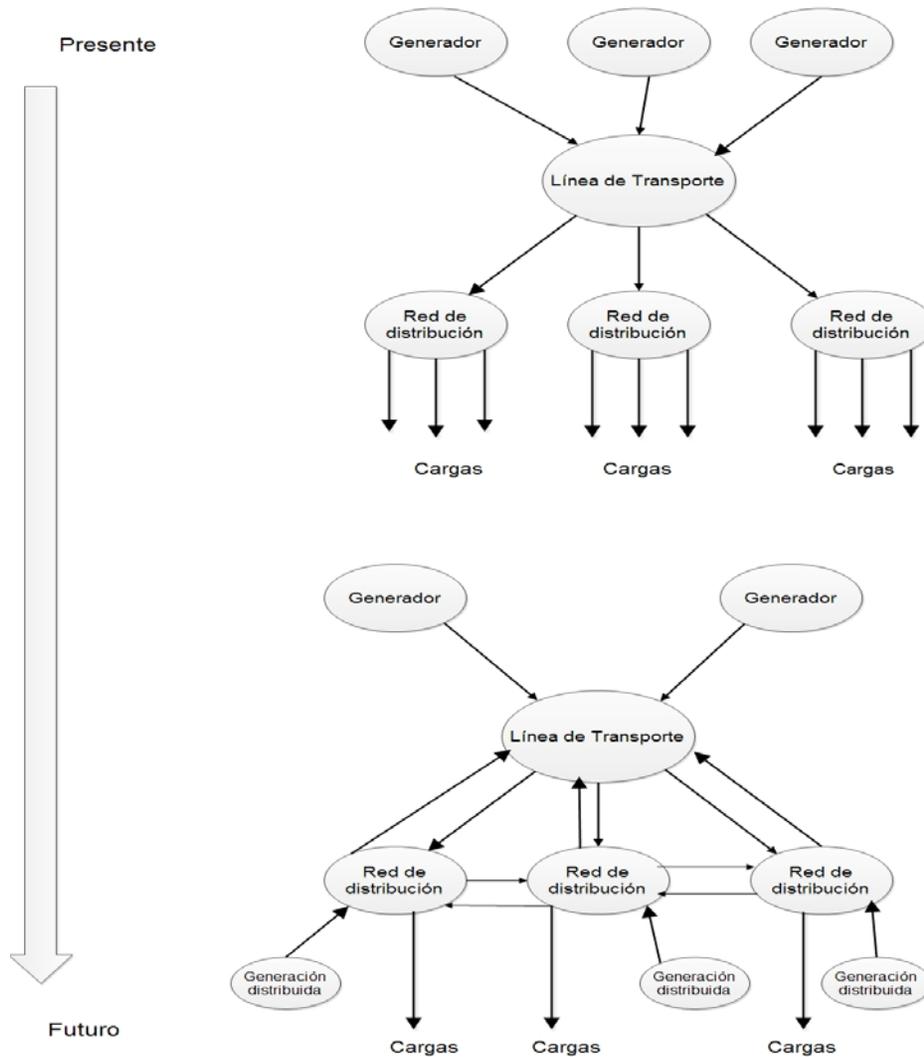


Figura 1 Flujo de energía, pasado y futuro.

En este mismo tenor y ya de manera más reciente en [21], analiza el problema de la penetración de generación fotovoltaica en el estado de california, en donde se

tiene un fuerte impulso gubernamental para evitar colapsos económicos como el de 2001. Buscando que cada cliente se genere parte o toda la energía que consume. Ello con el fin de aprovechar las alternativas de intercambio energético como el que ofrece el esquema net metering. Sin embargo, analiza opciones más elaboradas y más recientemente propuestas por los especialistas en la materia en las que propone una serie de mejoras incrementales en los dispositivos convertidores de energía (inversores) de manera tal que tiendan a la gestión inteligente de las redes eléctricas.

En este mismo contexto en [22], se plantea el caso de Grecia, en la que dadas las condiciones de su sistema eléctrico de potencia, buscan resolver el problema de la amplia inserción de generación fotovoltaica, recomendando que está ya pueda ser gestionada y despachada desde su centro de control de la red, a fin de tener mayor poder de gestión de este tipo de generación incluyendo la posibilidad de que éste tipo de generación participe ya, ofertando servicios auxiliares.

En la revisión del estado actual que se hace en la referencia [23], se analiza ya pasar de la normativa actual en donde se conecta la generación fotovoltaica bajo el concepto conectarse y olvidarse de lo demás, al concepto de dotar de un control coordinado a la generación fotovoltaica, para que la operación de la red de media y baja tensión se lleve a cabo mediante acciones que permitan la interconexión masiva e intensa, pero con una gestión de red dinámica de la red que permita un mejor control de la misma, ante contingencias que anteriormente no se presentaban.

3. Discusión y propuesta

Si consideramos que la estabilidad de tensión se refiere a la operación en estado estable, y los niveles aceptables de tensión en todo el sistema de buses. Y un estado de inestabilidad de tensión cuando una perturbación provoca un deterioro progresivo e incontrolable de la tensión. Será necesario considerar los casos pertinentes de acuerdo a la cantidad de generación distribuida, dispersa por las redes en cuestión y más si se tiene una gran cantidad de generación no gestionable como el caso de la fotovoltaica de nivel micro.

De acuerdo a lo analizado (Calidad de suministro y estabilidad de la red), el problema más severo es mantener los niveles de tensión de acuerdo a los rangos establecidos en las normativas de calidad del producto técnico en presencia de una cantidad considerable de generación y microgeneración, eso, por un lado. Por otro, en la emisión de leyes que promueven el aprovechamiento de las energías renovables en las redes de distribución, que se han propuesto ciertas metas de acuerdo a fechas próximas. Y contar con una cantidad determinada de generación renovable a nivel distribución.

Partiendo de que con las leyes y con los incentivos económicos, se busca promover el uso de estas fuentes renovables [11]. Se presenta con ello un problema que podría incluso causar consecuencias legales, ya que por un lado se fomenta y se incentiva el aprovechamiento intensivo de las fuentes renovables y por otro lado se podría negar la participación de algún cliente que quisiera generar, con el argumento de que exista cierto temor de que el incremento de generación provoque problemas de calidad de suministro [12]. Por tal motivo y de acuerdo con lo expuesto en este trabajo. Se propone un cambio normativo en el contexto de los niveles de penetración de los sistemas fotovoltaicos. Por ello se busca lo siguiente: El desarrollo de criterios de conexión y procedimientos de operación para distribución para facilitar el máximo nivel de penetración de generación distribuida. Y no negar la entrada a ningún consumidor que quiera generar, independientemente de las circunstancias de la red.

En este aspecto se buscará que la generación distribuida renovable sirva también como proveedor de servicios auxiliares para la operación de redes de distribución. Entendiendo por servicios auxiliares: como la prestación de servicios adicionales a la generación de potencia real por los servicios públicos y privados de electricidad, y los servicios que deben ser provistos por separado en un entorno liberalizado [13]. Estos incluyen:

- Suministro de potencia reactiva (absorción e inyección) para lograr el control de voltaje.
- La regulación, la potencia de carga de seguimiento de consumo: funciones que normalmente realiza el control de la generación automática.

- El desequilibrio de energía.
- El control frecuencia
- El uso de la generación para satisfacer las variaciones de carga.
- Los servicios de red: la estabilidad del sistema eléctrico

Cabe señalar que el suministro de potencia reactiva y control de la tensión en el nivel de transporte son la responsabilidad del Operador del Sistema Interconectado, el CENAL en el caso de México. Para tener un impacto en esta área, en la Generación Distribuida tendría que ser agregado un tipo de control parecido. Además, la desregulación puede tener un impacto significativo en la calidad de la energía eléctrica. La energía eléctrica puede estar disponible en diferentes niveles de calidad, (al igual que existen gasolinas con diferente nivel de calidad, dependiendo del octanaje) y claro una alta calidad implicará mayores costos. Esto puede requerir dispositivos especiales, que aún no se inventan.

La generación distribuida puede tener tanto un efecto positivo y un impacto negativo en la calidad de la energía [15]. Esto dependerá del tipo y cantidad de la generación distribuida, así como las interfaces de potencia y esquemas de control utilizados para conectar estas unidades a la red y las funciones que realicen dependiendo del tipo de red y de sus características propias. Lo anterior tiene relación al estudio realizado en [10] en donde se propone la utilización de onduladores fuente de tensión (VSI), el cual a diferencia del inversor fuente de corriente, puede no solo generar potencia activa, sino también potencia reactiva, haciendo operar al inversor fuente de tensión en cuatro cuadrantes, sin embargo, no se ha analizado hasta ahora, la operación de dicho ondulator en redes eléctricas de distribución, para observar su desempeño bajo distintos escenarios de carga y de operación, entre los cuales: el escenario de alto nivel de penetración, en donde podría ser proveedor de servicios auxiliares en la operación de la red, al trabajar de manera conjunta con sistemas ya establecidos con anterioridad basados en inversores fuente de corriente (CSI) y mediante su versatilidad ayudar a la regulación de voltaje y frecuencia.

La idea central de este trabajo busca justamente esta alternativa, puesto que las opciones estudiadas en los artículos mencionados en párrafos anteriores mencionan la inclusión de:

- **Reguladores de tensión**, cuya configuración deberá ser diferente ahora con la inclusión de generación distribuida renovable (crear una nueva generación de reguladores de tensión de acuerdo a las necesidades que están por venir).
- **Transformadores de distribución con cambiadores de derivaciones bajo carga**, lo cual implicaría una nueva generación de estos dispositivos tecnológicos.
- **Dispositivos de compensación de potencia reactiva** que implican también un consumo de potencia activa para su propio funcionamiento.

Sin embargo, todos estos dispositivos anteriores corresponden su operación y modernización a las empresas de distribución, lo cual implica un incremento en los costos para los usuarios cautivos.

La introducción de sistemas fotovoltaicos con inversores fuente de tensión implicará un costo para la persona que desea generar energía, aun cuando la energía que genere sea potencia reactiva, que sirva para la regulación de tensión, lo cual implicará un costo distribuido también.

Aunado a lo anterior vale decir que la mayor parte de la Generación distribuida existente se ha instalado para el autoconsumo e intercambio de energía. Estos, generadores no están equipados todavía con la infraestructura necesaria para prestar los servicios auxiliares. Dicha infraestructura incluye accionamientos, reguladores automáticos de voltaje, dispositivos de potencia reactiva, instalaciones de sincronización, una protección adecuada, monitoreo y servicios de comunicación. Existe entonces toda una gama de implicaciones comerciales, técnicas y políticas de acuerdos comerciales que serán necesarios además de servicios de reserva como mecanismos de mercado. Lo ideal sería que los arreglos actuales empleados en la regulación del sistema y del mercado, pudieran extenderse. Buscando utilizar la infraestructura de menor costo o con un costo

distribuido como se dijo anteriormente, la cual podría facilitar una mayor participación de los pequeños generadores. Los acuerdos comerciales más adecuadas derivados de ello, se deberán discutir una vez disponiendo de los marcos normativos que especifiquen los nuevos servicios de suministro y se extiendan los contratos bilaterales de acuerdo con la naturaleza específica del sitio y de los requisitos de seguridad de la red.

Por tanto, las oportunidades para la Generación distribuida renovable específicamente para la fotovoltaica, en la prestación de servicios auxiliares, sin duda, se incrementará a medida que la inserción de Generación distribuida aumente, pues será necesario contar con los servicios auxiliares o complementarios, para operar con la calidad de suministro adecuada.

De acuerdo a lo anterior, se debe trabajar para ofrecer soluciones respecto al impedimento técnico que podría impedir el camino trazado para la introducción masiva de las renovables en generación distribuida, misma que se encuentra desarrollándose en la investigación tecnológica que se está desarrollando.

4. Viabilidad de la implantación

En [14] se relata con particular detalle las etapas por las que ha transitado el inicio, el crecimiento la expansión y la liberalización de los sectores eléctricos. La industria eléctrica ha tenido cambios muy notables que transformaron dramáticamente su organización tanto empresarial como de propiedad. Estos cambios buscan conformar un sector eléctrico más competitivo, acorde con una mayor vinculación y globalización del resto de los mercados. Entre las modificaciones propuestas más significativas cabe destacar los siguientes:

- Desintegración vertical del sector.
- Nuevos marcos regulatorios de los aspectos técnicos y económicos
- Creación de nuevas instituciones para regular y administrar al sector
- Privatización de las diferentes unidades de negocio.

La transformación se estipuló en una profunda transformación del Estado, que pasó de ser proveedor directo de los servicios, a regulador de estos, trasladando a otros,

en general nuevos agentes, la obligación de abastecer bajo una calidad de servicio previamente definida en los contratos de concesión.

En todas las reformas que se llevan a cabo, se debe tener muy en cuenta que, para regular de forma eficiente, un sector como el eléctrico, es indispensable el diseño adecuado de su estructura, de sus organismos y de su regulación [16, 17, 18 y 19].

Se estipuló que las cuestiones clave para el logro de esta eficiencia deberían ser:

- Un mercado mayorista competitivo y eficiente en el que tanto los proveedores, como los consumidores con capacidad de elección, pudiesen adquirir energía eléctrica a los montos que resultasen de este mercado.
- Una red de transporte y distribución regida al principio del libre acceso de terceros, mediante el cual se excluyese toda posibilidad de discriminación.
- Precios para los consumidores finales que deberían recoger los efectos de la competencia positiva alcanzada en el mercado mayorista y así la puedan transferir a los consumidores cautivos.
- Establecimiento de obligaciones de calidad de servicio para cada nivel del sistema eléctrico [7].

Para pasar de la teoría a la práctica y obtener las condiciones de competencia efectiva en los mercados eléctricos mayoristas y minoristas, los marcos regulatorios se diseñan en línea con los siguientes principios:

- Eliminación de barreras a la competencia entre generadores locales y externos, tanto en el corto como en el largo plazo, tratando de impulsar mercados regionales o al menos acuerdos comerciales que posibilitasen el intercambio.
- Reglas de operación efectivas para lograr los menores costos de operación, teniendo en cuenta tanto las plantas locales como las distantes, así como los costos de transporte.
- Tarifas finales que reflejasen los precios marginales de corto plazo o los costos marginales de corto plazo.
- Tarifas de transporte que asegurasen la posibilidad de una competencia efectiva entre los mercados local y externo.

- Reestructuración sectorial y separación de actividades de acuerdo con los diferentes tipos de regulaciones requeridas.
- Creación de un mercado competitivo de generadores, tarifas reguladas y calidad de servicio para los distribuidores y transportistas, y estableciendo un conjunto de reglas para la operación del sistema.
- Seguridad y estabilidad jurídica para los nuevos entrantes, previa aceptación de las nuevas reglas del juego.
- Creación de instituciones independientes para operar el mercado y el sistema interconectado (Operadores del mercado y del sistema) así como para supervisar el estricto cumplimiento de las reglas y del respeto del derecho de los consumidores (Entes Reguladores) [16].

Subyacente en el modelo atendido, existía el convencimiento de que podía conseguirse la eficiencia a través de la competencia y la regulación, en una sabia combinación:

- Se lograría la eficiencia cuando los agentes fueran inducidos a comportarse de tal manera que tendiesen a minimizar el costo de la energía entregada al consumidor final, cumpliendo en todo caso con las obligaciones de calidad del servicio.
- La eficiencia podría ser lograda a través de la regulación, de la competencia o de una combinación de ambas.

Si se lograra una adecuada tensión competitiva, los jugadores “deberían” renunciar a parte de sus potenciales beneficios como condición de mantener una determinada cuota de mercado.

La regulación, tanto la técnica como la económica, como por ejemplo la compensación de los precios revelados por el mercado mayorista, o las obligaciones en materia de la calidad del servicio o las tarifas reguladas para las actividades de distribución o de transmisión, deberán ser elementos para garantizar la efectiva transferencia de la eficiencia lograda a través de la competencia a los consumidores finales [20].

La reestructuración sectorial aplicada al conjunto de Estados se basó en el principio: aplicar la competencia allí donde fuera posible y la regulación allí donde fuera necesaria. Entendiendo que:

- Competencia implicará:
 - ✓ Un mercado eléctrico con reglas promotoras de eficiencia.
 - ✓ Acceso de terceros a las redes de alta y baja tensión.
 - ✓ No discriminación entre generadores locales y externos.
 - ✓ Derecho a la elección de los consumidores.
- Regulación se aplicará en:
 - ✓ Precios regulados para distribución y transporte para todos los usuarios.
 - ✓ Tarifas reguladas para los consumidores cautivos.
 - ✓ Obligaciones de calidad de servicio para la transmisión y la distribución.

En este contexto el aumento de la cuota de las energías renovables es una prioridad en la agenda política de los países más desarrollados del mundo. Varios gobiernos, como los de Europa y América, han establecido objetivos ambiciosos y llevan ya avanzados sus planes de apoyo, destinados a facilitar la aplicación del mercado. El grado en que estas políticas han tenido éxito ha variado en cada nación. Sin embargo, actualmente, en diversas universidades, centros de investigación, parques tecnológicos y centros de desarrollo tecnológico, están trabajando para dotar de versatilidad a las tecnologías renovables de aprovechamiento energético. Afín de que su factor de planta se incremente o que a su vez puedan interactuar con la red eléctrica de manera inteligente de forma tal que puedan proporcionar más de un servicio, como el que acá se ha descrito, implicando la necesidad de cubrir los servicios auxiliares, que se requiere ahora en el nivel de distribución.

5. Conclusiones

En este trabajo se describe una problemática, que ineludiblemente aparecerá, con la inserción paulatina de generación distribuida de origen renovable en las redes eléctricas de nivel distribución. Misma que es detallada en cierta medida, en

este trabajo. De igual forma se describen los análisis que se deberán realizar en las redes de distribución, con la consabida inserción de generación distribuida tanto renovable, como convencional.

Por otro lado, se resaltan los ideales y directrices que están escritas y que son la hoja de ruta del sector eléctrico en México, en cuanto a la participación de cualquier persona en el mercado eléctrico, tanto a nivel macro, como a nivel micro, considerando la directriz de libre acceso a terceros sin discriminación.

Finalmente, los servicios auxiliares, serán de vital importancia hacia la transición, de las redes de distribución actuales, para finalmente tener redes eléctricas inteligentes de alta confiabilidad.

Agradecimientos. – Los autores agradecen a la SIP del Instituto Politécnico Nacional por el apoyo recibido para la realización de este trabajo el cual es parte del proyecto de investigación registro SIP No. 2018707.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Helm Dieter “Energy policy: security of supply, sustainability and competition”, Energy policy volume 30, Issue 3, year 2002, pages 173-184, DOI: 10.1016/S0301-4215(01)00141-0
- [2] Jukka V. Paatero, Peter D. Lund “Effects of large-scale photovoltaic power integration on electricity distribution networks” Renewable Energy, Volume 32, Issue 2, February 2007, Pages 216-234, ISSN 0960-1481, 10.1016/j.renene.2006.01.005.
- [3] Nadeeshani Jayasekara and Peter Wolfs, “Analysis of power quality impact of high penetration PV in residential feeders”, Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 2010. 20th Australasian, vol., no., pp.1-8, 5-8 Dec. 2010.
- [4] Bert Renders, Lieven Degroote, Tine Vandoorn, Lieven Vandeveld. “Three-phase inverter-connected DG-units and voltage unbalance”. Electrical Energy Laboratory(EELAB), Department of Electrical Energy, Systems and Automation (EESA), Ghent University, Sint-Pietersnieuwstraat 41,B-9000

- Ghent, Belgium *Electr. Power Syst. Res.* (2011), doi:10.1016/j.epsr.2010.11.024.
- [5] Papaioannou, I.T.; Bouhouras, A.S.; Marinopoulos, A.G.; Alexiadis, M.C.; Demoulias, C.S.; Labridis, D.P. "Harmonic impact of small photovoltaic systems connected to the LV distribution network," *Electricity Market, 2008. EEM 2008. 5th International Conference on European*, vol., no., pp.1-6, 28-30 May 2008 doi: 10.1109/EEM.2008.4579061.
- [6] Hernández de la Casa J., Medina Quesada M.a., *Conexión de Sistemas fotovoltaicos a la red eléctrica: Calidad de suministro. Revista de Estudios sobre Sierra Mágina SUMUNTAN No. 23 (2006); P. 33-44 Universidad de Jáen España*, <http://www.ujaen.es/dep/ingele/articulosidea.html> ó www.cismamagina.es/pdf/23-03.pdf.
- [7] Lingling Fan; Zhixin Miao; Domijan, A.; "Impact of unbalanced grid conditions on PV systems," *Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE*, vol., no., pp.1-6, 25-29 July 2010. doi: 10.1109/PES.2010.5589695.
- [8] Peças Lopes, N. Hatzargyrioub, J. Mutalec, p. Djapicc y N. Jenkinsc "Integrating distributed generation into electric power systems: A review of drivers, challenges and opportunities 9 October 2006 1189–1203 J.A.P. Lopes et al. / *Electric Power Systems Research* 77 (2007) 1189–1203.
- [9] Nasser G. A. Hemdan, and Michael Kurrat, "Distributed Generation Location and Capacity Effect on Voltage Stability of Distribution Networks" *Student Paper, 2008 Annual IEEE Conference*, vol., no., pp.1-5, 15-26 Feb. 2008 doi: 10.1109/AISPC.2008.446057.
- [10] Barroso, L.A.; Rudrick, H.; Sensfuss, F.; Linares, P.; , "The Green Effect," *Power and Energy Magazine, IEEE* , vol.8, no.5, pp.22-35, Sept.-Oct. 2010 doi: 10.1109/MPE.2010.937595.
- [11] Fabio L. Albuquerque, Adélio J. Moraes, Geraldo C. Guimarães, Sérgio M.R. Sanhueza, Alexandre R. Vaz, "Photovoltaic solar system connected to the electric power grid operating as active power generator and reactive power compensator", *Solar Energy*, Volume 84, Issue 7, July 2010, Pages 1310-1317, ISSN 0038-092X, 10.1016/j.solener.2010.04.011 Thomas Ackermann.

- [12] Lopes, J.A.P. Hatziargyriou, N. Mutale, J. Djapic, P. Jenkins, N. Integrating distributed generation into electric power systems: A review of drivers, challenges and opportunities Volume 77, Issue 9, July 2007, Pages 1189-1203 Lopes, J.A.P. DOI: 10.1016/j.epsr.2006.08.016.
- [13] G. Andersson, L. Söder “Distributed generation: a definition”. Electric Power Systems Research, Volume 57, Issue 3, 20 April 2001, Pages 195-204, ISSN 0378-7796, 10.1016/S0378-7796(01)00101-8.
- [14] H. Ibrahim, A. Ilinca, J. Perron “Energy storage systems—Characteristics and comparisons” Renewable and Sustainable Energy Reviews 12 (2008) 1221–1250 doi:10.1016/j.rser.2007.01.023.
- [15] Helm Dieter “Energy policy: security of supply, sustainability and competition”, Energy policy volume 30, Issue 3, year 2002, pages 173-184, DOI: 10.1016/S0301-4215(01)00141-0.
- [16] Aqeel Ahmed Bazmia, Gholamreza Zahedia, “Sustainable energy systems: Role of optimization modeling techniques in power generation and supply— A review” Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (2011) 3480–3500. DOI: 10.1016/j.rser.2011.05.003.
- [17] M. Godoy Simoes, y Felix A. Farret, Renewable Energy Systems. Design and Analysis with Induction Generators, CRC Press, 2004.
- [18] COM (97) 559, Communication from the European Commission: energy for the future, renewable sources of energy, White Paper for a Community Strategy and Action Plan. http://europa.eu/documentation/official-docs/white-papers/index_en.htm.
- [19] Commission of the European Communities, Renewable Energy Road Map, “Renewable energies in the 21th century: building a more sustainable future, Bruselas”, 10-1-2007.
- [20] A. Kyritsis, D. Voglitsis, N. Papanikolaou, S. Tselepis, C. Christodoulou, I. Gonos, S.A. Kalogirou, Evolution of PV systems in Greece and review of applicable solutions for higher penetration levels, Renewable Energy, Volume 109, 2017, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.03.066>.

- [21] D. Cheng, B. A. Mather, R. Seguin, J. Hambrick and R. P. Broadwater, "Photovoltaic (PV) Impact Assessment for Very High Penetration Levels," in *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 6, no. 1, pp. 295-300, Jan. 2016. doi: 10.1109/JPHOTOV.2015.2481605.
- [22] Velásquez M., Sergio, Generación distribuida. "El Papel en la ampliación del acceso a la energía Capítulo 13". ISBN: 978-84-470-2970-9 Comisión nacional de energía editorial Thomson CIVITAS 2008 España.
- [23] M. Karimi, H. Mokhlis, K. Naidu, S. Uddin, A.H.A. Bakar, Photovoltaic penetration issues and impacts in distribution network – A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 53, 2016, Pages 594-605, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.042>.