



UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS
VERITATE SOLA NOBIS IMPONETUR VIRILISTOGA. 1948

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Electroenergética



TRABAJO DE DIPLOMA

**Generación de potencia reactiva asociada a los
paneles fotovoltaicos.**

Autor: Meyli Amador González.

Tutor: Dr. Leonardo Casas Fernández

Santa Clara

2015

“Año 57 de la Revolución”

CON SU ENTRAÑABLE TRANSPARENCIA



Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Electroenergética



TRABAJO DE DIPLOMA

**Generación de potencia reactiva asociada a los
paneles fotovoltaicos.**

Autor: Meyli Amador González.

Email: mamador@uclv.edu.cu

Tutor: Dr. Leonardo Casas Fernández

Email: lcasas@uclv.edu.cu

Santa Clara

2015

“Año 57 de la Revolución”



Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería en Eléctrica, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Firma del Autor

Firma del Jefe de Departamento
donde se defiende el trabajo

Firma del Responsable de
Información Científico-Técnica

PENSAMIENTO

¿Por qué esta magnífica tecnología científica, que ahorra trabajo y nos hace la vida más fácil nos aporta tan poca felicidad?

La respuesta es esta, simplemente: porque aún no hemos aprendido a usarla con tino.

Albert Einstein

DEDICATORIA

A la memoria de mi tío Jorge Momplet Hernández por haber sido un hombre excepcional, ejemplo de bondad y altruismo, gracias por enseñarme, por tus consejos y brindarme todo tu apoyo cuando lo necesitaba. Nunca te olvidaré.

A mis padres, por la educación que me han dado, siendo ejemplos a seguir para mí, brindándome siempre su apoyo incondicional y guiarme por el camino correcto.

A mi hermano, a mis abuelos, a mis tías en fin a toda mi familia, por estar siempre a mí lado y en general, a todos los que confiaron en mí.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer infinitamente a todas las personas que me brindaron su ayuda incondicional.

A mi mamá y a mi papá por su esfuerzo y dedicación, por su amor incondicional, por estar siempre presente, por hacer de mí la mujer que soy.

A mi hermano, por estar conmigo en las buenas y en las malas, te quiero mucho.

A mis abuelos, por estar siempre en los momentos buenos y malos a mi lado, gracias por su amor.

A mi tía Isel por su cariño y dedicación lo cual me ha servido de guía para lograr alcanzar esta importante meta en mi vida. Gracias.

A mi tío Jorge y a todos los que no están entre nosotros, estoy segura que desde algún lugar me están mirando y espero se sientan orgullosos.

A toda mi familia de Caibarién, de Santi Spiritu, de Cienfuegos y de La Habana que de una forma u otra han puesto su granito de arena.

A Jessica, aunque no llevemos la misma sangre eres mi hermanita, gracias por ser esa amiga incondicional.

A mis amigos, los de ahora y los de siempre.

A mis compañeros que han estado presentes durante estos cinco años de sacrificio y dedicación, nunca los olvidaré.

A mi tutor Leonardo Casas por su asesoramiento, dedicación, colaboración, experiencia y por haberme ofrecido humildemente su enorme conocimiento y experiencia.

A todos mis profesores por su dedicación y su exigencia, gracias por aportar su granito de arena para poder convertirme hoy en una profesional.

A todas las personas que han estado a mi lado cuando las he necesitado.

A todos muchas gracias.

TAREA TÉCNICA

Con el propósito de darle cumplimiento a los objetivos trazados en esta tesis, se tuvo en cuenta una serie de tareas técnicas para la confección del informe, ellas fueron:

- Identificación de referentes de los sistemas fotovoltaicos conectados a la red.
- Valoración del efecto de la potencia activa y reactiva generada por los paneles fotovoltaicos sobre los circuitos primarios de distribución.
- Revisión bibliográfica del tema.
- Presentación de casos típicos. Análisis de los resultados.
- Confección del informe de investigación.

Firma del Autor

Firma del Tutor

RESUMEN

En los últimos años se ha incrementado la aplicación de nuevas fuentes de energía debido al alto precio de los combustibles fósiles y a su prejudicial efecto sobre el medio ambiente. Entre las fuentes renovables, la energía solar fotovoltaica es una de las más utilizadas a nivel mundial debido a las grandes perspectivas que presenta para la generación directa de energía eléctrica.

Cuba enfrenta una batalla en cuanto al ahorro de energía y una de las misiones que lleva a cabo la Unión Eléctrica (UNE) es la de instalar paneles fotovoltaicos acorde a los modelos que exige la sociedad, como un reto para preservar los recursos energéticos. En esta investigación se analizan las posibilidades del uso de los Paneles Fotovoltaicos (PFV) en las redes de distribución primaria tanto para generar potencia activa como potencia reactiva.

La investigación que se presenta tiene como objetivo determinar cómo contribuyen los paneles solares a la reducción de las pérdidas de potencia y de energía en un circuito de distribución trifásico. Para la tesis se utilizaron diferentes métodos de investigación entre los que se destacan: encuesta, revisión documental y consulta a especialistas. Los resultados se obtienen en el programa RADIAL, herramienta para analizar las pérdidas de energía, con los escenarios de generación actuales. El análisis realizado permite conocer cuan beneficioso puede ser la instalación de paneles fotovoltaicos en un circuito.

TABLA DE CONTENIDOS

PENSAMIENTO	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
TAREA TÉCNICA.....	v
RESUMEN	vi
INTRODUCCIÓN	1
Organización del informe	3
CAPÍTULO 1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS ACERCA DE LOS PANELES FOTOVOLTAICOS	5
1.1 Fuentes de energías renovables.....	5
1.1.1 Energía eólica	6
1.1.2 Energía solar	7
1.2 Energía solar térmica	9
1.3 Energía solar fotovoltaica	10
1.3.1 Celdas fotovoltaicas	11
1.4 Sistemas fotovoltaicos	13
1.4.1 Sistemas fotovoltaicos autónomos o aislados.....	13
1.4.2 Sistemas fotovoltaicos conectados a la red.....	14
1.5 Parques fotovoltaicos	17
1.6 Componentes de una instalación fotovoltaica	18
1.7 Experiencia de la energía solar en Cuba.....	¡Error! Marcador no definido. 2

Conclusiones del capitulo.....	¡Error! Marcador no definido.5
CAPÍTULO 2. LOS PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS EN EL CIRCUITO DE DISTRIBUCIÓN	¡Error! Marcador no definido.6
2.1 Inversores.....	¡Error! Marcador no definido.6
2.2 Inversores para instalaciones fotovoltaicas.....	¡Error! Marcador no definido.9
2.3 Inyección de potencia reactiva a la red eléctrica a través de inversores.....	33
2.3.1 Compensador Estático de Reactivo	34
2.3.2 Compensador Estático Sincrónico	35
2.4 Utilización del STATCOM durante las horas nocturnas en una instalación FV ..	37
2.5 Circuitos de distribución.....	38
2.6 Paneles Fovovoltaicos (PFV)	40
2.7 Influencia en la calidad de la energía de los PFV (tensión, armónicos e isla).....	41
2.7.1 Influencia de los PFV sobre la tensión	41
2.7.2 Influencia de los PFV sobre los armónicos	44
2.7.3 Operación en isla de los sistemas FV en la red.....	45
2.8 Operación de los PFV en el circuito de ditribución.....	47
2.8.1 Reducción de las pérdidas de potencia y energía por el efecto de los PFV ..	47
2.8.2 Efecto de los huecos de tensión sobre la calidad de la energía.....	48
2.9 Impacto de la generación de potencia reactiva de los PFV sobre los circuitos	49
Conclusiones del capitulo.....	50
CAPÍTULO3. EFECTO DE LOS PANELES FOTOVOLTAICOS SOBRE LAS PÉRDIDAS DE POTENCIA Y ENERGIA EN LAS REDES DE DISTRIBUCION	526
3.1 Programa RADIAL.....	5¡Error! Marcador no definido.
3.2 Simulación de los módulos fotovoltaicos conectados a la red.....	53

3.2.1	Descripción del circuito simulado en el programa RADIAL	55
3.3	Análisis de los resultados obtenidos con el programa RADIAL	56
3.3.1	Resultados del circuito con pico diurno.....	57
3.3.2	Resultados del circuito con pico nocturno	60
	Conclusiones del capítulo.....	6¡Error! Marcador no definido.
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	64
	Conclusiones.....	64
	Recomendaciones	64
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66

INTRODUCCIÓN

El consumo mundial de energía eléctrica en las últimas décadas está fuertemente relacionado con el desarrollo de la industria, del transporte, los medios de comunicación y el uso doméstico; por esta razón, los problemas relacionados con la energía mantienen a la humanidad en constante expectativa, ya sea por los altos costos de los combustibles fósiles, el agotamiento de los mismos en un futuro no lejano, los niveles de contaminación ambiental y sus efectos ya palpables a escala planetaria, así como las guerras y movimientos sociales relacionados con la posesión de las fuentes se agudizan los problemas en todos estos frentes. Estos y otros problemas relacionados han motivado una incesante búsqueda de alternativas que pudieran aumentar la carencia energética en un momento dado y por ello los programas de ahorro y uso eficiente de los combustibles tradicionales y la combinación de éstos con otras fuentes, principalmente las de carácter renovable, han estado entre las opciones más trabajadas en las diferentes partes del mundo.[1]

Las fuentes renovables de energía son parte de la solución hacia un desarrollo sostenible, es decir, un desarrollo que responde a las necesidades de hoy sin comprometer la capacidad de las próximas generaciones de responder a las suyas. La energía solar fotovoltaica ofrece una alternativa muy prometedora y es una de las nuevas formas de energía limpia.[2]

Un generador fotovoltaico, en términos generales, utiliza un sistema constituido por un conjunto de paneles fotovoltaicos, los cuales permiten captar la energía solar y convertirla en energía eléctrica a través del inversor. El inversor es un dispositivo capaz de transformar la corriente directa del grupo fotovoltaico en corriente alterna.

Actualmente, los generadores fotovoltaicos funcionan y se controlan para que mantengan en todo momento un factor de potencia unitario, lo que implica que el inversor electrónico permite inyectar a la red la máxima potencia activa disponible en cada momento a partir de las condiciones del recurso solar, pero, con el desarrollo de nuevas tecnologías han aparecido nuevos inversores capaces de entregar además potencia reactiva para controlar la tensión en la red. Existen diferentes tipos de inversores (SVC, STATCOM) capaces de realizar acciones como las mencionadas anteriormente.

Los sistemas fotovoltaicos conectados a las redes eléctricas constituyen una de las tecnologías de la generación distribuida de mayor impacto y crecimiento en los últimos años. Estos sistemas en los circuitos de distribución ofrecen beneficios ya que reducen las pérdidas en las redes e incrementan la confiabilidad y la calidad del suministro de la energía eléctrica proporcionando regulación de tensión y control de energía reactiva. Uno de los factores fundamentales que incide en las fluctuaciones de la tensión es la aparición de los “huecos de generación”, ocasionados por la nubosidad, este y otros problemas todavía no se han resuelto satisfactoriamente con las fuentes de energía renovables, especialmente con altos niveles de generación.

En fin la generación de energía eléctrica por medio de sistemas fotovoltaicos representa una contribución significativa en los sistemas eléctricos de potencia conectados a las redes de distribución, tomando en cuenta además la magnitud del aporte energético y la reducción de pérdidas de energía en el sistema. Esto conduce al siguiente **Problema Científico**:

¿Cómo generar potencia reactiva a partir de los paneles fotovoltaicos en los circuitos de distribución?

El problema científico condiciona el **Objeto**: Paneles fotovoltaicos.

El **Campo de acción**: Generación de potencia reactiva asociada a los paneles fotovoltaicos

En correspondencia con el problema y el objeto de estudio se determinó como **Objetivo general de la investigación**: Valorar el efecto de la potencia reactiva suministrada de conjunto con la potencia activa generada por los paneles fotovoltaicos

Para el logro del objetivo general de este trabajo se trazaron los siguientes **Objetivos específicos**:

1. Determinar los fundamentos teóricos que sustentan el efecto de la potencia reactiva suministrada por los paneles fotovoltaicos.
2. Valorar el estado actual del efecto que sobre los circuitos de distribución primaria tienen la generación de la potencia reactiva generada por los paneles fotovoltaicos.
3. Mostrar, a través de circuitos típicos los principales efectos asociados.

Para dar cumplimiento a estos objetivos específicos las **Interrogantes científicas** son:

1. ¿Cuáles son los fundamentos teóricos de los inversores para generar potencia reactiva?
2. ¿Cuál es el estado actual de las ubicaciones de los paneles fotovoltaicos en los circuitos de distribución primaria?
3. ¿Cómo influyen la generación de la potencia activa y reactiva, así como el punto de ubicación de los paneles fotovoltaicos en la reducción de las pérdidas?

Organización del informe.

Para el desarrollo de este trabajo se elaboraron tres capítulos, además de la introducción, conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas y anexos correspondientes.

CAPÍTULO I.

El Capítulo I recoge los fundamentos teóricos que sustentan la energía solar fotovoltaica como una fuente renovable de energía, para un desarrollo sostenible, siendo esto una motivación para la explotación y aprovechamiento de la misma, dando lugar a la valoración del efecto de la potencia reactiva suministrada y de la potencia activa generada por los paneles fotovoltaicos.

CAPÍTULO II.

El Capítulo II contiene un diagnóstico de cómo influyen los paneles fotovoltaicos en los circuitos de distribución, es decir, que le ocurre a la tensión, a los armónicos y como pueden aumentar o disminuir las pérdidas de potencia y de energía dependiendo esto de la ubicación de los paneles.

CAPÍTULO III.

En el Capítulo III se estudia el comportamiento de un circuito típico con dos escenarios diferentes en cuanto a los gráficos horarios de carga con PFV, el que se simula con el programa RADIAL, y una vez instalados los PFV se analizan las pérdidas de energía en las líneas.

CAPITULO 1: FUNDAMENTOS TEÓRICOS ACERCA DE LOS PANELES FOTOVOLTAICOS

La situación energética mundial actual es el resultado de la combinación de diversas tendencias económicas, políticas, tecnológicas, sociales y ambientales, entre otras, que confluyen en un complejo panorama de crisis y ajustes, signado en los años más recientes por una escalada de precios, sobre todo en los hidrocarburos y especialmente en el petróleo. La elevación de los precios del petróleo, desde comienzos de este siglo, ha reforzado significativamente el cuestionamiento del modelo energético basado en los combustibles fósiles (petróleo, carbón mineral y gas natural).

El consumo global en aumento, sobre todo de la energía eléctrica, ha ocasionado grandes cambios en el ámbito de las redes de alimentación, así como también en la renovación y aplicación de las centrales eléctricas. Las repercusiones actuales en la disponibilidad y calidad de la energía atraviesan serias dificultades, por lo que se exigen soluciones que se puedan aplicar técnicamente y que respondan a las exigencias del desarrollo sostenible.

Durante las últimas décadas la utilización de las energías renovables, también llamadas “energías verdes o limpias”, ha demostrado que se puede contribuir sustancialmente a favor de la solución de este problema, no solo basándose en criterios ecológicos, sino también por motivo de la estructura descentralizada de las energías renovables.

1.1 Fuente de energías renovables

La energía renovable es aquella energía que se obtiene de fuentes naturales virtualmente inagotables, ya sea por su gran magnitud porque son capaces de regenerarse por medios naturales. Entre las energías renovables se encuentran la hidroeléctrica, eólica, solar,

geotérmica, mareomotriz, la biomasa y los biocombustibles [3] las cuales permiten reducir las emisiones de sustancias nocivas al medio.

1.1.1 Energía eólica

La energía eólica supone actualmente una fuente de energía renovable altamente competitiva al compararla con otras fuentes de energía renovables, e incluso con las tradicionales no renovables. Actualmente es la de mayor crecimiento y dispone de una tecnología madura. Su crecimiento y su pronóstico a lo largo de los años se pueden apreciar en la Figura 1.1.

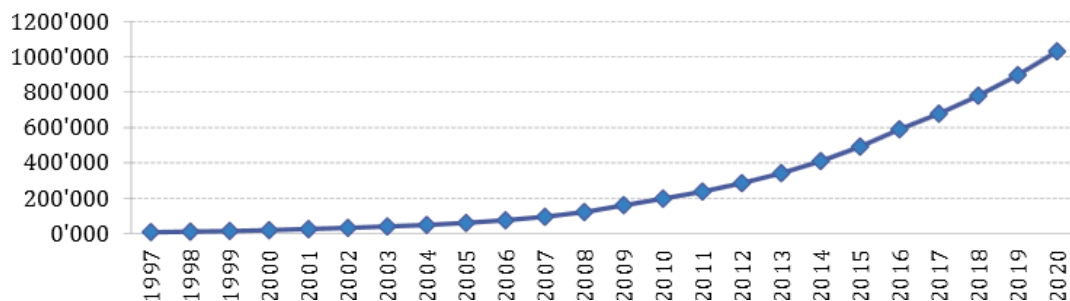


Figura 1.1: Evolución y pronóstico de la energía eólica desde 1997-2020. La capacidad instalada es en [MW]. [4]

La turbina eólica es el dispositivo mecánico que convierte la energía cinética del viento en energía mecánica. Las turbinas eólicas se sitúan sobre una torre a una determinada altura buscando un mejor aprovechamiento de las corrientes de aire; están equipadas con un sistema de álabes que hacen girar un eje, al cual se acopla un generador, que a su vez, acciona un generador eléctrico y de esta forma se obtiene energía eléctrica, cuyo destino final, mayoritariamente, es la red de energía eléctrica, aunque existen generadores eólicos que operan de forma aislada. En la Figura 1.2 se pueden apreciar cada uno de los elementos de una turbina eólica.

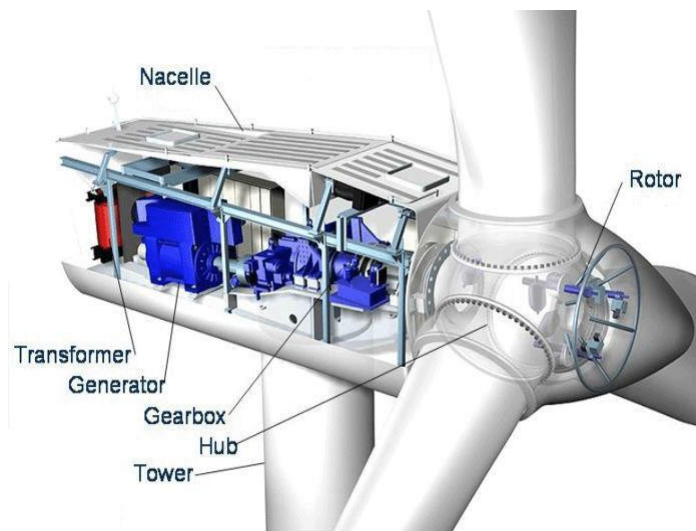


Figura 1.2: Elementos de una turbina eólica.

Una instalación eólica a gran escala, llamada granja eólica o parque eólico, consiste en un conjunto de estas turbinas. Hay dos factores principales que hay que considerar al momento de realizar un emplazamiento de turbinas eólicas: la localización, y la altura que tendrán las torres.

Las tecnologías asociadas a la generación eólica han experimentado un crecimiento vertiginoso en los últimos años, lo que está haciendo que su expansión ha de seguir en ascenso, no solo por no necesitar combustible tradicional para su funcionamiento, sino porque ha demostrado su capacidad para reducir las contaminaciones del medio.

1.1.2 Energía solar

La energía solar es la fuente principal de vida en la Tierra: dirige los ciclos biofísicos, geofísicos y químicos que mantienen la existencia del planeta, los ciclos del oxígeno, del agua, del carbono y del clima. El Sol nos suministra alimentos mediante la fotosíntesis, y como es la energía del sol la que induce el movimiento del viento y del agua y el crecimiento de las plantas, la energía solar es el origen de la mayoría de las fuentes de energía renovables: la energía eólica, la hidroeléctrica, las biomasas, y la de las olas y las corrientes marinas.[5]

En la Figura 1.3 se muestra la evolución y desarrollo de la energía solar en todo el mundo ya que es una energía que tiene grandes beneficios.

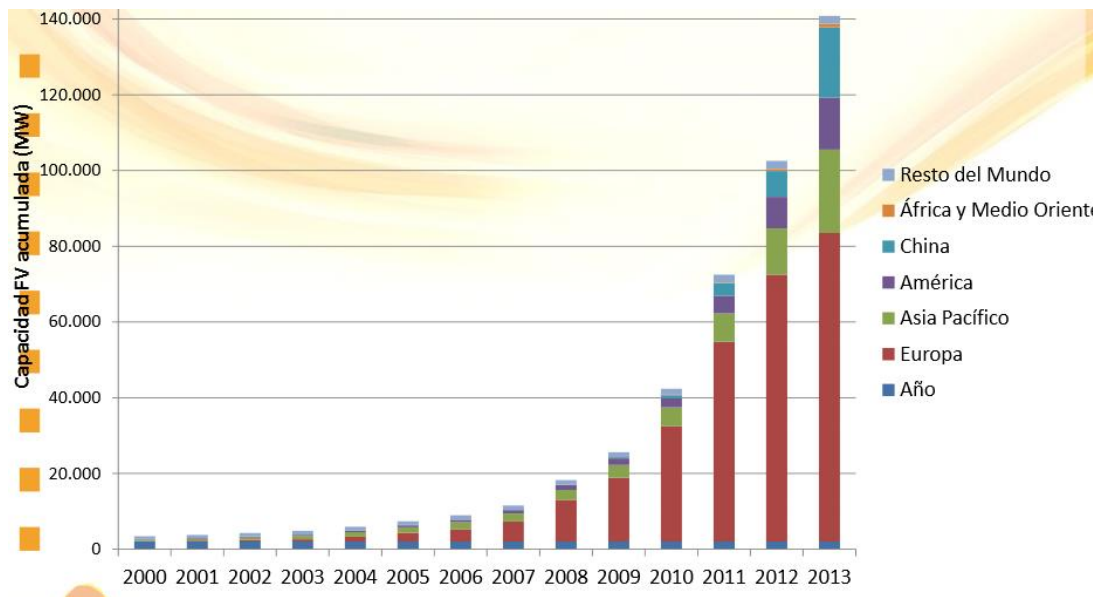


Figura 1.3: Desarrollo de la energía solar. (2000-2013). [6]

En el núcleo del Sol se producen constantemente reacciones de fusión a temperaturas de millones de grados que liberan enormes cantidades de energía en forma de radiación electromagnética. Parte de esta energía llega a la capa exterior de la atmósfera terrestre con una irradiancia promedio (constante solar) alrededor de $1367 \text{ W/m}^2 \pm 3\%$, un valor que varía en función de la distancia entre la Tierra y el Sol (Figura 1.4) y de la actividad solar (manchas solares).[7]

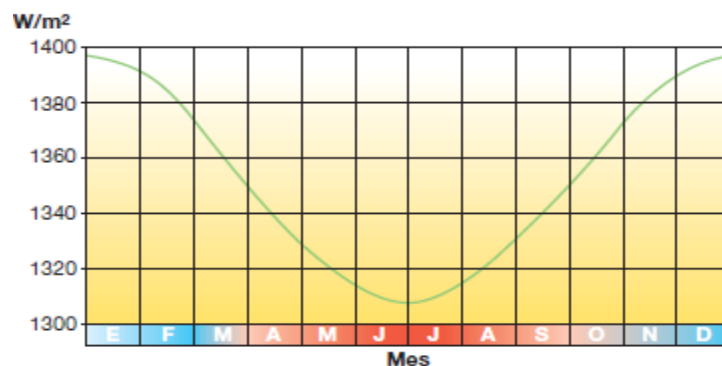


Figura 1.4: Radiación extra atmosférica

La energía solar absorbida por la Tierra en un año es equivalente a 20 veces la energía almacenada en todas las reservas de combustibles fósiles en el mundo y diez mil veces superior al consumo actual.[5]

El aprovechamiento de la energía que se recibe del Sol, da lugar a dos modalidades (Figura 1.5): la energía solar fotovoltaica y la energía solar térmica.[5]

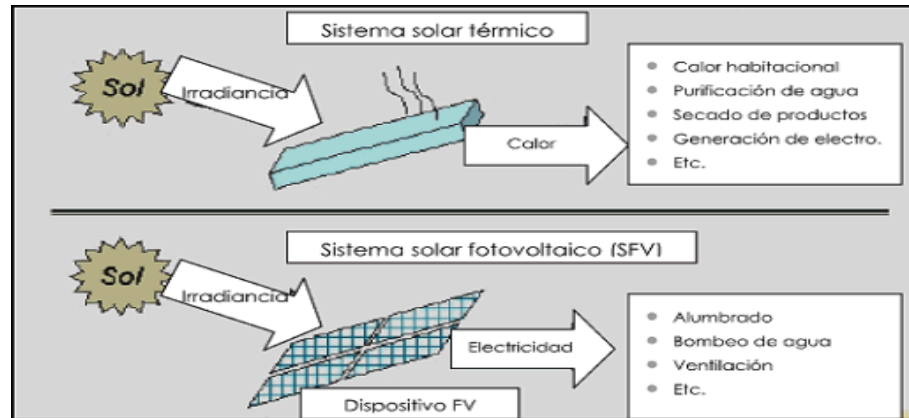


Figura 1.5: Formas de utilizar la energía solar.

1.2 Energía solar térmica

Consiste en la utilización de paneles solares para captar la energía solar y convertirla en calor, la cual puede destinarse para satisfacer numerosas necesidades.

Mediante la utilización de esta energía, se puede obtener agua caliente para usos domésticos o industriales, o bien para dar calefacción a hogares, hoteles, colegios o fábricas. En la agricultura se pueden conseguir otros tipos de aplicaciones como invernaderos solares que favorecieran las mejoras de las cosechas en calidad y cantidad, los secaderos agrícolas que consumen mucho menos energía si se combinan con un sistema solar, y plantas de purificación o desalinización de aguas sin consumir ningún tipo de combustible. Así mismo, en las centrales térmicas solares se utiliza la energía térmica de los colectores solares para generar electricidad.

La generación eléctrica a partir del calor obtenido directamente del sol requiere del uso de concentradores solares. Estos concentradores son sistemas de espejos que reflejan la

radiación solar captada en un área dada hacia un receptor de área menor, concentrado de esta manera la energía recibida. En el receptor, la energía solar se absorbe y se transfiere en forma de calor hacia un fluido de trabajo (aceites térmicos, agua, aire, sales fundidas), el cual a su vez lo transfiere en un intercambiador de calor para producir vapor de agua. El aumento en la densidad de la energía obtenido con los sistemas de concentración solar permite alcanzar temperaturas suficientemente altas para producir vapor con las características adecuadas para ser usado en turbinas de vapor convencionales. Como puede verse, esta tecnología, conocida genéricamente como "Concentrador Solar de Potencia" se diferencia de la generación térmica convencional, principalmente en la fuente de calor primaria.[8]

El calor solar colectado durante el día puede ser almacenado de diversas maneras para su utilización durante la noche o en horas de baja irradiación solar. Esto se hace principalmente en materiales como concreto, sal fundida, cerámica o sustancias en cambio de fase.[8]

En resumen, esta tecnología descansa en cuatro elementos básicos: el concentrador, el receptor, el sistema de transporte-almacenamiento y el sistema generador de potencia. El concentrador capta y concentra la radiación solar directa, la cual pasa al receptor. El receptor absorbe la radiación solar concentrada y transfiere la energía térmica (calor) al sistema de conversión de potencia.[8]

1.3 Energía solar fotovoltaica

Es la conversión directa de la energía radiante proveniente principalmente del Sol en energía eléctrica, cuyo proceso se realiza en los módulos o paneles fotovoltaicos, que son el resultado de la conexión en serie y paralelo de celdas fotovoltaicas. La asociación de ellos en serie y/o paralelo conforman los generadores fotovoltaicos, que se pueden instalar en disímiles lugares.

Ciertos materiales absorben la luz, y la energía de los fotones excita a los electrones del material provocando que parte de ellos salgan de sus posiciones, lo que genera cargas

negativas, debidas a los electrones desplazados, y cargas positivas, debidas a los huecos dejados por los electrones. Si los electrones y los huecos generados por la fotoexcitación se separan por un campo eléctrico interno del material, unos y otros se acumulan en los lados opuestos del campo, creándose una diferencia de potencial. La unión, mediante un circuito, de los lados opuestos permite obtener una corriente eléctrica [9]. Esta corriente así producida puede ser utilizada para cargar baterías o ser convertida a corriente alterna mediante un dispositivo denominado inversor.

La energía solar fotovoltaica, como todo proceso que el hombre ha ido incorporando a sus conocimientos, también tiene su origen, y es de suma importancia conocerlo.

1.3.1 Celdas fotovoltaicas

La obtención de energía eléctrica de forma directa mediante la interacción de la radiación solar con determinados elementos, generalmente el silicio, se lleva a cabo en las denominadas celdas fotovoltaicas, las que están formadas por una delgada capa de este material semiconductor constituyendo así el elemento esencial de estas instalaciones. Se distinguen los tres tipos siguientes:

- Silicio monocristalino

Células formadas por un único cristal, lo que permite obtener los mayores rendimientos, superiores al 30%. Como inconvenientes, son caras y difíciles de conseguir. Este tipo de células son las más utilizadas y suelen comercializarse como conversores directos de energía solar en eléctrica (Figura 1.6).



Figura 1.6: Célula de silicio monocristalino.

- Silicio policristalino

Las celdas se van formando por la agrupación de los átomos con diferentes direcciones de alineamiento. Suelen presentar tonos azules y grises con aspecto metálico. Son más baratas que las de silicio monocristalino porque su proceso de formación es menos riguroso; sin embargo, presentan una menor eficacia en comparación (Figura 1.7).

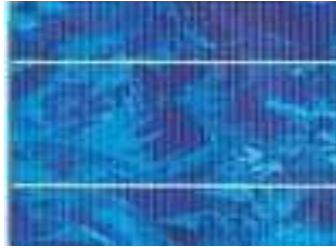


Figura 1.7: Célula de silicio policristalino.

- Silicio amorfo

Tiene un alto grado de desorden en los átomos en su estructura, lo que le confiere unos tonos más oscuros como marrón o gris. Presenta grandes ventajas tanto en sus propiedades eléctricas como es su proceso de fabricación, lo que le hace útil en instalaciones fotovoltaicas de bajo coste. Sin embargo, presenta dos importantes inconvenientes como son la baja eficiencia, comparada con las células anteriores, y el alto nivel de degradación durante los primeros años de vida útil, lo que limita su eficiencia aún más. Su uso es habitual en calculadoras y otros objetos diversos (Figura 1.8).

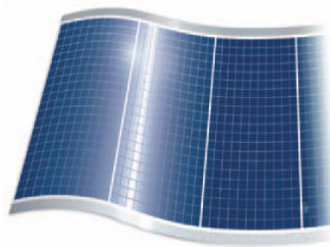


Figura 1.8: Célula de silicio amorfo.

1.4 Sistemas Fotovoltaicos

Durante los últimos 30 años el desarrollo tecnológico del uso de la radiación solar para producir calor y energía eléctrica ha permitido una reducción del costo de los módulos fotovoltaicos y a su vez un incremento de su eficiencia, constituyendo así una realidad que cada día se incrementa con la instalación de dispositivos fotovoltaicos en áreas rurales y montañosas, en zonas de difícil acceso para las redes eléctricas y en sectores priorizados, es decir, estos pueden trabajar de forma aislada o conectados a la red.

1.4.1 Sistemas fotovoltaicos autónomos o aislados

Los sistemas autónomos se emplean en lugares con acceso complicado a la red eléctrica y donde resulta más fácil y económico instalar un sistema fotovoltaico que tender una línea de enlace a la red eléctrica general. Estos sistemas se pueden encontrar en lugares como (Figura 1.9):

1. Zonas rurales aisladas
2. Áreas sin conexión a la red.
3. Las telecomunicaciones.
4. Sistemas de iluminación de áreas aisladas y carreteras.
5. Pequeños sistemas autónomos: ordenadores, teléfonos portátiles, cámaras o calculadoras.
6. Sistemas de navegación: Señales para el ferrocarril, boyas de señalización marítima, sistemas de aproximación en aeropuertos, plataformas petrolíferas, etc.
7. Las radiocomunicaciones: Repetidores de microondas, radio, TV o telefonía móvil, estaciones de telemetría, Radioteléfonos.

Además de la aplicación de electrificación de las viviendas rurales, se puede aplicar la energía solar fotovoltaica para usos productivos y comerciales, sobre todo en la agricultura.



Figura 1.9: Electrificación aislada.

Ejemplos de este uso son:

1. Bombeo de agua para riego y cercas eléctricas para ganadería: Este permite aumentar la productividad del área cultivable y diversificar el cultivo.
2. Refrigeración de alimentos: Incrementa la calidad del producto y permite mayores márgenes de tiempo entre cosecha y entrega en el mercado.
3. Comunicación: Facilita la venta en mercados alejados y el acceso a información de precios en el mercado.
4. Iluminación: Permite el procesamiento de cultivos y productos en horas de la noche y en áreas cubiertas.

En regiones rurales o aisladas los sistemas fotovoltaicos autónomos constituyen ya la solución de fondo y son parte fundamental e imprescindible para la garantía de las comunicaciones. A diferencia de los sistemas conectados a la red, los sistemas autónomos requieren de baterías para almacenar la energía que será consumida en los ciclos diarios.[10]

1.4.2 Sistemas fotovoltaicos conectados a la red

Los sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica (SFCR) constituyen una de las aplicaciones de la energía solar fotovoltaica que más atención están recibiendo en los últimos años, dado su elevado potencial de utilización en zonas urbanizadas próximas a la red eléctrica cuyo objetivo principal es maximizar anualmente la producción de energía

eléctrica que es inyectada a la red. En países industrializados, gracias a los logros alcanzados en las tecnologías de dispositivos fotovoltaicos y convertidores estáticos de potencia, así como a la reducción en sus costos de fabricación, se ha venido convirtiendo gradualmente en una alternativa viable en el esquema de generación distribuida. En él, una combinación de plantas centrales y un gran número de pequeños generadores dispersos en la red eléctrica satisfacen la demanda de energía eléctrica. Este hecho constituye una realidad en algunos países como Dinamarca, Holanda, Alemania, España, Estados Unidos, Japón y comienza a materializarse en Cuba.

En términos generales, los generadores fotovoltaicos distribuidos conectados a la red pueden aportar importantes beneficios a los sistemas de distribución, dependiendo de las características y condiciones operativas de la red de distribución, así como de la localización de éstos dentro de la misma.[11]

Los beneficios potenciales más importantes son:

- La suavización de los picos de demanda cuando existe cierto grado de coincidencia entre el perfil de generación fotovoltaica y el perfil de consumo del alimentador.
- El alivio térmico a equipos de distribución, lo que implica también la posibilidad de postergar inversiones de capital para incrementar su capacidad o reemplazo.
- La disminución de pérdidas por transmisión y distribución.
- El soporte de tensión en alimentadores de distribución.
- La compensación de potencia reactiva en el alimentador.

Un sistema fotovoltaico de conexión a red es un tipo de instalación eléctrica en la que intervienen cinco elementos (Figura 1.10):

1. La energía solar.
2. Un grupo de módulos solares fotovoltaicos convenientemente conectados, y situados de tal manera que reciban la mayor cantidad de luz solar a lo largo del año.
3. El inversor fotovoltaico de conexión a red eléctrica.
4. Las protecciones eléctricas.

5. La red eléctrica.

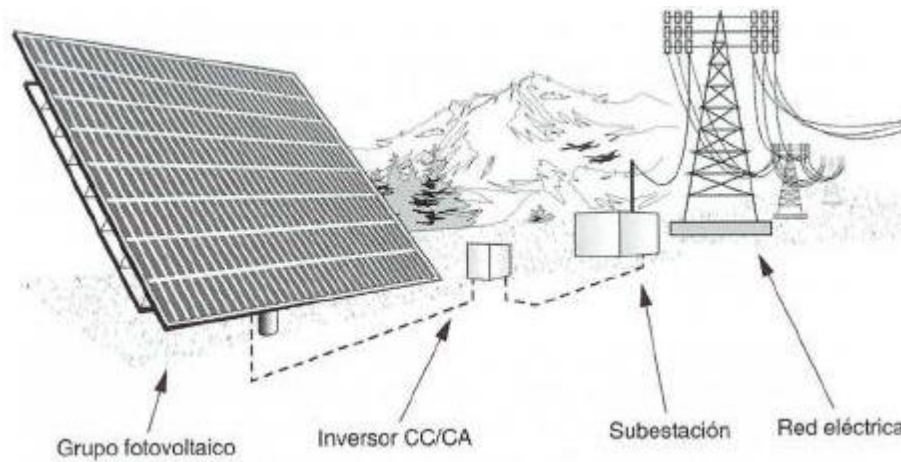


Figura 1.10: Elementos de un sistema fotovoltaico de conexión a la red.

El funcionamiento del sistema solar se realiza de forma completamente automática, tanto para su puesta en marcha como para su parada [12]:

1. Al amanecer, los dispositivos de control del sistema miden la tensión en el generador fotovoltaico. Una vez alcanzado el nivel mínimo de funcionamiento, el inversor arranca y comienza la entrega de energía a la red.
2. Al anochecer, cuando se detecta un nivel de potencia del generador inferior al mínimo con el que puede funcionar, el equipo se desconecta hasta un nuevo amanecer.

Dentro de las instalaciones solares fotovoltaicas conectadas a la red se distinguen varios tipos [13]:

1. Instalaciones conectadas a red sobre fachadas en edificios o viviendas: Son típicas de los lugares de alta latitud, y suelen ser instalaciones de pequeña potencia y vierten la energía en baja potencia (BT).
2. Plantas solares: Se trata de instalaciones de mayor potencia, de hasta varios cientos de MW, que se conectan con la red en mediana potencia (MT).

3. Instalaciones solares fotovoltaicas híbridas o combinadas: Son aquellas instalaciones que combinan varios sistemas, como puede ser una instalación autónoma que vende su excedente de energía a la red en verano, o una instalación fotovoltaica junto a una eólica para su conexión a red. Estas instalaciones incorporan sistemas de control adecuados.

La energía así obtenida presenta ventajas en comparación con la que se obtiene de forma convencional mediante las grandes plantas generadoras, ya que esta tiene que ser transportada, a altas tensiones a través de grandes distancias, hasta una subestación distribuidora donde la tensión se reduce a los niveles de utilización, lo que inevitablemente provoca pérdidas de energía. En cambio, las plantas fotovoltaicas se pueden construir cercanas a las zonas de consumo en lo que se ha denominado la generación distribuida.

1.5 Parques fotovoltaicos

Los parques fotovoltaicos son grupos de generación de potencias variadas. Hay que tener en cuenta que para 1 kWp se requieren de 8 a 10 m² de superficie, lo que implica el uso de terrenos que muy frecuentemente compiten con otras actividades vitales, como la agricultura y el urbanismo. Las mayores plantas actuales con potencias de entre 250 y 500 MW se encuentran en zonas desérticas de Estados Unidos y China, donde resulta evidente que la situación de competencia por el espacio no es lo más importante.

Plantas menores, de entre 1 y 3 MW se localizan cercanas a las redes de media tensión (33 kV), pero siempre con la valoración de los espacios requeridos por estas instalaciones.

En las redes de distribución se están incrementando los paneles fotovoltaicos con potencias desde varios kW hasta algunos cientos, ubicados en azoteas (y fachadas) de las edificaciones urbanas, lo que constituye una sabia solución y un aprovechamiento de las áreas ociosas, además de que estos parques se clasifican como los más efectivos desde el punto de vista de la distribución distribuida.

1.6 Componentes de una instalación fotovoltaica

Toda instalación fotovoltaica está compuesta por diferentes elementos, cada uno de ellos realiza una función determinada dentro de la misma. Es evidente, que hay que distinguir entre las instalaciones fotovoltaicas conectadas a red y las que no lo están, o instalaciones aisladas. Mientras que las primeras carecen de sistemas de acumulación de energía, puesto que ésta se entrega directamente a la red, las segundas precisan de dicho sistema, ya que sin él sería imposible el almacenamiento y posterior uso de la energía generada.

Debido a la importancia que han ido adquiriendo las instalaciones fotovoltaicas conectadas a la red, por su rápida evolución tecnológica y su crecimiento, así como la mejora en su rendimiento, se describe este tipo de instalación, haciendo énfasis en cada uno de los elementos que intervienen en el proceso de obtención de la energía.

1. Generador Fotovoltaico.

Es el elemento esencial para que una instalación fotovoltaica se ponga en funcionamiento. El tamaño del generador fotovoltaico depende de factores como: la radiación solar recibida, el valor energético de la carga, la máxima potencia de salida del panel, el rendimiento del mismo, la orientación de los paneles, la temperatura ambiente y el resto de componentes de la instalación.

Su componente elemental es la célula fotovoltaica, donde se lleva a cabo la conversión de la radiación solar a corriente eléctrica.

Un ajustado circuito equivalente para células fotovoltaicas se muestra en la siguiente Figura (1.11):

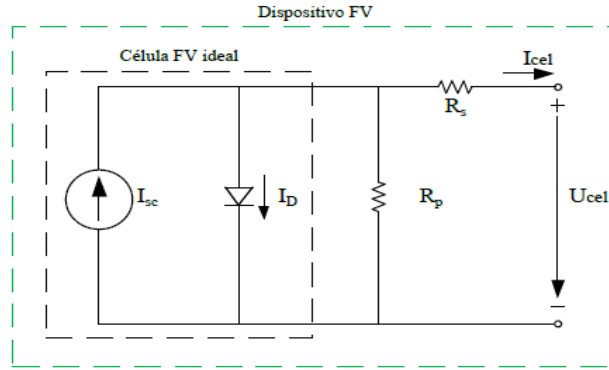


Figura 1.11: Circuito equivalente de una célula fotovoltaica

La corriente de la célula fotovoltaica se obtiene a partir de la ecuación (1.0), que describe la característica I - U de una célula fotovoltaica ideal de manera matemática.[14]

$$I_{cel} = I_{sc} - I_D - \frac{U_{cel} \cdot R_s}{R_p} \quad (1.0)$$

Donde:

I_{sc} : es la corriente generada por la luz incidente (que es directamente proporcional a la radiación).

R_s : es la suma de las resistencias estructurales del dispositivo (es muy pequeña y en ocasiones se desprecia).

R_p : es la resistencia paralelo (generalmente alto y por lo tanto se desprecia).

I_D : es la ecuación *Shockley* de un diodo.

$$I_D = I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{q_e U_{cel}}{a_i k T_c}\right) - 1 \right] \quad (1.1)$$

q_e : es la carga del electrón ($1.60217646 \times 10^{-19}$ C).

k : es la constante de *Boltzmann* ($1.3806503 \times 10^{-23}$ J/K).

T_c (en Kelvin): es la temperatura de la unión p - n de la célula fotovoltaica.

a_i : es la constante de idealidad ($1 \leq a_i \leq 1.5$).

I_0 : es la corriente de saturación que depende de la temperatura y debe ser expresada según la ecuación siguiente:

$$I_0 = \frac{I_{sc} + K_I \cdot (T_c - T_n)}{\exp[(U_{oc} + K_V \cdot (T_c - T_n))/a_i U_t] - 1} \quad (1.2)$$

U_t : tensión de las células conectadas en serie, N_s , para la temperatura nominal T_n .

Para comprender el funcionamiento de un módulo fotovoltaico es necesario conocer las características eléctricas de las células fotovoltaicas que lo constituyen. En la Figura 1.12 se muestra el comportamiento eléctrico de una célula fotovoltaica dado por una curva I-V donde se puede observar que para una irradiación de 1000 W/m^2 , correspondiente aproximadamente a un día soleado, las curvas superiores muestran que la tensión de circuito abierto de la célula es aproximadamente 0.6 V . En el punto máximo llamado punto de potencia máxima (MPP) se obtiene la potencia máxima de la célula FV. La tensión de circuito abierto es mucho más afectado por la temperatura de la célula fotovoltaica que por la irradiación; a una temperatura alta esta tensión disminuye.[14]

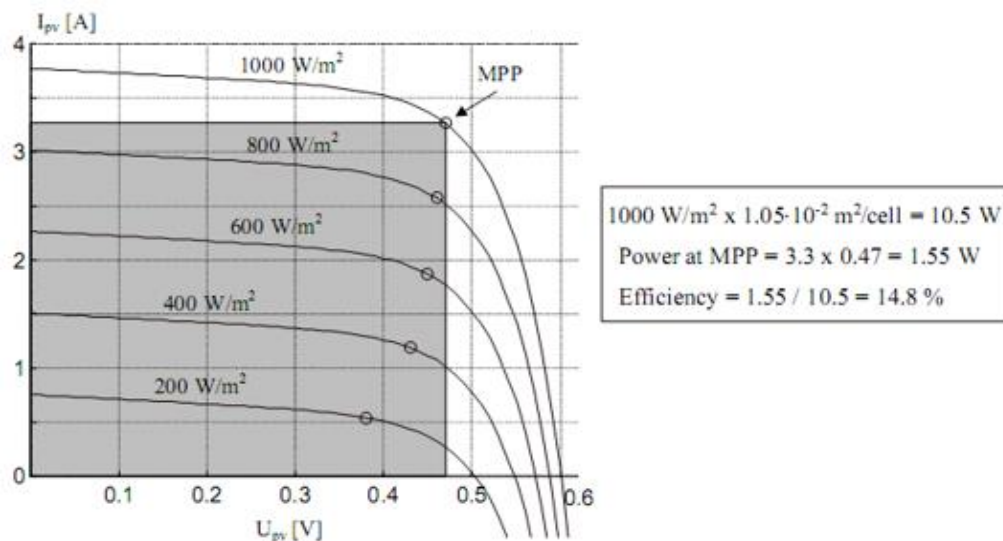


Figura1.12: Las curvas I-V para una célula fotovoltaica con diferentes insolaciones. Los círculos indican los puntos de potencia máximas.

2. Estructura soporte.

Es donde se colocan los paneles, de forma que puedan realizar la máxima captación de la energía solar. En la mayoría de las instalaciones permiten variar el ángulo de inclinación (Tabla 1.0) de los mismos con respecto a la horizontal, acción que se realiza dos veces al año de acuerdo a las estaciones.

Tabla 1.0: Valor aproximado del ángulo de inclinación.

Período de utilización	Inclinación
Anual, con consumo constante.	β°
Preferentemente en invierno	$(\beta+10)^\circ$
Preferentemente en verano	$(\beta-10)^\circ$

β : Latitud del lugar del emplazamiento

3. Protecciones.

Como cualquier instalación eléctrica, el sistema dispone de las necesarias protecciones para garantizar la seguridad ante la ocurrencia de una falla. Las fallas más frecuentes son los cortocircuitos y para eliminarlos se precisan de dispositivos tales como fusibles o interruptores automáticos (IA).

4. Inversor:

El inversor cc/ca tiene la misión de transformar la corriente continua del grupo fotovoltaico en corriente alterna perfectamente sincronizada con la red existente, ya sea trifásica, monofásica o bien de alta, media o baja tensión.[3]

Los inversores fotovoltaicos para conexión a la red eléctrica, se caracterizan por operar conectados directamente al generador fotovoltaico. El inversor se instala entre el generador fotovoltaico y el punto de conexión a la red.

Para optimizar el grado de aprovechamiento del generador fotovoltaico, los inversores deben seguir el punto de máxima potencia *MPP* (*Máximum Power Point*). Además deben trabajar con el máximo rendimiento, generando energía con una determinada calidad (baja distorsión armónica, elevado factor de potencia, bajas interferencias electromagnéticas) y también cumplir determinadas normas de seguridad.

En inversores conectados a la red eléctrica, la señal de la corriente inyectada deberá ser lo más sinusoidal posible. El inversor genera en su salida una tensión en ancho de pulsos modulados (PWM, siglas en inglés), incompatibles con las tensiones sinusoidales de la red. Para ello, se coloca entre cada salida del inversor y cada fase de la red una inductancia que actúa como un filtro y permite al inversor suministrar a la red corrientes sinusoidales.

Dentro de los requerimientos específicos de operación en conexión a red, el inversor fotovoltaico también debe operar dentro de márgenes de tensión y frecuencia de salida. Igualmente deben tener aislamiento galvánico entre la red y la instalación fotovoltaica.[15]

1.7 Experiencia de la energía solar en Cuba

El uso de la radiación solar para producir calor y energía eléctrica constituye en Cuba una realidad que cada día se incrementa con la instalación de las estructuras necesarias para este fin en todas las provincias del país, fundamentalmente para la producción de energía eléctrica que en su mayor parte se incorpora a las redes del Sistema Electroenergético Nacional (SEN).

En el Mapa de Radiación Solar Promedio en Cuba, Figura 1.13, se puede observar la radiación solar que incide sobre la superficie de nuestro país. En este mapa se corrobora que las instalaciones fotovoltaicas son válidas en la inmensa mayoría del territorio nacional. La radiación solar anual de Cuba es de unos 1 825 kW.h/m²/año, y se caracteriza por una buena presencia de esta radiación en todo el país; para más del 90 % del territorio nacional la radiación solar es del orden de más de 5 kW.h/m²/día.[16]



Figura 1.13: Mapa de Radiación Solar Promedio en Cuba

En Cuba existe experiencia, desde los años 80 del pasado siglo, en el uso de la radiación solar para generar electricidad. El sol brinda cada día la energía equivalente a 0,5 litros de petróleo por cada metro cuadrado de superficie de la isla; si calculamos la cantidad que esto representa para los 110 000 kilómetros cuadrados que tiene Cuba, se llega a la conclusión que el país recibe diariamente en energía solar el equivalente a 55 millones de toneladas de petróleo. [17]

En la década de los 90, con la instauración del “período especial” a consecuencia del desplome del campo socialista y desaparición de la Unión Soviética y por la intensificación del bloqueo impuesto por los Estados Unidos, Cuba ha realizado grandes esfuerzos para solucionar el problema energético y entre sus planes incluyó la intensificación de la utilización de energía solar, fundamentalmente en zonas de difícil acceso donde no llega el Sistema Electroenergético Nacional, utilizando paneles solares. Estos sistemas comenzaron a instalarse fundamentalmente en consultorios del médico de la familia, hospitales rurales, círculos sociales, salas de televisión y escuelas.[17]

Por tener grandes ventajas económicas y ecológicas fueron instalados al culminar el año 2000 los sistemas fotovoltaicos en escuelas, Figura 1.14, donde resultaba difícil llevar la

electrificación, con ello se garantizó que el 100 % de los escolares tenía acceso a video clases, tele clases y computadoras dirigido al desarrollo del Proceso Educativo.[17]



Figura 1.14: Escuela rural con paneles solares fotovoltaicos instalados

En 2001 se instaló el primer panel fotovoltaico en el Museo de Historia Natural Tranquilino Sandalio de Noda, de Pinar del Río.

En el 2008, comenzó a operar la primera instalación conectada a la red en la Ciudad Escolar Camilo Cienfuegos, provincia de Granma, con una potencia de 1 200 Wp.[18]

El primer parque de mayores pretensiones se instaló en Cantarrana de la provincia de Cienfuegos, con una potencia de 1 600 kW, cuya generación en un día típico de sol, produce alrededor 13 900 kW.h, que entrega al Sistema Electroenergético Nacional.

Meses después comenzó a operar otro en la ciudad de Sta. Clara con una potencia de 964 kW que ahorra unas 380 toneladas de petróleo anuales.[19]

Posteriormente comenzaron a operar otros cinco parques solares en las provincias de La Habana, Guantánamo, Camagüey, Santiago de Cuba y la Isla de la Juventud,

Durante el año 2014 se le sumaron otros siete parques fotovoltaicos más, como parte del programa nacional de desarrollo en pos del ahorro de energía, dichas instalaciones tienen actualmente, una potencia total de 8,15 MW. El proceso inversionista continúa hasta una meta que en los años próximos será del orden de los 700 MW.

Conclusiones del capítulo.

En este capítulo se realizó el estudio de los fundamentos teóricos básicos afines con los paneles solares fotovoltaicos. Debido al gran avance que existe en el mercado y la alta fiabilidad que presenta, la energía solar fotovoltaica se ha convertido en una de las fuentes de energía renovable más importante del mundo (después de la hidráulica y la eólica). Las celdas solares cada día son más eficientes debido al avance de las nuevas tecnologías y materiales de fabricación, por lo que su tendencia a disminuir los precios es acelerada. Esta energía renovable presenta grandes ventajas y una de las más importantes es que no contamina el medio ambiente al no emitir gases contaminantes a la atmósfera. Los paneles fotovoltaicos solo generan cuando reciben radiación solar, convirtiéndose esto en uno de sus principales inconvenientes. En el mundo las grandes potencias económicas son líderes de la energía fotovoltaica, convirtiéndola en una energía alternativa para un desarrollo sostenible.

CAPITULO 2: LOS PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS EN EL CIRCUITO DE DISTRIBUCIÓN

2.1 Inversor

El inversor transforma una tensión de entrada de corriente directa, CD, a otra de corriente alterna, CA, simétrico, con la magnitud y la frecuencia deseadas. Tanto la tensión de entrada como la frecuencia de salida pueden ser fijos o variables.

El principio de funcionamiento se basa en la conmutación de interruptores, que permiten, durante un semiperíodo, la circulación de corriente en un sentido, instante durante el cual se le aplica a la carga una tensión igual a $V_s/2$. En el siguiente semiperíodo, un segundo interruptor realiza la misma función, pero con la circulación de la corriente en sentido contrario, Figura 2.1.

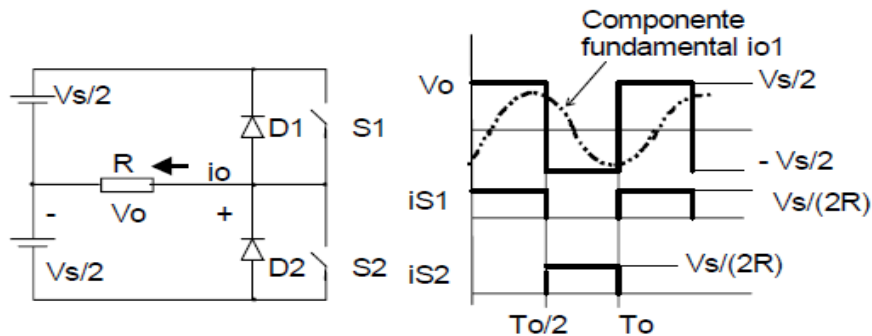


Figura 2.1: Principio de funcionamiento de un inversor.

En la mayoría de las aplicaciones la potencia de salida debida a la corriente de la componente fundamental es la potencia útil, y la potencia debida a las corrientes armónicas se disipa en forma de calor. Los inversores pueden clasificarse básicamente en dos tipos

inversores monofásicos o trifásicos. Cada tipo puede utilizar dispositivos con activación y desactivación controlada (BJT, MOSFET, IGBT, MCT, SIT, GTO) o tiristores de conmutación forzada, según la aplicación.

La tensión de salida no sinusoidal del inversor produce corrientes armónicas que debilitan el factor de potencia de la carga y causan variaciones de par en los motores CA. El conocimiento del contenido de armónicos es útil en el diseño de esquemas complejos y en el diseño de filtros para eliminar algunos armónicos indeseados. Los armónicos de la tensión se detectan fácilmente por medio del desarrollo de la serie de Fourier con una forma de onda como la mostrada en la Figura 2.2.[20]

Con el objetivo de evitar un posible cortocircuito debido a que los dos interruptores estén cerrados al mismo tiempo, se deja un pequeño intervalo de tiempo en que ambos estén desconectados lo que hace que la onda tome forma que se muestra en la Figura 2.2. Esta "zona muerta" es el ángulo α que está asociado al ángulo de disparo del inversor.

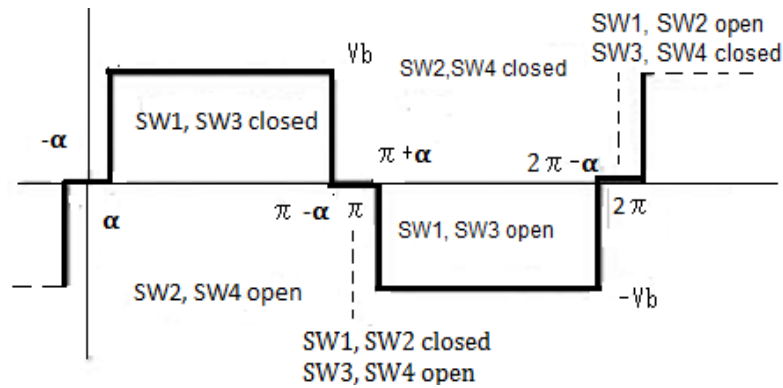


Figura 2.2: Forma de onda del voltaje de carga.

Si la forma de onda posee simetría impar, los coeficientes del coseno son cero y los coeficientes del seno y al calcular la integral se obtiene la ecuación (2.0):

$$b_n = \frac{2}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi-\alpha} V_b \sin(n\theta) d\theta = \frac{4V_b}{n\pi} \cos(n\alpha) \quad (2.0)$$

El coeficiente de la componente fundamental es (ecuación 2.1):

$$b_1 = \frac{4V_b}{\pi} \cos \alpha \quad (2.1)$$

De esta forma la variable α está presente en todos los armónicos de la onda. Como se puede ver, es posible eliminar un armónico seleccionado haciendo que el coseno de la ecuación (2.0) sea 90° . La magnitud del n ésimo armónico es cero si:

$$\alpha = \frac{\pi}{2n} \quad (2.2)$$

La regulación de la tensión y la eliminación de armónicos no son operaciones independientes, porque el valor de n debe ser fijo hasta eliminar un armónico en particular.[20]

La regulación y el control de armónicos es posible, con las técnicas de modulación del ancho de pulso (conocido por sus siglas en inglés PWM). Las técnicas PWM, afortunadamente, no sólo resuelven los problemas de funcionalidad del filtro sino que también proporcionan el control de la tensión de salida del inversor. Para lograrlo se realiza un elevado número de conmutaciones de los interruptores en cada uno de los intervalos o semiperíodos de la onda de salida.

Con el empleo de estas señales, se obtienen formas de onda con menor contenido de armónicos, lo que mejora la calidad de la onda de salida del inversor, además permiten realizar el control de la tensión de los inversores dentro del propio esquema, eliminando la necesidad del empleo de rectificadores controlados para regularlo.[21]

Existen varias técnicas PWM cada una con sus propias ventajas. La modulación bipolar hace uso de una tensión sinusoidal que se compara con una forma de onda portadora triangular [20], obteniéndose un sistema de modulación por impulsos de forma tal que en cada semiperíodo, ya sea positivo o negativo, se obtengan alternativamente tensiones positivas o negativas [21]. La señal de referencia sinusoidal y la portadora triangular se ilustran en la figura 2.3 (a) con el rendimiento de la tensión que se muestra en la figura 2.3 (b)

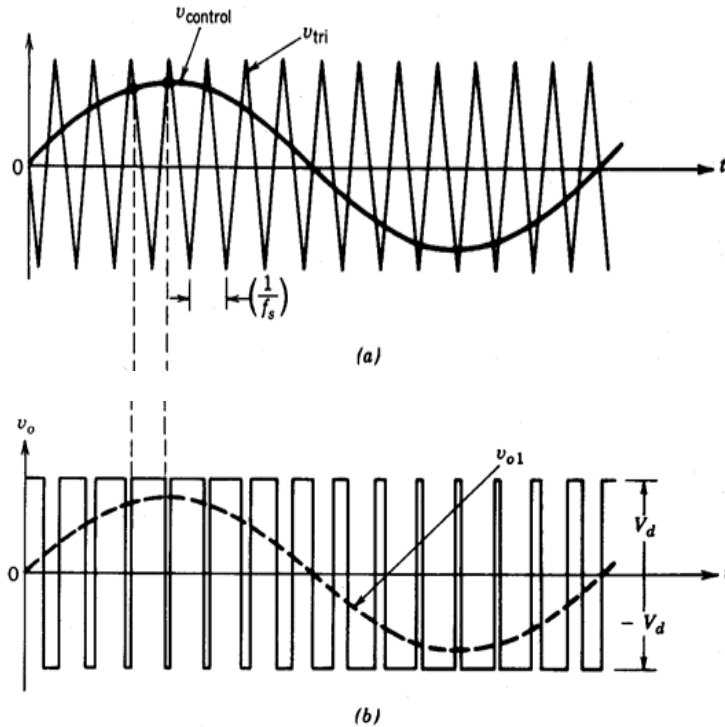


Figura 2.3: (a) Señal de referencia sinusoidal y la portadora triangular, y (b) rendimiento del voltaje.

En todas las instalaciones fotovoltaicas, este dispositivo es de gran importancia ya que es el encargado de transformar y adaptar la energía generada a las características de la carga, ya sea para su posterior uso individual, en caso de instalaciones aisladas, o su entrega a la red eléctrica, para instalaciones conectadas a la misma.

2.2 Inversores para instalaciones fotovoltaicas

En las instalaciones fotovoltaicas los paneles fotovoltaicos son los encargados de generar potencia a partir de la radiación solar captada. La potencia eléctrica generada es de CD, con valores de tensión y corrientes dependientes, entre otros factores, de la disposición de los paneles para la captación de la radiación.

A causa del costo de las instalaciones solares fotovoltaicas, la explotación de los inversores debe ofrecer un alto rendimiento y una elevada fiabilidad. Dicho rendimiento depende de la variación de la potencia de la instalación, por lo que debe procurarse trabajar con potencias

cercanas o iguales a la nominal, ya que si la potencia de los paneles fotovoltaicos a la entrada del inversor varía, el rendimiento disminuye.

- Debido a las características del rendimiento, los inversores para plantas aisladas y para plantas conectadas a la red tienen necesidades distintas [7]:
- En las plantas aisladas, los inversores deben ser capaces de proporcionar una tensión en el lado CA lo más constante posible dentro de la variabilidad de la producción del generador y de la demanda de la carga.
- En las plantas conectadas a la red, los inversores deben reproducir, lo más fielmente posible, la tensión de la red y al mismo tiempo deben intentar optimizar y maximizar la energía de salida de los paneles FV.

Uno de los grandes adelantos en las técnicas de construcción de inversores para ser utilizados en las instalaciones FV es que los mismos son capaces de generar también potencia reactiva incluso durante las noches, cuando se conectan a las redes.[22]

El inversor unido a un generador FV no es una fuente o sumidero infinito de potencia reactiva. Su capacidad instantánea de generar potencia reactiva está limitada por su capacidad de potencia aparente (S) y la variable de generación de potencia activa (P). La Figura 2.4 muestra la ecuación y el diagrama fasorial del modelo del inversor FV descrito anteriormente donde se ilustra el rango de potencia reactiva aceptable.

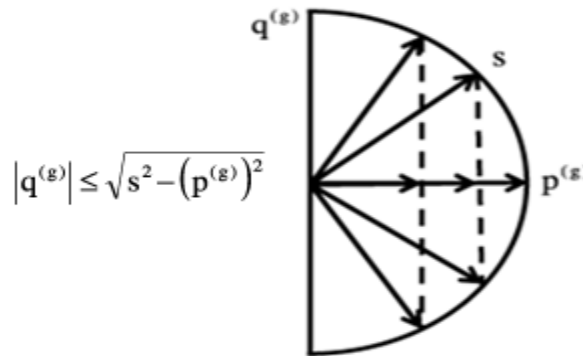


Figura 2.4: Modelo de la capacidad del inversor.

Cuando (S) es más mayor que [23], los inversores pueden proporcionar o consumir potencia reactiva (Q). Los inversores pueden enviar (Q) rápidamente a la red (en el escala

de tiempo de ciclo-a-ciclo) y así transformarse en un mecanismo para la rápida regulación de la tensión.[24]

Para determinar las potencias activa y reactiva que puede entregar y absorber un generador fotovoltaico es imprescindible conocer los límites del inversor. La figura 2.5 representa el circuito equivalente (a) y el circuito de una fase (b) de un inversor conectado a la red. La red se representa por su equivalente *Thévenin*. La impedancia representa la reactancia en el punto de conexión a red (PCC) junto con la reactancia del filtro de conexión a red siendo esta mayor que la reactancia de la red y por ello, esta última se desprecia. La componente resistiva de la red también es despreciable.[25]

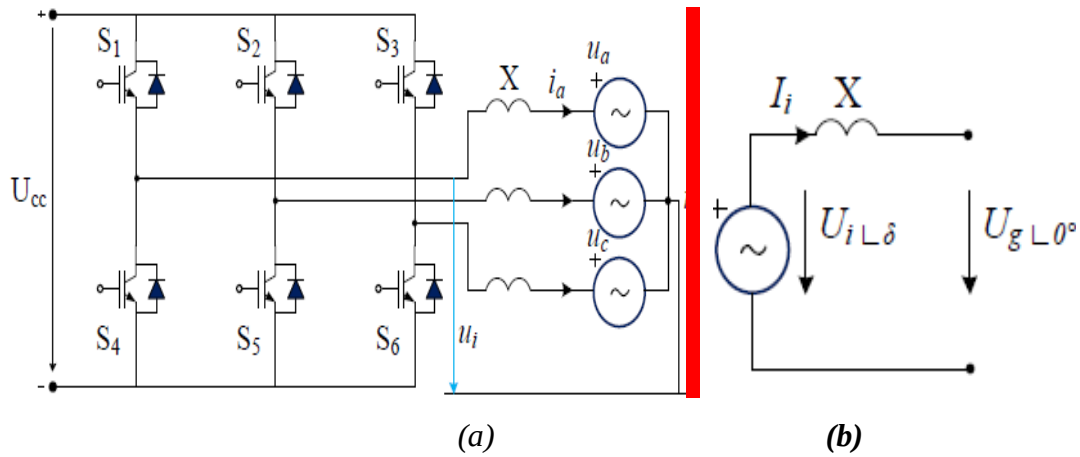


Figura 2.5: Circuito equivalente (a), Circuito de una fase (b) del inversor CC-CA conectado a la red.

Tomando como base el circuito de la Figura 2.5 (a) se pueden escribir las ecuaciones de las tensiones (2.3) y (2.4). Y aplicando la segunda ley de *Kirchhoff* se obtiene la relación entre tensiones (2.5):

$$U_i = U_i \angle \delta = U_i \cos \varphi + j U_i \sin \varphi \quad (2.3)$$

$$U_g = U_g \angle 0^\circ \quad (2.4)$$

$$U_i = U_g + j X I_i \quad (2.5)$$

Despejando la corriente, entregada por la fuente, de la ecuación (2.5) y sustituyéndola en (2.3) y (2.4), y conjugando dicho valor de corriente, se obtiene la ecuación (2.6).

$$I_i^* = \frac{(U_i \cos \varphi - U_g) - jU_i \sin \varphi}{-jX} \quad (2.6)$$

La potencia aparente que se puede obtener en el circuito de la figura 2.5 (a) y sustituyendo el valor del conjugado de la corriente (2.6), se obtiene con la expresión (2.7):

$$S = 3U_g I_i^* = 3U_g I_i \cos \varphi + j3U_g I_i \sin \varphi = P + jQ = \frac{3U_i U_g}{X} \sin \varphi + j3 \frac{U_i U_g \cos \varphi - U_g^2}{X} \quad (2.7)$$

De esta manera, y según (2.7), se pueden obtener las expresiones de la potencia activa, (2.8), y la potencia reactiva, (2.9), del circuito de la figura 2.5 (a).

$$P = \frac{3U_g}{X} U_i \sin \varphi \quad (2.8)$$

$$Q = \frac{3U_g}{X} (U_i \cos \varphi - U_g) \quad (2.9)$$

El inversor es capaz de inyectar o absorber tanto potencia activa como reactiva si se controlan el ángulo de la potencia (factor de potencia) y el ángulo de la tensión del inversor. Además, para inyectar potencia activa a la red, la tensión del inversor debe estar en fase con la tensión de la red, en tanto que para conseguir inyectar potencia reactiva en la red, el valor de la tensión del inversor tiene que ser mayor que la tensión de la red. [25]

Si se realiza la suma vectorial de las componentes de potencia activa (2.8) y reactiva (2.9) se obtiene la ecuación (2.10) utilizada para el cálculo del límite de tensión del inversor y la ecuación (2.11) utilizada para el cálculo del límite de corriente del inversor.

$$U_i(pu) = \sqrt{P(pu)^2 + \left(Q(pu) + \frac{U_g(pu)^2}{X(pu)} \right)^2} - \frac{U_g(pu)}{X(pu)} \quad (2.10)$$

$$I_i(pu) = \frac{\sqrt{P(pu)^2 + Q(pu)^2}}{U_g(pu)} \quad (2.11)$$

En la Figura 2.6 se puede observar la capacidad de generación de potencia activa y reactiva de un generador fotovoltaico en el que el área de operación viable del inversor usado se

marca en gris. Como se muestra, en el primer cuadrante el inversor puede inyectar tanto potencia activa como reactiva, lo mismo que en el cuarto cuadrante, en que el inversor es capaz de inyectar potencia activa y absorber potencia reactiva. [25]

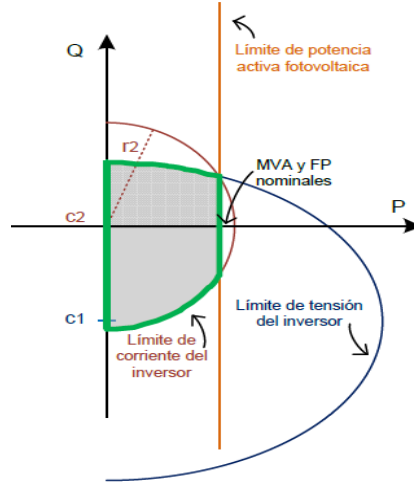


Figura 2.6: Capacidad de potencia activa y reactiva en generadores fotovoltaicos.

2.3 Inyección de potencia reactiva a la red eléctrica a través de los inversores

Para conseguir que las instalaciones fotovoltaicas ayuden a la estabilidad del sistema eléctrico, es necesario implementar en los inversores una serie de modificaciones que permitan adaptarlos a las necesidades de la red.

Actualmente, los inversores fotovoltaicos trabajan extrayendo en todo momento la máxima potencia disponible del generador fotovoltaico. Sin embargo, es posible hacer que los inversores funcionen fuera del punto de máxima potencia cuando la red lo requiera, adecuando convenientemente la potencia entregada a la red. Para ello, el operador de red puede imponer una reducción de la potencia inyectada por los inversores o se puede realizar una regulación de potencia contra frecuencia.[26]

En la mayoría de las instalaciones FV (como ocurre en los parques que actualmente se están instalando en Cuba) los inversores solo entregan a la red la potencia activa generada

por estos; sin embargo el desarrollo de nuevos inversores capaces de entregar además potencia reactiva los hace idóneos para controlar la tensión en la red.[14]

Lo anterior quiere decir, que es posible generar o absorber potencia reactiva sin el uso de bancos de capacitores o inductores; lo que se ha materializado después de la aparición de los convertidores electrónicos de alta potencia basados en *GTOs*, lo que condujo al desarrollo y la aplicación de la nueva generación de dispositivos *FACTS*. Los *FACTS* son dispositivos capaces de controlar el flujo de potencia o variar características de la red, empleando semiconductores de potencia para controlar el flujo de los sistemas de corriente alterna, cuyo propósito es dar flexibilidad a la transmisión de la energía.

El Compensador Estático de Reactivo (*SVC*) se ha utilizado ampliamente para la regulación de la tensión en sistemas de potencia, mediante el control de la inyección de potencia reactiva por los métodos tradicionales, Figura 2.7.

La evolución del *SVC* es el *STATCOM*, llamado Compensadores Estático Sincrónico basado en inversores autoconmutados, Figura 2.9.

2.3.1 Compensador Estático de Reactivo (*SVC*).[27]

El Compensador Estático de Potencia Reactiva o *Static Var Compensator (SVC)* se basa en la utilización de tiristores conjuntamente con condensadores y bobinas. Los elementos más característicos de un *SVC* son:

- Los condensadores conmutados por tiristores (*TSC*): es la configuración más sencilla de la utilización de dispositivos electrónicos de potencia en el control de reactivo. Este elemento está formado por un interruptor de estado sólido en serie con un condensador o batería de condensadores.
- Las bobinas conmutadas por tiristores (*TSR*).
- La bobina controladas por tiristores (*TCR*): su principal misión es la de conseguir una regulación continua y rápida de la potencia reactiva consumida por una bobina. Está formado por una bobina ($R+L$) y un convertidor CA/CA compuesto por dos tiristores en antiparalelo.

En la figura 2.7 se muestra un esquema simplificado para un SVC donde se incluyen los elementos anteriormente mencionados.

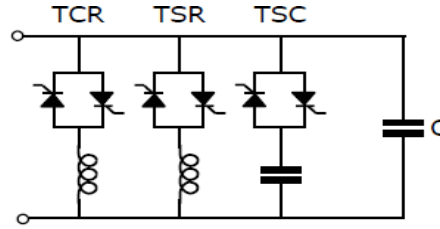


Figura 2.7: Esquema simplificado del SVC.

La Figura 2.8 muestra el diagrama de tensión-corriente del SVC, donde se puede apreciar que es capaz de absorber o generar potencia reactiva.

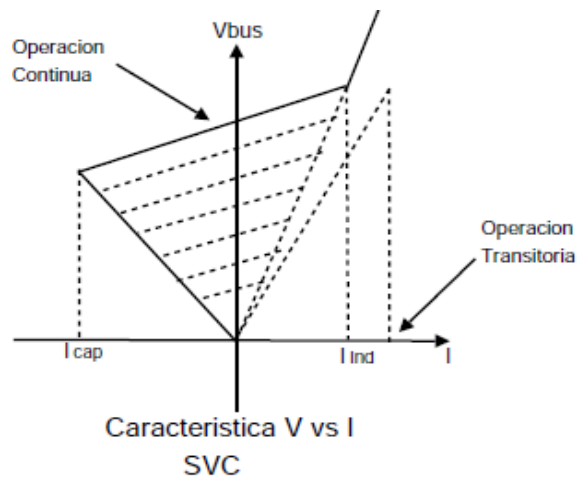


Figura 2.8: Característica V-I del SVC.

2.3.2 Compensador Estático Sincrónico (STATCOM)

El Compensador Estático Síncrono o *Static Synchronous Compensator (STATCOM)* es un dispositivo *FACTS*, compuesto por inversores, transformadores, capacitores y controles, el cual se implementa para controlar potencia reactiva, tanto inductiva como capacitiva. Este dispositivo puede ser utilizado para hacer el control del factor de potencia, regulación de tensión en el punto de conexión y para mejorar la estabilidad dinámica del sistema eléctrico.[28]

En general, el *STATCOM* es un convertidor de estado sólido capaz de generar o absorber de forma controlada tanto potencia reactiva como potencia activa. Es análogo a una máquina

síncrona ideal que genera tensiones balanceadas a la frecuencia fundamental, con amplitud y ángulo controlables. Ésta máquina ideal no tiene inercia y su respuesta es prácticamente instantánea. En la figura 2.9 se muestra la estructura básica de un *STATCOM* (a esta configuración se le denomina *VSI* de 6 pulsos).[29]

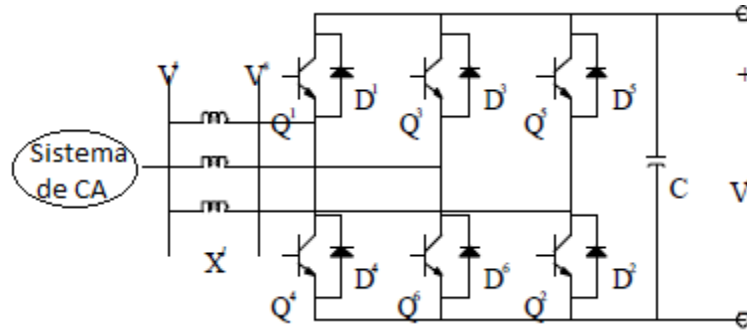


Figura 2.9: Estructura básica de un *STATCOM*, denominado *VSI* de 6 pulsos.

La característica V-I típica del *STATCOM* se muestra en la figura 2.10. Como puede verse, este dispositivo puede suministrar tanto compensación capacitiva como inductiva, y es capaz de controlar su corriente de salida en su capacidad máxima, independientemente de la tensión del sistema. Puede proporcionar plena potencia reactiva capacitiva a cualquier tensión del sistema. En la región inductiva, los inversores son naturalmente conmutados y por lo tanto la capacidad de corriente transitoria está limitada por la máxima temperatura permisible en la unión de los conmutadores.[29]

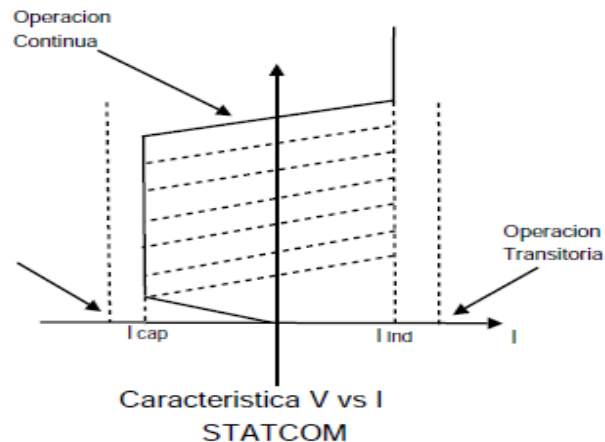


Figura 2.10: Característica V-I del *STATCOM*.

2.4 Utilización del *STATCOM* durante las horas nocturnas en una instalación FV [30]

Por lo general las instalaciones fotovoltaicas en los circuitos de distribución primaria, aunque en determinados casos se pudieran definir como de alta penetración, no constituyen serios problemas de operación para los sistemas eléctricos vistos en su totalidad debido a que en sí no representan cargas de importancia a este nivel.

No obstante, es bien conocido los efectos de las cargas sobre la tensión a lo largo de dichos circuitos, lo que obliga a compensar las caídas excesivas del mismo mediante la instalación de compensadores de potencia reactiva adecuados: los tradicionales y bien conocidos capacitores.

Los inversores asociados a los paneles fotovoltaicos pueden y deben ser explotados para estas funciones aun en los horarios nocturnos, lo que introduce un valor agregado a dichas instalaciones.

Un efecto similar es la aplicación para contrarrestar los “huecos de generación” que provocan los conocidos “huecos de tensión” ocasionados por el impacto de la nubosidad en los paneles, Figura 2.11.

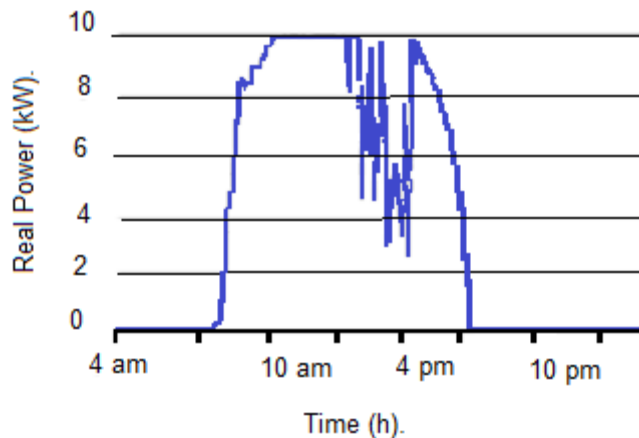


Figura 2.11: Rendimiento Típico de un sistema solar.

2.5 Circuitos de distribución

Los circuitos de distribución se alimentan tradicionalmente de uno o más líneas de subtransmisión. En Cuba los transformadores de la subestación son trifásicos con conexión Delta/Estrella con neutro puesto a tierra. Los niveles de tensión son de 4.16 kV y 13.8 kV, fundamentalmente este último. La capacidad de los transformadores de distribución a lo largo de un alimentador está entre los 5 y los 250 kV.A. Los alimentadores de distribución tienen longitudes entre 2 y 10 km aproximadamente e incluyen dispositivos de seccionalización y control. Es muy frecuente encontrar bancos de capacitores shunt para compensar la potencia reactiva y de esta forma regular la tensión a lo largo del alimentador y reducir las pérdidas de potencia y energía.

En la Figura 2.12 se ilustra un circuito de distribución en el cual se muestran los transformadores, las cargas y las líneas de estos circuitos.

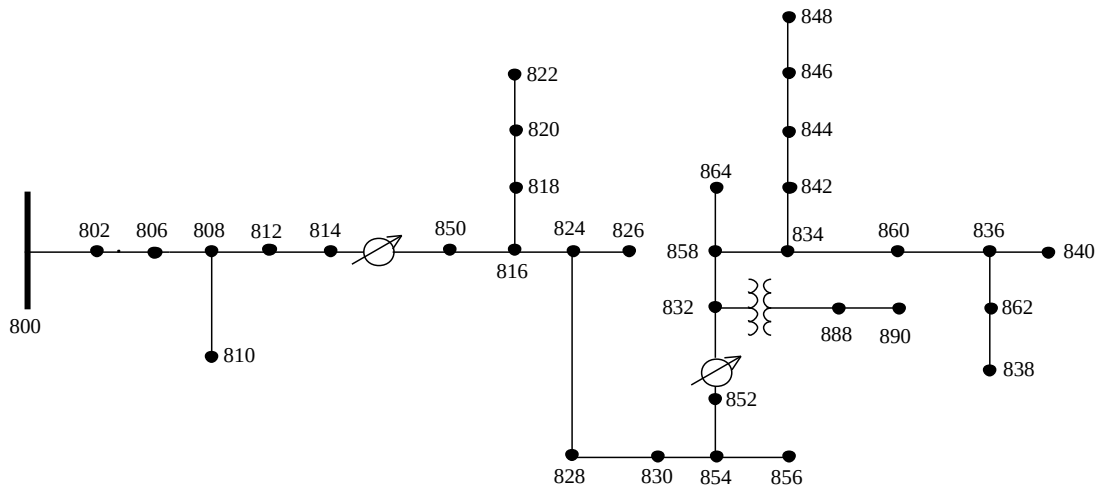


Figura 2.12: Circuito de distribución.

Las cargas de estos circuitos tienen una gran componente de gráficos de carga residencial tanto de potencia activa (a) como de potencia reactiva (b). Curvas típicas en un día de verano se muestran en la Figura 2.13 en los que predomina el pico en las primeras horas nocturnas aunque en las horas del mediodía también ocurre, pero es menos elevado.

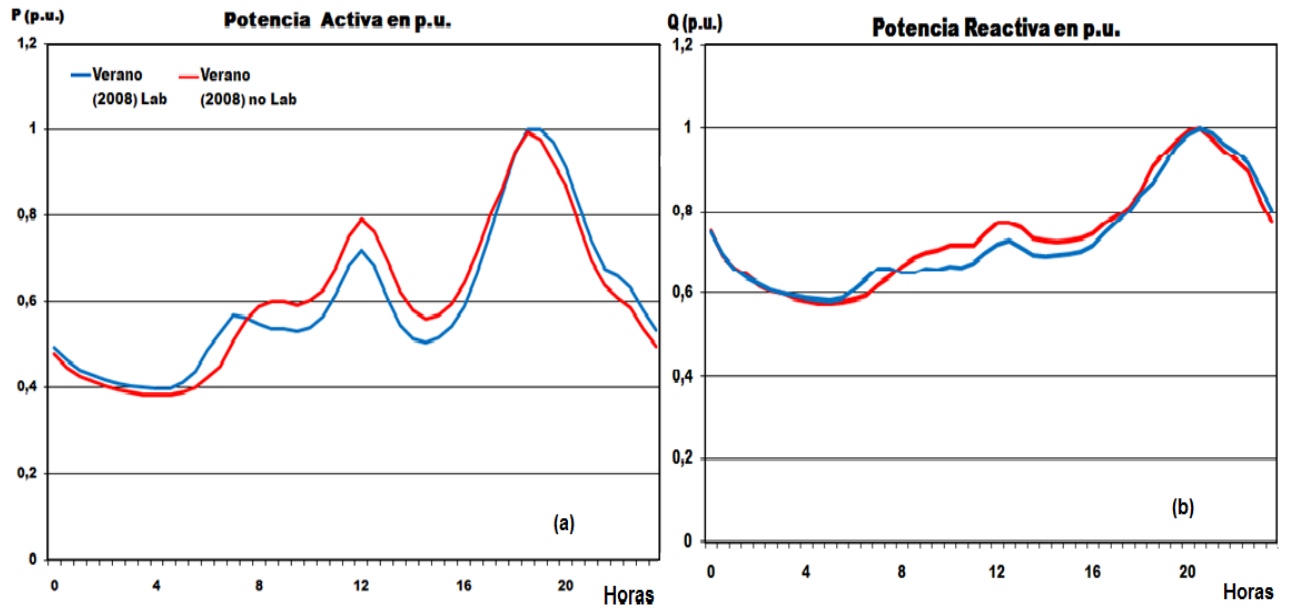


Figura 2.13: Gráfico de carga de Potencia activa (a) y reactiva (b).

Los circuitos de distribución se alimentan del Sistema Electroenergético Nacional (SEN) que es una red de gran extensión, altamente interconectada y de gran complejidad. Para su operación, el SEN cuenta con una infraestructura de mediciones y comunicaciones capaces facilitar el complejo objetivo de entregar la energía eléctrica tanto a grandes como a pequeños consumidores.

Hasta el momento las redes de distribución han carecido de los medios con que cuenta el SEN para realizar su función, sin embargo, con la aparición de las tecnologías que han posibilitado la incorporación de nuevas fuentes de generación de pequeña y mediana potencia que se conectan a estos circuitos (generación distribuida, GD) justifican un control más estricto y riguroso de su operación, lo que ha estimulado el surgimiento de conceptos más avanzados para este tipo de redes: las redes inteligentes o *Smart Grids*.

Estas nuevas redes son capaces de consumir y generar energía con la aparición consecuente de flujos bidireccionales. Según la Plataforma Tecnológica de las *Smart Grids* en la Unión Europea, a las redes inteligentes se las definen como: “las redes eléctricas que pueden integrar inteligentemente las acciones de todos los usuarios conectados (generadores,

consumidores y aquellos que pueden actuar como generadores y consumidores a la vez) para el suministro eléctrico de forma eficiente, sostenible, económica y segura”.[31]

2.6 Paneles Fotovoltaicos (PFV)

Los sistemas fotovoltaicos conectados a las redes eléctricas constituyen una de las tecnologías de la generación distribuida de mayor impacto y crecimiento en los últimos años, lo que los han convertido en una opción atractiva para generar energía eléctrica de una forma ecológica y cada vez más rentable, por lo que se anticipa que en el futuro tendrá un papel importante en los sistemas eléctricos de potencia, teniendo impactos tanto positivos como negativos en las redes de la distribución. A pesar de los adelantos que ha tenido esta tecnología persisten aspectos que deben resolverse de manera satisfactoria para propiciar su desarrollo en gran escala, por lo que es necesario tener conocimiento de una serie de aspectos relacionados con este tema.

El watt pico (Wp) es una medida de la potencia nominal pico de un dispositivo de energía solar fotovoltaica que representa la potencia eléctrica que es capaz de suministrar, bajo condiciones de prueba estándar (*STC*), un panel de un m² de superficie cuando sobre él incide perpendicularmente una potencia de 1 000 W a una temperatura de 25 °C. La eficiencia típica de un panel monocristalino oscila entre un 12 y un 15 %, por lo que se considera, desde el punto de vista práctico que para obtener una potencia neta de 1 kW se requieren entre 8 y 10 m² de superficie fotovoltaica.[7]

Durante el día el parque fotovoltaico genera energía eléctrica, que se entrega directamente a la red, y/o a su vez alimenta las cargas que puedan estar conectadas en este horario. Esta generación dependerá de la época del año y se considera como promedio de 7 a.m. a 7 p.m. aproximadamente, mientras que en las horas restantes, es decir, durante la noche, no se genera energía, esta realidad se puede apreciar en un gráfico de “campana” mostrado en la Figura 2.14.

La nubosidad es uno de los grandes factores que más afecta una planta fotovoltaica ya que deja de producir energía, como puede apreciarse también en la Figura 2.14. En Cuba la

mayor generación de energía ocurre durante el mes de abril, influenciado por esta característica de nuestro clima.

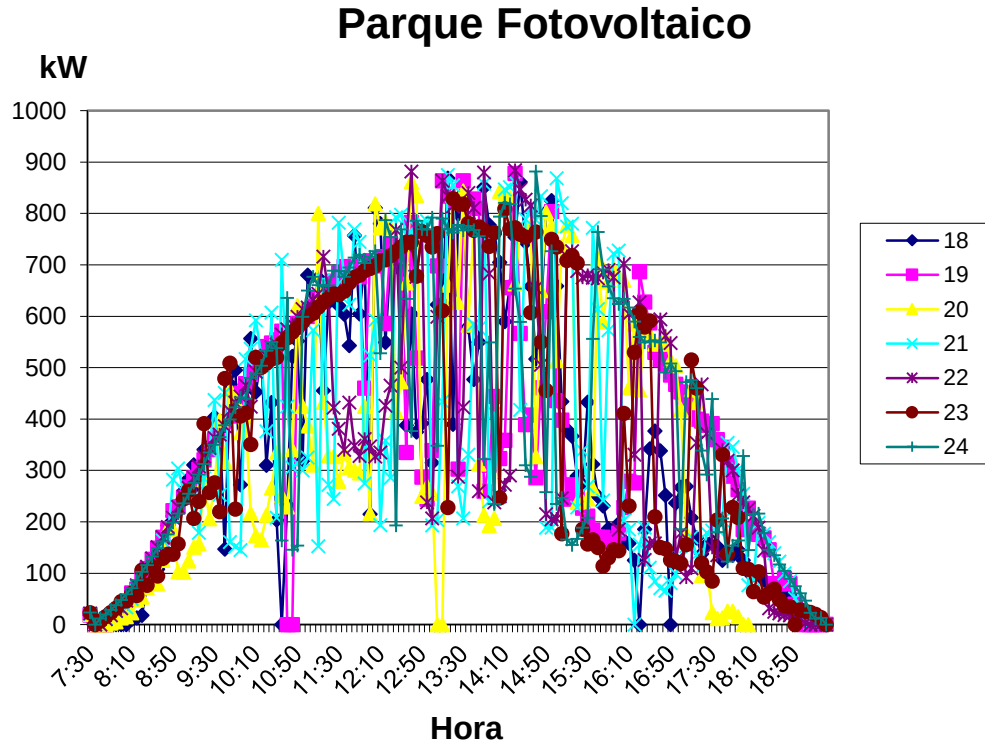


Figura 2.14: Gráfico de generación de una PFV.

2.7 Influencia en la calidad de la energía de los PFV (tensión, armónicos e isla)

El aumento en las últimas décadas del uso de las energías renovables ha llevado a un desarrollo de los PFV en las redes de distribución ofreciendo grandes beneficios. Sin embargo, un alto nivel de penetración de estos sistemas podría causar problemas operacionales teniendo grandes influencias sobre la calidad de la energía.

2.7.1 Influencia de los PFV sobre la tensión

Las redes de la distribución se diseñan de tal manera que la potencia fluya en la red de una tensión media (MT) a una tensión baja (LT), pero con la nueva tendencia de integrar los sistemas FV en la red de distribución ha variado el comportamiento del alimentador de

distribución tradicional. Esto significa que la tensión al extremo de la carga puede llegar a ser mayor que la tensión de suministro del alimentador.

La conexión de los sistemas FV proporciona cambios en el perfil de la tensión a lo largo de un alimentador, invirtiendo la dirección y magnitud de los flujos de potencia activa y reactiva. No obstante, el impacto en la regulación de la tensión puede ser positiva o negativa, en dependencia del sistema y de las características del generador de incorporado en el circuito de distribución, así como la situación del sistema FV. La instalación de módulos FV a lo largo de los alimentadores de distribución de potencia puede causar sobretensiones debido a la alta inyección de potencia activa y reactiva.[32]

En la Figura 2.15 se puede apreciar la diferencia de tensión cuando está conectado o no una planta solar FV.

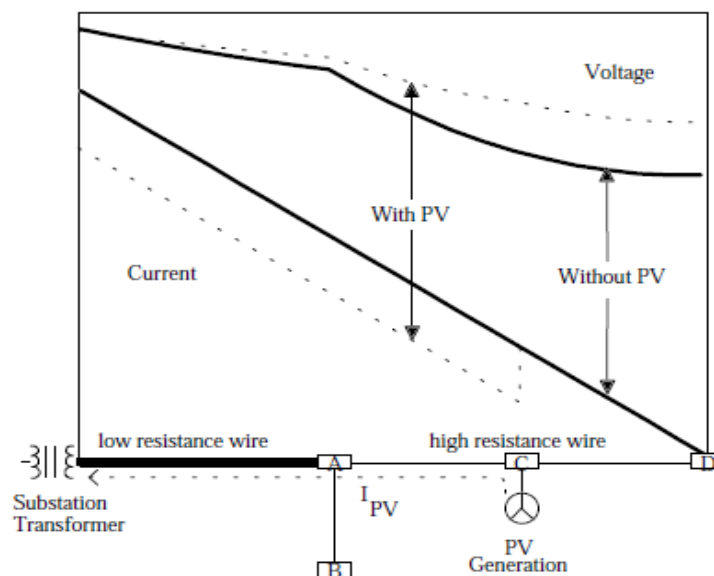


Figura 2.15: Perfil de tensión con y sin PFV

La alta penetración fotovoltaica en un circuito de distribución eléctrico puede degradar severamente la calidad de la potencia debido a la caída o al aumento de la tensión causada por la rapidez de la generación FV durante el paso de las nubes. En la red de distribución de baja tensión con una alta penetración FV, pueden llevar a las variaciones imprevisibles de

las tensiones en el nodo y el flujo de potencia, principalmente en las redes residenciales y rurales débiles. (Figura 2.16).[32]

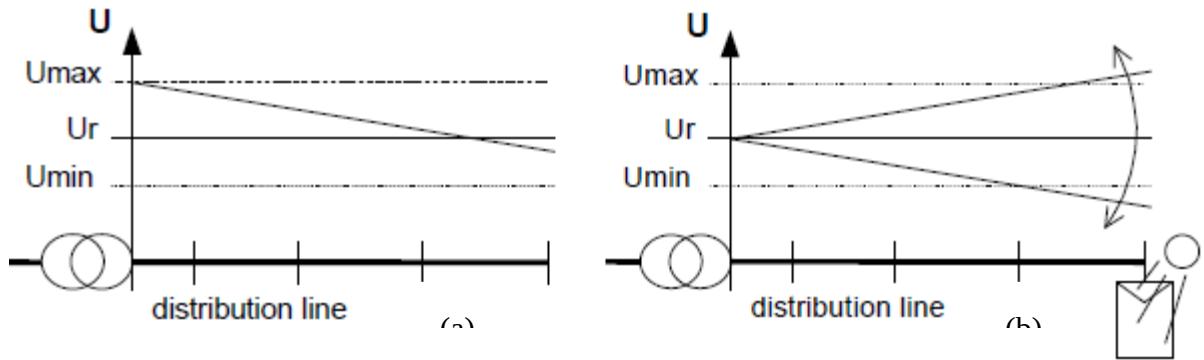


Figura 2.16: Perfil de tensión de línea sin (a), con la generación de un PFV (b).

Por ejemplo para un sistema como el mostrado en la Figura 2.17, con una carga y un PFV, la variación de la tensión en el alimentador puede definirse como (Ecuación 2.12):

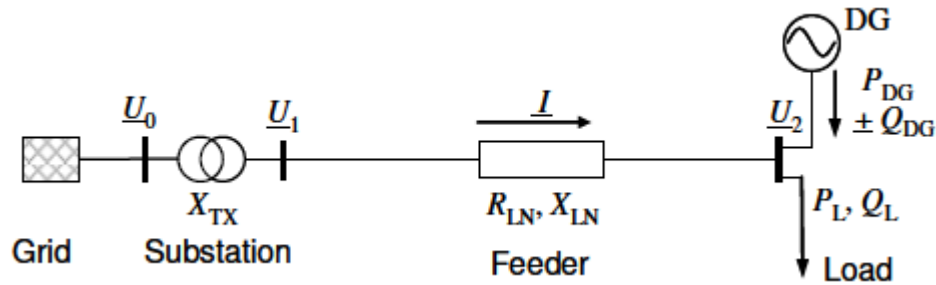


Figura 2.17: Diagrama de una línea con una carga y un PFV para ilustrar la variación de la tensión en un alimentador.

$$\Delta U = U_1 - U_2 \approx \frac{R_{LN}(P_L - P_{DG}) + X_{LN}(Q_L - (\pm Q_{DG}))}{U_2} \quad (2.12)$$

La cual indica que si el PFV genera potencia reactiva o el DG no intercambia potencia reactiva con la red, el PFV siempre disminuirá la variación de la tensión a lo largo del alimentador. Si la potencia generada es mayor que la carga del alimentador, la potencia fluirá del PFV a la subestación y causa un aumento de la tensión. Además si el PFV absorbe

o genera potencia reactiva, puede contribuir a mantener la tensión con mínimas variaciones.[33]

2.7.2 Influencia de los PFV sobre los armónicos

Los armónicos siempre están presentes en los sistemas de potencia en mayor o menor proporción, situación ésta que se ha venido intensificando en las dos últimas décadas debido al uso cada vez mayor de equipos que emplean rectificadores. Los sistemas FV de hecho pueden ser una fuente nada despreciable en la inyección de armónicos a la red debido a los inversores asociados a los mismos.

En la actualidad, como ya se mencionó anteriormente, se diseñan los inversores con tecnologías *IGBT's* que usan la modulación del ancho del pulso, para generar una onda sinusoidal lo más “pura” posibles, garantizando así, que el contenido de armónicos de la corriente sea pequeño para que mejore la calidad del suministro.[32]

Los inversores multiniveles son aquellos que presentan un número de niveles de tensión de salida mayor o igual a 3, incluyendo el nivel de tensión cero. Estos inversores son utilizados para obtener mejores formas de onda de las que se pueden obtener con los inversores de dos niveles; cuando el número de niveles de tensión aumenta, la forma de la onda de salida tiende a la forma de onda sinusoidal con lo que el contenido de armónicos se reduce, (Figura 2.18). Además de mejorar el comportamiento de los armónicos, los inversores multinivel son utilizados para poder manejar mayores potencias; aumentando el número de *IGBT's*. [34]

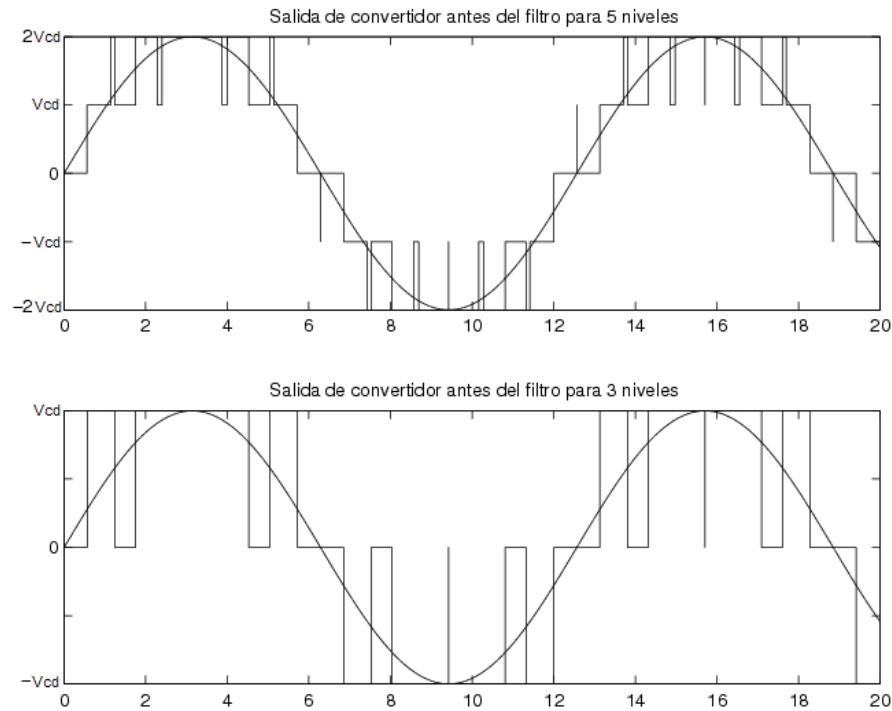


Figura 2.18: Forma de onda de salida del inversor de 5 y 3 niveles antes del filtro

2.7.3 Operación en isla de los sistemas FV en la red

La operación en isla es una situación que se presenta cuando por alguna razón, una parte de la generación distribuida se convierte en la única fuente de alimentación de las cargas próximas a ella, es decir, ocurre cuando el generador distribuido (o grupo de generadores distribuidos) continúa dando energía a una porción del sistema que se ha separado del sistema principal. La separación de una isla del resto del sistema suele ocurrir como consecuencia de fallas que se aíslan por la acción de las protecciones correspondientes. En la Figura 2.19 se puede ver tres zonas en las que se ilustra la isla en áreas diferentes.[35]

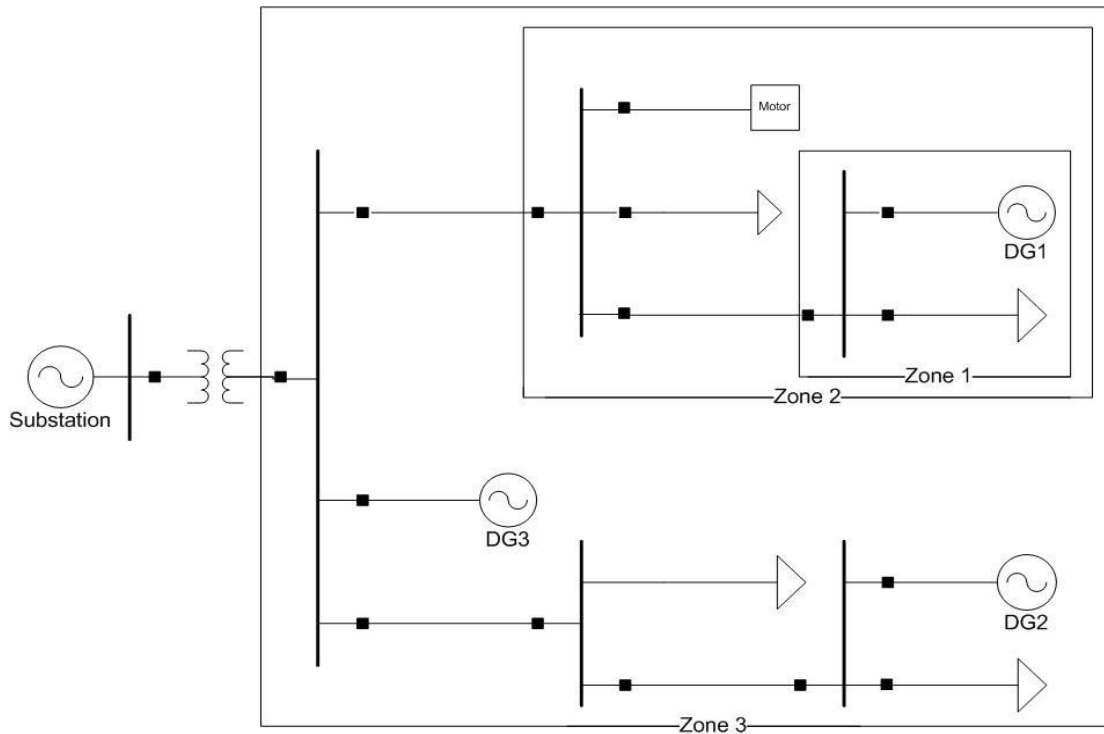


Figura 2.19: Ilustración de la isla.

El modo de isla tiene dos formas [35]:

1. La isla involuntaria, ocurre cuando una porción del sistema de distribución se aísla eléctricamente del resto del sistema de potencia, pero la GD continúa dando energía a los consumidores, en este caso por los PFV, al subsistema aislado. Para evitar el peligro y daños causados por la isla involuntaria, la mayoría de la DG conectada a la red exigen que tengan un mecanismo de anti-isla para proteger al sistema cuando esto ocurre.
2. La isla intencional, se realiza con el propósito de mejorar la calidad de suministro y la fiabilidad de la red. Para que el sistema trabaje en isla intencional hay que conocer la capacidad de generación de la DG (PFV), el estado del sistema ante de las fallas, y el total de cargas locales para que el sistema aislado puede correr firmemente después de ser desconectado de la red.

2.8 Operación de los PFV en circuitos de distribución

Los sistemas fotovoltaicos en los circuitos de distribución ofrecen beneficios ya que reducen las pérdidas en las redes e incrementan la confiabilidad y la calidad del suministro de energía eléctrica proporcionando regulación de tensión y control de energía reactiva.

Sin embargo, la generación de los PFV está expuesta a la aparición de “huecos de generación”, que incluso pueden llegar a cero debido a la aparición súbita de la alta nubosidad, por lo que requieren de una segunda fuente de “apoyo” para mantener el servicio, o sea, que es el por ciento de penetración fotovoltaica en un circuito dado ($\text{Potencia FV} / \text{Potencia demandada}$) uno de los factores fundamentales que incide en las fluctuaciones de la tensión y la disponibilidad de generación. Estos son problemas que todavía no se han resuelto satisfactoriamente con las fuentes de energía renovables, especialmente con altos niveles de generación.

2.8.1 Reducción de pérdidas de potencia y energía por el efecto de los PFV

Las pérdidas en las líneas eléctricas dependen de las transferencias de potencia y como es obvio, la GD influye en su reducción, por lo tanto, los módulos FV constituyen una forma ideal para lograr este propósito.[36]

La colocación de módulos FV para minimizar las pérdidas en las líneas es similar al efecto que se produce al situar bancos de capacitores, teniendo en cuenta que en este último caso el efecto es solo sobre la transferencia de potencia reactiva. Sin embargo con los nuevos inversores, capaces de generar además, potencia reactiva, el efecto es más abarcador.

En general el impacto de la GD sobre las pérdidas depende de varios factores como es el grado de penetración y la nubosidad para el caso de los PFV, el perfil de la demanda y de la generación, la ubicación de la GD en la red de distribución, así como su topología. Estos últimos dos factores se encuentran muy interrelacionados, ya que la ubicación de la generación es muy importante desde el punto de vista de las pérdidas pues, cuanto más cerca a los lugares de consumo, mayor reducción en las pérdidas habrá, esto dependerá del tipo de red (media o baja tensión).[37]

La ubicación de los PFV en las redes de distribución es una gran alternativa para la generación distribuida, o sea un PFV puede compensar múltiples cargas distribuida a lo largo de un circuito.

En la Figura 2.20 se muestra el efecto de la penetración de los PFV en un circuito primario en el cual con un 0% de penetración FV el sistema se comporta normalmente, a medida que aumenta el % de penetración FV el valor de la potencia se invierte.

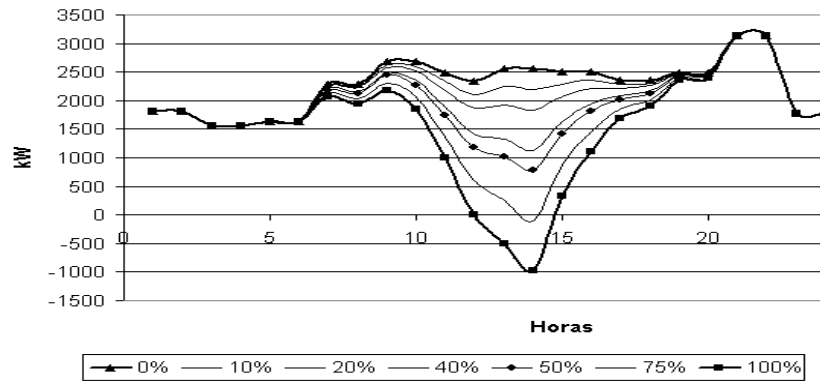


Figura 2.20: Efecto de la penetración de los PFV sobre las pérdidas en un circuito primario

2.8.2 Efecto de los huecos de tensión sobre la calidad de la energía

Un hueco de tensión es una disminución brusca de la tensión, seguida de su restablecimiento tras un corto lapso de tiempo. Existe un tiempo de recuperación de la tensión a los valores admisibles después de que se despeje la falla, el hecho de que un circuito soporte huecos de tensión significa que el equipo generador y las cargas se mantendrán acoplados al sistema eléctrico sin sufrir desconexión, de acuerdo al perfil especificado por el operador de la red establecida para cada país (Figura 2.21).[38]

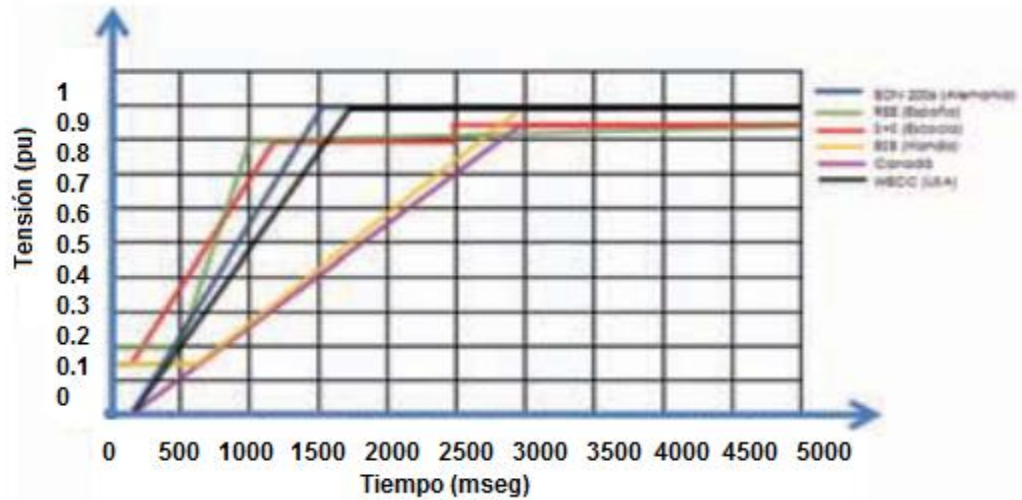


Figura 2.21: Curva tensión-tiempo que define el área de “hueco de tensión” en el punto de conexión a red que debe ser soportado por la instalación.

Cuando se produce un hueco de tensión (tanto trifásico simétrico, como monofásico o bifásico), el inversor, con la ayuda de su sistema de monitorización detecta la condición de hueco, y entra en el modo *LVRT (Low Voltage Ride Through)* y en función de la normativa aplicable, se activan las generaciones de potencia reactiva y activa correspondientes. Como ya se indicó, el funcionamiento de un inversor fotovoltaico es capaz de inyectar a la red tanto potencia activa como reactiva.[38]

2.9 Impacto de la generación de potencia reactiva de los PFV sobre los circuitos

Los PFV's son principalmente considerados una fuente activa de energía, sin embargo, para sistemas de altas cargas con máxima penetración FV, el bajo perfil de tensión puede ser un gran cambio para el sistema. En el sistema de potencia reestructurado, el perfil de tensión debe mantenerse en los límites para producir más potencia reactiva, ajustando la corriente de campo, agregando o quitando los dispositivos de potencia reactiva (el capacitor y los reactores) o cambiando la posición del tap en el transformador. La potencia reactiva tiene importancia en la presencia de la DG la cual puede causar problemas en el aumento de la tensión.[39]

Existen diferentes métodos de compensación de potencia reactiva entre los que se encuentra la instalación de capacitores de potencia en paralelo con la carga inductiva a compensar y la utilización de máquinas sincrónicas de gran potencia trabajando como generadores de potencia reactiva, hoy día con la creciente tendencia de usar la generación de potencia no convencional (como la energía solar) se ha introducido una nueva forma capaz de absorber y proporcionar la potencia reactiva, esta tecnología está dada por el inversor (SVC, STATCOM) del cual ya se había hablado anteriormente.

En la Figura 2.22 se puede apreciar las fluctuaciones de potencia reactiva con y sin PFV.[40]

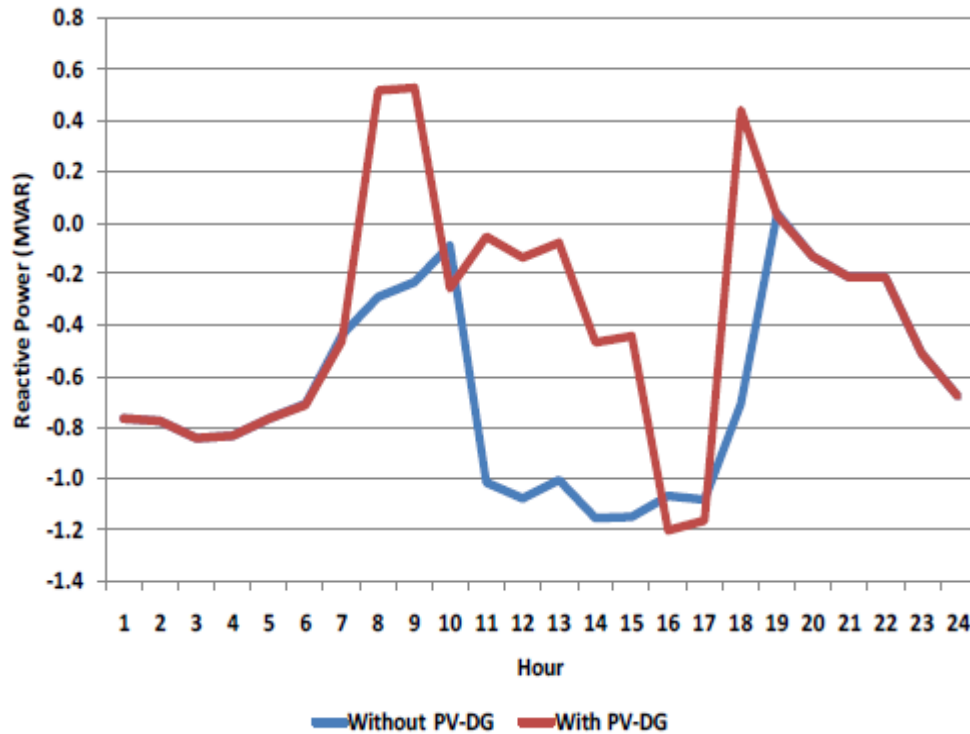


Figura 2.22: Fluctuaciones de potencia reactiva con y sin PFV.

Conclusiones del capítulo

En este capítulo se puede ver como los inversores funcionan transmitiendo potencia activa a la red eléctrica y a su vez, tienen la capacidad de inyectar y absorber potencia reactiva siendo la capacidad de absorber, potencia reactiva, mayor que la capacidad de inyectarla.

Los paneles fotovoltaicos se consideran fuentes de generación distribuida con características muy propias que influyen poderosamente en su ubicación dentro de las redes de distribución para así contribuir al ahorro de energía.

CAPITULO 3: EFECTO DE LOS PANELES FOTOVOLTAICOS SOBRE LAS PÉRDIDAS DE POTENCIA Y ENERGÍA EN LAS REDES DE DISTRIBUCION

La flexibilidad, eficiencia y sobre todo, la disminución de los costos de los sistemas fotovoltaicos ha estimulado la construcción de grandes concentraciones de paneles que se están incorporando a los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP), abriendo así un nuevo capítulo en el área del uso de la energía renovable y de la generación distribuida.

En este capítulo se estudia el comportamiento de un circuito típico con dos escenarios diferentes en cuanto a los gráficos horarios de carga con PFV, el que se simula con el programa RADIAL, y una vez instalados los PFV se analizan las pérdidas de energía en las líneas.

3.1 Programa RADIAL

El software RADIAL es un sistema concebido para realizar los estudios relacionados con las redes radiales de distribución, el cual ofrece los resultados a través de cuatro reportes: General, Nodos, Líneas y Cargas. Está programado sobre Delphi 5 usando técnicas de programación orientada a objetos y requiere de configuraciones mínimas, prácticamente disponibles en cualquier PC, para su ejecución.

La información general de RADIAL se encuentra en las Bibliotecas (aparecen el menú de los gráficos de carga, transformadores, conductores, cables, estructura, fusibles, relés y restauradores) y en las Opciones (aparece el menú para Aplicaciones, que contiene flujos de cargas, capacitores, protecciones, cambio de conductores y balanceo; y el menú Generales,

para el formato, los perfiles y el color que se va a emplear), ambos en la barra de herramientas.

Sin dudas la mayor potencialidad para la aplicación que se analiza, lo constituye el hecho de que este software permite modelar el comportamiento horario de las cargas, incluida la generación de los PFV, con lo cual es posible estudiar el comportamiento del circuito durante las 24 horas de día.

Para la edición de un circuito, RADIAL cuenta con barras con sus correspondientes botones para su manejo.

Una vez conformado el diagrama monolineal del circuito, se le incorporan los datos, para lo cual se activan sus correspondientes ventanas.

3.2. Simulación de los módulos fotovoltaicos conectados a la red

Como se sabe, las instalaciones FV están tomando cada día más importancia dentro de las redes de distribución. En el capítulo anterior se había mencionado que el inversor es uno de los principales elementos de una instalación FV, y tiene su capacidad limitada por su corriente activa y por la reactiva (Ver Figura 2.4).

Como la función principal de un PFV es generar potencia activa, la capacidad de corriente del inversor debe usarse con este fin, no obstante, en las horas en que esta capacidad de generación se reduce por limitaciones del panel, es posible aprovecharla para generar potencia reactiva, lo que indica una dependencia de esta sobre aquella. El gráfico típico de generación de potencia activa se muestra en la Figura 3.1.

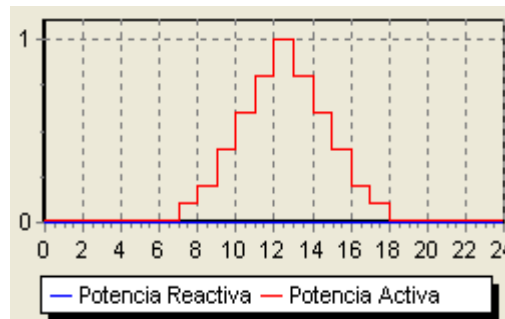


Figura 3.1: Gráfico de carga diario del panel con potencia activa pura.

De acuerdo a la conocida Ecuación 3.1 se determina la corriente reactiva del inversor sin sobrecargarse, lo que se muestra en la Tabla 3.1.

$$I_{max.inv} = \sqrt{(I_a^2) + (I_r^2)} \quad (3.1)$$

Tabla 3.1: Valores de corriente activa y reactiva que genera el panel sin que se sobrecargue el inversor.

Hora	Ia	Ir
0-7	0	1
7-8	0.1	0.99
8-9	0.2	0.98
9-10	0.4	0.92
10-11	0.6	0.8
11-12	0.8	0.6
12-13	1	0
13-14	0.8	0.6
14-15	0.6	0.8
15-16	0.4	0.92
16-17	0.2	0.98
17-18	0.1	0.99
18-24	0	1

La combinación de la corriente activa y reactiva aparece en la Figura 3.2.

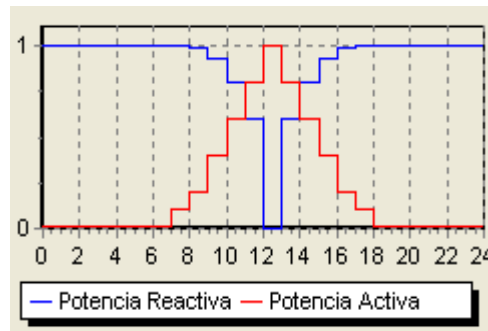


Figura 3.2: Gráfico de carga diario del panel con potencia activa y potencia reactiva

3.2.1. Descripción del circuito simulado en el programa RADIAL

Es un circuito trifásico de 6.4 km aproximadamente compuesto por 16 nodos, 16 cargas trifásicas y tres paneles solares de pequeña capacidad ubicados en diferentes puntos del circuito, (Nodos 4, 14 y 18) a una tensión de 13.8 kV y una potencia total instalada de 2500 kW. Los gráficos horarios de cada carga no son iguales aunque en general muestran su demanda máxima en los horarios diurno y nocturno (Figura 3.3).

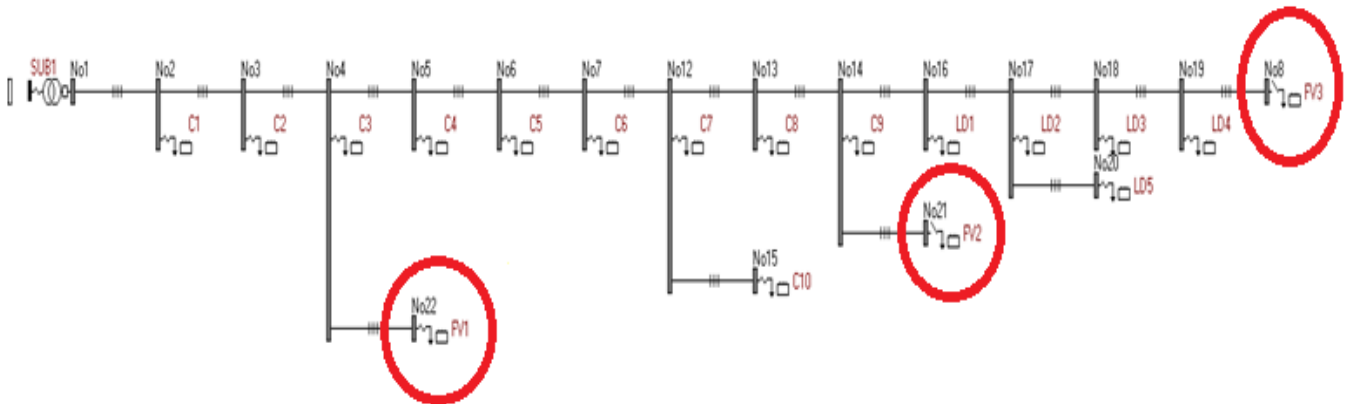


Figura 3.3: Circuito simulado en el programa RADIAL con módulos fotovoltaicos.

El análisis del circuito se realiza para dos escenarios diferentes de carga, es decir, carga con pico diurno y carga con demanda máxima en el horario nocturno, Figuras 3.4 y Figura 3.5 respectivamente.



Figura 3.4: Gráfico de la carga con el pico diurno.

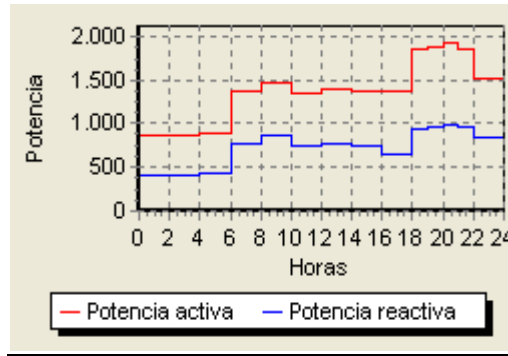


Figura 3.5: Gráfico de la carga con el pico nocturno.

3.3 Análisis de los resultados obtenidos con el programa RADIAL

Para realizar el análisis de los resultados se parte de las condiciones iniciales del circuito sin la presencia de paneles, o sea con cero % de penetración para tomar este estado como referencia.

Al realizar el estudio en un circuito de distribución cuyo recorrido se caracteriza por encontrarse en un área con poco espacio disponible para la instalación de PFV, ya que, como se ha señalado se requieren entre 8 y 10 m² por kWp. Se han usado tres paneles de 100 kWp/cu, con el gráfico horario de P y Q de la Figura 3.4 y Figura 3.5. Evidentemente el % de penetración es bajo, algo típico en nuestras redes de distribución primaria debido a las características urbanas de su recorrido. Se consideran cuatro casos:

- ✓ Un panel en el Nodo 4
- ✓ Uno en el Nodo 14
- ✓ Otro en el Nodo 18.
- ✓ Y la combinación de los tres anteriores

Cuando solo se conecta uno, el % de penetración es de $100/2159 = 0.05$, o sea un 5%, mientras que con los tres es del 14%.

Los principales resultados se muestran para los horarios de máxima y mínima en las tablas que se anexan. Las variables que se analizan son las siguientes:

P_{AC} = Potencia activa de las cargas (kW)

Q_{RC} = Potencia reactiva de las cargas (kV.Ar)

ΔP_{aL} = Pérdidas activas en líneas (kW)

ΔE_{aL} = Pérdidas de energía activas en líneas (kW.h/día)

ΔE_{rL} = Pérdidas de energía reactivas en líneas (kV.Ar.h/día)

F_p = Factor de Potencia

F_c = Factor de Carga

3.3.1 Resultados del circuito con pico diurno

Tabla 3.2: Estado inicial del circuito

	Hora de Máxima (8:00 a.m.)	Hora de Mínima (4:00 a.m.)
P_{ac} (kW)	2 159	879
Q_{rc} (kVAr)	1 282	468
ΔP_{aL} (kW)	67	10
F_p	0.85	0.88
F_c	0.67	0.67
ΔE_{aL} (kW.h/día)	784	
ΔE_{rL} (kVAr.h/día)	601	

(Los valores de pérdidas de energía diaria, resaltados en verde y que sirven de referencia, se incluirían en todas las tablas para facilitar las comparaciones)

Tabla 3.3: Circuito con pico diurno con los paneles de 100 kW entregando solo potencia activa en la hora de máxima.

	Hora de Máxima (8:00 a.m.)			
	Ubicación FV1 (Nodo 4)	Ubicación FV2 (Nodo 14)	Ubicación FV3 (Nodo 18)	Ubicación FV1, FV2, FV3 (Nodos 4, 14 y 18)
P_{ac} (kW)	2 139	2 139	2 139	2099
Q_{rc} (kV.Ar)	1 282	1 282	1 282	1282
ΔP_{aL} (kW)	67	66	66	65
ΔE_{aL}(inicial) (kW.h/día) = 784				
ΔE_{aL} (kW.h/día)	774	759	756	722

Tabla 3.4: Circuito con pico diurno con los paneles de 100 kW entregando solo potencia activa en la hora de mínima.

	Hora de Mínima (4:00 a.m.)			
	Ubicación FV1 (Nodo 4)	Ubicación FV2 (Nodo 14)	Ubicación FV3 (Nodo 18)	Ubicación FV1, FV2, FV3 (Nodos 4, 14 y 18)
P_{ac} (kW)	878	878	878	876
Q_{rc} (kVAr)	468	468	468	468
ΔP_{aL} (kW)	10	10	10	10
ΔE_{aL}(inicial) (kW.h/día) = 784				
ΔE_{aL} (kW.h/día)	774	759	756	722

Tabla 3.5: Circuito con pico diurno con los paneles entregando potencia activa 100 kW y reactiva 100 kVAr en la hora de máxima.

	Hora de Máxima (8:00 a.m.)			
	Ubicación FV1 (Nodo 4)	Ubicación FV2 (Nodo 14)	Ubicación FV3 (Nodo 18)	Ubicación FV1, FV2, FV3 (Nodos 4, 14 y 18)
P_{ac} (kW)	2 139	2 139	2 139	2 099
Q_{rc} (kVAr)	1 380	1 380	1 380	1 576
ΔP_{aL} (kW)	66	63	63	57
ΔE_{aL}(inicial) (kW.h/día) = 784				
ΔE_{aL} (kW.h/día)	759	718	711	633

Tabla 3.6: Circuito con pico diurno con los paneles entregando potencia activa 100 kW y reactiva 100 kVAr en la hora de mínima.

	Hora de Mínima (4:00 a.m.)			
	Ubicación FV1 (Nodo 4)	Ubicación FV2 (Nodo 14)	Ubicación FV3 (Nodo 18)	Ubicación FV1, FV2, FV3 (Nodos 4, 14 y 18)
P_{ac} (kW)	878	878	878	876
Q_{rc} (kVAr)	568	568	568	768
ΔP_{aL} (kW)	10	9	9	8
ΔE_{aL}(inicial) (kW.h/día) = 784				
ΔE_{aL} (kW.h/día)	759	718	711	633

3.3.2 Resultados del circuito con pico nocturno

Tabla 3.7: Estado inicial del circuito.

	Hora de Máxima (8:00 a.m.)	Hora de Mínima (4:00 a.m.)
Pac (kW)	1922	869
Qrc (kVAr)	988	416
ΔPa_L (kW)	59	11
Fp	0.88	0.9
Fc	0.7	0.7
ΔEa_L (kW.h/día)	661	
ΔEr_L (kVAr.h/día)	506	

(Los valores de pérdidas de energía diaria, resaltados en verde y que sirven de referencia, se incluirían en todas las tablas para facilitar las comparaciones)

Tabla 3.8: Circuito con pico nocturno con los paneles de 100 kW entregando solo potencia activa en la hora de máxima.

	Hora de Máxima (8:00 p.m.)			
	Ubicación FV1 (Nodo 4)	Ubicación FV2 (Nodo 14)	Ubicación FV3 (Nodo 18)	Ubicación FV1, FV2, FV3 (Nodos 4, 14 y 18)
Pac (kW)	1 921	1 921	1 921	1919
Qrc (kVAr)	988	988	988	988
ΔPa_L (kW)	59	59	59	59
$\Delta Ea_L(\text{inicial})$ (kW.h/día) = 661				
ΔEa_L (kW.h/día)	653	643	642	619

Tabla 3.9: Circuito con pico nocturno con los paneles de 100 kW entregando solo potencia activa en la hora de mínima.

	Hora de Mínima (12:00 a.m.)			
	Ubicación FV1 (Nodo 4)	Ubicación FV2 (Nodo 14)	Ubicación FV3 (Nodo 18)	Ubicación FV1, FV2, FV3 (Nodos 4, 14 y 18)
P_{ac} (kW)	868	868	868	866
Q_{rc} (kVAr)	416	416	416	416
ΔP_{aL} (kW)	11	11	11	11
ΔE_{aL}(inicial) (kW.h/día) = 661				
ΔE_{aL} (kW.h/día)	653	643	642	619

Tabla 3.10: Circuito con pico nocturno con los paneles entregando potencia activa 100 kW y reactiva 100 kVAr en la hora de máxima.

	Hora de Máxima (8:00 p.m.)			
	Ubicación FV1 (Nodo 4)	Ubicación FV2 (Nodo 14)	Ubicación FV3 (Nodo 18)	Ubicación FV1, FV2, FV3 (Nodos 4, 14 y 18)
P_{ac} (kW)	1 921	1 921	1 921	1 919
Q_{rc} (kVAr)	1 088	1 088	1 088	1 288
ΔP_{aL} (kW)	58	57	56	53
ΔE_{aL}(inicial) (kW.h/día) = 661				
ΔE_{aL} (kW.h/día)	639	607	603	541

Tabla 3.11: Circuito con pico nocturno con los paneles entregando potencia activa 100 kW y reactiva 100 kVAr en la hora de mínima.

	Hora de Mínima (12:00 a.m.)			
	Ubicación FV1 (Nodo 4)	Ubicación FV2 (Nodo 14)	Ubicación FV3 (Nodo 18)	Ubicación FV1, FV2, FV3 (Nodos 4, 14 y 18)
Pac (kW)	868	868	868	866
Qrc (kVAr)	516	516	516	716
ΔPa_L (kW)	10	10	10	9
$\Delta Ea_L(\text{inicial})$ (kW.h/día) = 661				
ΔEa_L (kW.h/día)	639	607	603	541

Conclusiones de capítulo

La demanda de los circuitos tanto de potencia activa como de potencia reactiva debe disminuir en una magnitud máxima de 100 (el valor escogido para el panel/inversor) en el momento de las máximas generaciones de la P y de la Q respectivamente. Ahora bien, como la limitación de entrega de potencia a la red está limitada por la del inversor, estas potencias van a estar condicionadas a la política general de la explotación de los paneles, que siempre será máximo aprovechamiento de la energía solar. Como es lógico el impacto del panel sobre cada circuito es diferente en función de su gráfico de carga horario.

Como se ha planteado, los paneles que se están usando en los circuitos que se han tomado como ejemplos, son de valores pequeños. En las Tablas 3.2 a 3.11 anteriormente mostradas, tanto para el circuito con pico diurno como para el de pico nocturno, se observa que las pérdidas de energía en las líneas disminuyen solo ligeramente; estas disminuciones son más marcadas cuando los paneles generan tanto potencia activa como potencia reactiva. Es evidente, que cada caso en particular tiene sus propias características.

Para los dos casos analizados, la disminución de las pérdidas de energía en las líneas va aumentando a medida que el panel se coloca a mayor distancia de la subestación hasta un cierto límite, tal como sucede con los bien conocidos estudios de la colocación de bancos de capacitores en los circuitos de distribución debido a que su influencia sobre la red se manifiesta en un tramo mayor.

Así pues para los valores de PFV usados, que resultan de pequeña potencia debido a las limitaciones de espacio para situarlos, es irrelevante la disminución de las pérdidas de potencia en las líneas; estas se mantienen prácticamente invariables. Los mayores beneficios están dados por el ahorro de combustible traducido en desarrollo económico y por la disminución de emisiones de gases contaminantes.

CONCLUSIONES

- Como los paneles fotovoltaicos solo generan cuando reciben radiación solar, su contribución energética es solo de día; lo que constituye una de sus principales desventajas que tiene que ser cuidadosamente analizada.
- Los inversores asociados a los PFV funcionan inyectando potencia activa a la red eléctrica. En las versiones más modernas pueden, a la vez, suministrar y absorber potencia reactiva, lo que se ha abierto una nueva forma de operación de los circuitos de distribución.
- Los PFV constituyen fuentes de generación distribuida altamente deseada, pero con características muy propias, por ejemplo la afectación de la entrega de energía debido a la nubosidad.
- La ubicación de los PFV en los circuitos de distribución es una variable que influye poderosamente sobre su comportamiento, sin embargo, sobre ella no hay grandes posibilidades de elección.
- La cuantificación de los efectos de los PFV en los circuitos de distribución se pueden determinar mediante el sistema RADIAL.

RECOMENDACIONES

Teniendo en cuenta los resultados alcanzados en el presente trabajo se recomienda:

- Aunque el tratamiento que se ha hecho del tema es de carácter general, los ensayos que se han realizado se han basado en los casos particulares más probables con

valores lógicos, por lo que se recomienda realizar este análisis con circuitos radiales reales que acrediten lo antes planteado.

- En la medida que se disponga de los recursos necesarios se proceda también a la instalación de la PFV en techos y azoteas por ser los lugares idóneos para su incorporación a los circuitos de distribución.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] G. J. J. Gattorno "La Penetración Fotovoltaica en las redes De Distribución", Universidad Centra Marta Abreu de las Villas, 2009.
- [2] H. S. Santana, "Determinación de la incidencia de la instalación de nuevos parques fotovoltaicos en la red de 33 kV de Yaguarama"., " Departamento de Electroenergética, UNIVERSIDAD CENTRAL MARTA ABREU DE LAS VILLAS., Santa Clara, Cuba, 2013.
- [3] G. V. Vázquez, "Explotación de red de 33 kV en Villa Clara con parques fotovoltaicos", " Departamento de Electroenergética., Universidad Central " Marta Abreu" de las Villas., 2013.
- [4] "Anual Report, World Wind Energy Association," 2012.
- [5] S. d. E. d. l. Nación., "Descripción desarrollo y perspectivas de las energías renovables en la Argentina y en el mundo", " 2004.
- [6] J. C. Durán, "Generación fotovoltaica distribuida conectada a la red en áreas urbanas en Argentina: situación actual y perspectivas futuras. ," Convenio Asociativo Publico-Privado IRESUD Departamento de Energía Solar, CNEA-Escuela de Ciencia y Tecnología, UNSAM. Congreso de energías y medio ambiente, Buenos Aires, 2014.
- [7] "ABB Cuaderno técnico Plantas fotovoltaicas ", ed.
- [8] D. C. A. E. G. D. C. A. A. B. D. R. D. R. D. J. I. S. D. A. Velásquez, "Visión a largo plazo sobre la utilización de las energías renovables en México. Energía Solar"., Universidad Nacional Autónoma de México., México, 2005.
- [9] S. d. H. E. Solar., "Estudio instalación solar fotovoltaica de conexión a red", " 2010.
- [10] C. L. P. Benítez. (2010). *"Impacto de las celdas fotovoltaicas en los circuitos de distribución primaria"*. [Tesis].
- [11] H. Calleja, "Procesos en sistemas fotovoltaicos conectados a la red", " Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, México, 2011.
- [12] E. V. d. l. E. EVE, "Energía Solar," 2007.

- [13] M. R. Moreno, "Las instalaciones solares fotovoltaicas conectadas a la red eléctrica en la formación profesional," 2011.
- [14] B. LINDGREN, "Power-generation, Power-electronics and Power-systems issues of Power Converters for Photovoltaic Applications ", Department of Electric Power Engineering CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2002.
- [15] D. G. d. I. y. Energía., ""Guia técnica de aplicación para instalaciones de energías renovables.Instalaciones fotovoltaicas".", ed. Canarias., 2002.
- [16] H. R. P. (J. E. C. Cuán, and R. R. Heredia "Conectar el sol con la red," 2012.
- [17] *Energía solar en Cuba.*
- [18] N. L. Díaz. (2012) Sistema exitoso de conexión a red. [Magazine].
- [19] E. N. Herald. (2013, <http://www.elnuevoherald.com>). "Cuba pone en marcha su segunda central de energía solar fotovoltaica de 2013".
- [20] R. Shaffer, *Fundamentals of PowerElectronicswith MATLAB*.
- [21] "Inversores," Universidad de València, 2006.
- [22] "Q at Night Potencia reactiva fuera del funcionamiento de inyección con SUNNY CENTRAL de las series CP XT, CP-JP y CP-US."
- [23] D. C. A. E. G. D. C. A. A. B. D. R. D. R. D. J. I. S. D. A. M. Velásquez, ""Visión a largo plazo sobre la utilización de las energías renovables en México. Energía Solar", " Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2005.
- [24] P. S. KonstantinTuritsyn, Scott Backhaus and Michael Chertkov., "Options for Control of Reactive Power by Distributed Photovoltaic Generators," 6, vol. 99, 2011.
- [25] R. A. Sánchez, "Compensación de sobretensiones en redes eléctricas con generadores fotovoltaicos," Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, 2010.
- [26] J. BALDA, "Nuevos requerimientos para integración masivade inversores fotovoltaicos en la red eléctrica, ," DEPARTAMENTO TÉCNICO DE INGETEAM ENERGY.
- [27] J. C. P. Camilo José Carrillo González, "Title," unpublished].
- [28] E. S. RODRÍGUEZ, "COMPENSADOR ESTATICO SINCRONO(STATCOM): MODELADO Y SIMULACION," FACULTAD DE INGENIERIA FISICO-MECANICAS, UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, ESCUELA DE INGENIERIAS ELECTRICAS, ELECTRONICAS Y TELECOMUNICACIONES, BUCARAMANGA, 2006.
- [29] R. J. D. M. J. M. R. A, "CARACTERÍSTICAS FUNCIONALES DEL STATCOM."

- [30] K. O. M. Sai Eswar Rao, "Utilization of PV Solar Farm As Statcom During Night Hours In A Distribution Network," *International Journal of Scientific and Technology Research*, vol. 3, agosto 2014 2014.
- [31] M. V. G. González, "Integración de energías renovables en redes inteligentes ", Departamento de Ingeniería Civil, Área de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Alicante, 2013.
- [32] A. F. Sarabia, "Impact of distributed generation on distribution system," Department of Energy Technology
Aalborg University in Partial Fulfilment for the Degree of Master Graduate, Aalborg, Denmark, 2011.
- [33] F. A. VIAWAN, "Voltage Control and Voltage Stability of Power Distribution Systems in the Presence of Distributed Generation," Department of Energy and Environment, Division of Electric Power Engineering, CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, Göteborg, Sweden, 2008.
- [34] *Capítulo 2 CONVERTIDOR INVERSOR MULTINIVEL DE FUENTES INDEPENDIENTES.*
- [35] M. Shen, "(Distributed Solar Photovoltaic Grid Integration System: A Case Study for Performance,," Portland State University,, 2012.
- [36] J. C. H. y. A. Medina), "CONEXIÓN DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS A LA RED ELÉCTRICA: CALIDAD DE SUMINISTRO."
- [37] (Patricia Rodríguez Roqueta, " Procedimiento de cálculo para la ubicación de paneles fotovoltaicos," Uniersidad Central de Las Villas, Santa Clara, Cuba, 2014.
- [38] "La gestión de la red con un control inteligente," *POWER ELECTRONICS BUSINESS UNIT. GAMESA.*
- [39] G. B. J. M.M. Aman, A.H.A.Bakar, H.Mokhlis, M.Karimi, "Optimum shunt capacitor placement in distribution system, A review and comparative study," 13 October 2013 2013.
- [40] J. R. Agüero, "Integration Challenges of Photovoltaic Distributed Generation on Power Distribution Systems."