

**Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas**

**Facultad de Ingeniería Eléctrica**

**Departamento de Electroenergética**



## **TRABAJO DE DIPLOMA**

**Título:** Aplicación de la Electrónica de potencia en los sistemas eléctricos actuales.

**Autor:** Alais Mederos Fleites

**Tutor:** DraC. Lesyani León Viltre

Santa Clara

“Año 58 de la Revolución”

2016

**Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas**

**Facultad de Ingeniería Eléctrica**

**Departamento de Electroenergética**



## **TRABAJO DE DIPLOMA**

**Título:** Aplicación de la Electrónica de potencia en los sistemas eléctricos actuales.

**Autor:** Alais Mederos Fleites

Email: amederos@uclv.cu

**Tutor:** DraC. Lesyani León Viltre

Email: lesyani@uclv.edu.cu

Santa Clara

“Año 58 de la Revolución”

2016



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 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 Tutor

---

Firma del Jefe de Departamento  
donde se defiende el trabajo

---

Firma del Responsable de

Información Científico-Técnica

## **Dedicatoria**

A mis padres, mis hermanos y mi primo Heiler porque me han apoyado en este largo camino y han estado presentes en los momentos más difíciles.

## **Agradecimientos**

- A mi mamá, por su dedicación y exigencia ante las tareas de estudio.
- A mi papá, por apoyarme siempre, por muy mala que fuera la situación.
- A mi primo Heiler, por mostrarme que siempre hay una salida, aunque el destino te la juegue difícil.
- A mis hermanos, por siempre confiar en mí.
- A mi familia que siempre me ha ayudado, de una forma u otra.
- A mi tutora, por haberme ofrecido su conocimiento y asesoría.
- A todas las personas que han hecho posible que llegue hasta aquí.

Gracias.

**Tareas técnicas:**

- 1) Revisión de la literatura existente sobre la aplicación de la electrónica de potencia en los sistemas eléctricos.
- 2) Análisis de las propuestas de aplicaciones futuras de la electrónica de potencia en los sistemas eléctricos.
- 3) Evaluación mediante simulación en Matlab de las propuestas de aplicación sugeridas en la Bibliografía.

---

Firma del Autor

---

Firma del Tutor

## **Resumen**

La electrónica de potencia cuenta con diversas aplicaciones en los sistemas eléctricos actuales y su desarrollo potencial es muy importante para las redes eléctricas del futuro. En este trabajo se realiza una búsqueda bibliográfica de las principales aplicaciones actuales de la Electrónica de Potencia en las redes eléctricas. Se exponen las características fundamentales de los filtros activos de potencia, de los FATCS (Flexible AC Transmission Systems) y se exponen las principales aplicaciones de los convertidores electrónicos en las fuentes renovables de energía. Se describen además, las principales características que deben tener las denominadas redes inteligentes o Smart Grids y las perspectivas de aplicación de la Electrónica de Potencia en este tipo de redes del futuro. Se realizan simulaciones en el Matlab de un Filtro activo y DVR, para evaluar su comportamiento ante diferentes perturbaciones, obteniéndose resultados.

## Índice

Dedicatoria .....	i
Agradecimientos .....	ii
Tareastécnicas:.....	iii
Resumen.....	iv
Introducción.....	1
Capítulo1. Aplicación actual e importancia de la electrónica de potencia en los sistemas eléctricos.....	6
1.1 Filtros activos de potencia.....	6
1.1.1 Tipos de filtros activos .....	7
1.2 FACTS.....	9
1.2.1 Compensador estático de potencia reactiva (SVC) .....	9
1.2.2 Restaurador dinámico de tensión (DVR) .....	12
1.2.2.1 Elementos que componen un DVR .....	13
1.3 Aplicaciones de la Electrónica de Potencia en el uso de energía renovable ....	15
1.3.1 Inversores de corriente en sistemas fotovoltaicos.....	16
1.3.1.1 Ventajas de los Inversores con flujo de potencia bidireccional .....	16
1.3.1.2 Clasificación de los inversores bidireccionales con aislamiento eléctrico sin filtro intermedio en corriente continua .....	16
1.3.2 Sistemas Eólicos.....	17
1.3.2.1 Sistemas de control de un generador trifásico doblemente alimentado .....	18
1.3.2.2 Métodos de control de un DFIG .....	20
Capítulo2. Perspectivas de aplicaciones de la electrónica de potencia en los sistemas eléctricos.....	23
2.1 Redes eléctricas inteligentes .....	23
2.1.1 Electrónica de potencia en las Redes inteligentes .....	27

2.1.2 Transición hacia las redes de transmisión inteligentes .....	32
2.1.3 Riesgos a considerar al implementar las redes de transmisión inteligentes .....	33
2.1.4 Redes inteligentes en Cuba.....	35
2.1.4.1 Integración de las fuentes renovables de energía y diferentes tipos de generación .....	36
2.2 Implementación de un DVR y un Filtro activo en Simulink.....	38
2.2.1 Simulación del Filtro activo.....	38
2.2.2 Simulación del restaurador dinámico de tensión.....	39
2.2.2.1 Partes que conforman el DVR .....	40
2.2.2.1.1 Filtro de salida .....	40
2.2.2.1.2 Transformador de inyección.....	40
2.2.2.2 Obtención de la señal de referencia .....	41
Capítulo3. Análisis de los resultados de las simulaciones. ....	44
3.1 Resultados de las simulaciones.....	44
3.1.1 Resultados de simulación del control diseñado en un filtro activo .....	44
3.1.2 Resultados de simulación de un DVR .....	46
Conclusiones.....	50
Recomendaciones .....	51
Referencias .....	52

## **Introducción**

La electrónica de potencia empezó en 1900, con la introducción del rectificador de arco de mercurio. Luego aparecieron gradualmente otros dispositivos que se aplicaron al control de energía hasta la década de 1950.

La primera revolución electrónica se inicia en 1948 con la invención del transistor de silicio en los Bell Telephone. La mayor parte de las tecnologías electrónicas avanzadas actuales tienen su origen en esta invención. En 1956, esta misma compañía desarrolló el transistor de disparo PNP, que se definió como un tiristor o rectificador controlado de silicio, SCR en sus siglas en inglés [1].

La segunda revolución electrónica empezó en 1958 con el desarrollo del tiristor comercial por General Electric Company. Ese fue el principio de una nueva era en la electrónica de potencia. Desde entonces se han introducido diversos tipos de dispositivos semiconductores de potencia y técnicas de conversión. La electrónica de potencia ha dado la capacidad de dar forma y controlar grandes cantidades de energía con una eficiencia cada vez mayor [1].

En el mundo de hoy la electrónica de potencia cuenta con cuantiosas aplicaciones en diferentes áreas, encontramos aplicaciones en el control de velocidad de motores, conversión de energía eléctrica, amplificadores de RF, arranque de máquinas síncronas, aspiradoras, calentamiento por inducción, computadores, control de temperatura, electrodomésticos, elevadores, fotocopiadoras, fuentes de poder; en fin, son innumerables las aplicaciones que nos motivan a profundizar en el análisis de los dispositivos y circuitos empleados para este fin [2].

En las últimas décadas la electricidad se ha convertido en un bien de uso común, con un número de consumidores siempre creciente. Para asegurar el correcto funcionamiento de los dispositivos conectados a la red eléctrica, es necesario asegurar que la calidad de la electricidad suministrada sea la adecuada.

En términos generales, la tarea de la electrónica de potencia es procesar y controlar el flujo de energía eléctrica mediante el suministro de voltajes y corrientes en una forma óptima para las cargas de los usuarios. Los avances en la tecnología de la manufactura de semiconductores hicieron posible la mejora

significativa de las capacidades de manejo de voltajes y corrientes, así como de las velocidades de conmutación de dispositivos de semiconductores de potencia [3].

En la Industria cada vez son más los dispositivos y sistemas que en una o varias de sus etapas son accionados por energía eléctrica. Los accionamientos consisten, en general, en procesos que transforman la energía eléctrica en otro tipo de energía, o en el mismo tipo, pero con diferentes características. Los encargados de realizar dichos procesos son los **Sistemas de Potencia**.

Las **redes eléctricas inteligentes o Smart Grids** son una forma de gestión eficiente de la electricidad. El término empezó a utilizarse en el año 2003 aunque su primera aparición data del año 1998. La definición de una red eléctrica inteligente es la aplicación de procesamiento digital y comunicaciones a la red eléctrica, haciendo que los datos fluyan por la red y que la gestión de la información sea el punto primordial de cualquier red eléctrica inteligente [4].

El uso de redes eléctricas inteligentes implica la utilización de tecnología informática para la optimización de la producción y distribución de electricidad con el fin de equilibrar mejor la oferta y la demanda entre productores y consumidores. La consecución de este equilibrio puede generar unos ahorros considerables al sistema eléctrico evitando cuantiosas pérdidas que se producen actualmente por el transporte de energía. La utilización de tecnologías de la comunicación para convertir la red eléctrica en una red inteligente es uno de los 5 pilares sobre los que se basa la tercera revolución industrial que promueve una sociedad más sostenible y más democrática energéticamente [4].

Esta manera de concebir el uso de las redes eléctricas todavía no se ha puesto en práctica a nivel general, aunque en Estados Unidos ya existen varios programas de investigación y desarrollo relacionados con ellas [4].

Los principales mercados mundiales de redes eléctricas inteligentes están en China, Reino Unido y Estados Unidos. España está en una buena posición para el desarrollo de estas, debido a su alta implantación de energías renovables y de

generación distribuida y sería altamente beneficioso para aumentar la eficiencia del sistema.

El crecimiento de los sistemas eléctricos de potencia (SEP), está directamente relacionado al crecimiento económico de un país y este crecimiento se ve reflejado en el aumento de la carga, la cual en algunos puntos del sistema es desproporcionada, de manera que las empresas de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica se ven en la necesidad de cubrir este crecimiento de la demanda cumpliendo con el marco regulatorio, los criterios de confiabilidad y seguridad, mediante el uso de tecnologías en protección, monitoreo y control [5].

De este modo, para obtener una operación estable y segura del SEP, se hace necesario ejercer un control sobre el mismo utilizando algunos dispositivos de electrónica de potencia llamados Sistemas de Transmisión Flexible en Corriente Alterna (Flexible AC Transmission System, FACTS), los cuales pueden mejorar la estabilidad del sistema controlando los transitorios, la estabilidad de baja señal y los flujos de potencia en las líneas sobrecargadas, reflejándose a su vez en menores pérdidas así como en una operación más segura del SEP.

En la última década los FACTS han recibido una especial atención de las empresas encargadas de la operación del SEP, debido a que son dispositivos electrónicos que pueden controlar flujos de potencia y tensiones en las diferentes barras del sistema, proporcionando una operación más confiable y segura [5].

El uso de los FACTS en los SEP les permite tener otras opciones para afrontar los problemas causados por el aumento de la carga, diferentes a la de inversiones en infraestructura, la construcción de nuevas líneas de transmisión y el impacto ambiental que esto conlleva. Para ello, se debe alcanzar un equilibrio entre la confiabilidad que se requiere y la inversión económica necesaria para lograrla [5].

En Cuba se realizaron estudios por parte de especialistas de la Unión Eléctrica y de las Universidades del país para montar un dispositivo FACTS en la subestación de 220kV de Sancti Spíritus, aunque no se ha implementado aún.

Se espera ver un gran impacto de la Electrónica de Potencia en la integración de sistemas en base a energías renovables y el desarrollo de las Micro-Redes como

una tecnología interdisciplinaria y compleja. En Micro-Redes aisladas la estabilidad de frecuencia y tensión no están aseguradas por la robustez del sistema interconectado y aparecen desafíos importantes para los sistemas de control. La estrategia de control más utilizada en estos casos es conocida como “Control Droop”, que regula la frecuencia a través de la potencia activa, mientras que la tensión se controla con la potencia reactiva [6].

Teniendo en cuenta lo anterior, el **problema científico** de nuestra investigación es ¿Cuáles son las perspectivas de aplicación de la electrónica de potencia en los sistemas eléctricos actuales?

Para dar respuesta a esta interrogante científica **el objetivo general** es:

Analizar el desarrollo futuro de la aplicación de la electrónica de potencia en los sistemas eléctricos actuales.

**Objetivos específicos:**

Describir la aplicación actual e importancia de la electrónica de potencia en los sistemas eléctricos.

Analizar las perspectivas de aplicaciones futuras de la electrónica de potencia en los sistemas eléctricos.

Evaluar algunas de las propuestas mediante simulación.

**Tareas técnicas:**

Revisión de la literatura existente sobre la aplicación de la electrónica de potencia en los sistemas eléctricos.

Análisis de las propuestas de aplicaciones futuras de la electrónica de potencia en los sistemas eléctricos.

Evaluación mediante simulación en Matlab de las propuestas de aplicación sugeridas en la bibliografía.

**Estructura del trabajo:**

El capítulo 1 describe las principales aplicaciones encontradas en la bibliografía consultada sobre la electrónica de potencia aplicada en los sistemas eléctricos actuales.

En el capítulo 2 se hace una valoración de las aplicaciones futuras de la Electrónica de Potencia, fundamentalmente en las redes inteligentes. Además se describen las simulaciones realizadas en el Simulink del Matlab.

En el capítulo 3 se analizan los resultados obtenidos en las simulaciones.

Al final del trabajo se muestra un conjunto de conclusiones y recomendaciones útiles para los interesados en el tema.

## **Capítulo 1. Aplicación actual e importancia de la electrónica de potencia en los sistemas eléctricos.**

Desde los inicios del servicio eléctrico su calidad se ha identificado con la continuidad del suministro de energía, pero en los últimos años se han incorporado nuevos conceptos como calidad de onda y atención comercial. Mantener la calidad de onda depende de múltiples factores que van desde los propios sistemas eléctricos hasta la actuación de los consumidores en la red. El avance de la electrónica de potencia en los últimos años ha permitido el desarrollo de múltiples dispositivos como FACTS, filtros activos y convertidores electrónicos con técnicas avanzadas de control que permiten brindar un servicio eléctrico de elevada calidad. En este capítulo se expondrán las principales características y aplicaciones de estos dispositivos, así como la integración de la electrónica de potencia con algunas de las fuentes de energía renovables más conocidas y usadas en la actualidad.

### **1.1 Filtros activos de potencia**

La utilización, cada día mayor, de dispositivos electrónicos en sectores residenciales, comerciales e industriales ha traído consigo un aumento significativo de las perturbaciones que afectan la calidad de la forma onda (distorsión armónica) y por ende la degradación de esta. El origen del problema en este caso está en la demanda de corrientes altamente distorsionadas que al propagarse por la red provocan caídas de tensión con un alto grado de distorsión armónica, aumento de pérdidas en las líneas eléctricas, mal funcionamiento de equipos, etc. Las soluciones existentes tratan de evitar que estas corrientes se propaguen por la red o en su defecto limitar la emisión de perturbaciones de forma que no afecten a la inmunidad electromagnética de los equipos o instalaciones conectadas a la red eléctrica [7].

El concepto importante en esta memoria es el de la calidad de la onda, debido al incremento en la cantidad de equipos sensibles a perturbaciones en la red. Más del 50% de estas perturbaciones en la red eléctrica están relacionadas con la tensión, donde interesará estudiar la diferencia de la forma de onda con respecto a

la ideal. Los tipos de perturbaciones más conocidos son las caídas y los aumentos de tensión, la aparición de armónicos y, para sistemas trifásicos, los desequilibrios en la red [8].

Los filtros activos de potencia serie (FAPS) se utilizan para cancelar los armónicos que aparecen en la red y, también, para proteger la carga ante caídas o subidas de tensión. Este último caso se conoce con el nombre de “Dynamic Voltage Restorer” (DVR) [8].

### **1.1.1 Tipos de filtros activos**

Los filtros utilizados para la reducción de perturbaciones en la red eléctrica se pueden clasificar de varias formas. Dependiendo de cómo se conecta el filtro respecto a la carga, podemos distinguir entre filtros serie, paralelo y serie-paralelo o mixtos. Desde un punto de vista práctico, cada una de estas topologías, actúa de forma distinta. Los filtros paralelos actúan básicamente como una fuente de corriente, que tiene como misión contrarrestar los armónicos de corriente, generados por la carga, de forma que, la corriente en la red, suma de corrientes de la carga y el filtro sean senoidal. Por otro lado, los filtros serie se comportan como una fuente de tensión en serie con la propia red, y su principal función es que la tensión en bornes de la carga sea senoidal [9].

Finalmente, los filtros mixtos son la unión de un filtro serie y otro paralelo, con lo que su función es conseguir un consumo de corriente senoidal y una tensión en la carga también senoidal.

Para la reducción de la distorsión de la corriente en el punto donde se conecta el APF se acostumbra a utilizar un filtro de tipo paralelo; mientras que para la reducción de la distorsión de la tensión en la carga se utilizan filtros serie [9].

Los APF se pueden clasificar también en: monofásicos, trifásicos de tres hilos y trifásicos de cuatro hilos.

Otra posible clasificación es la de filtros pasivos, activos o mixtos. Los filtros pasivos, como su nombre indica, están contruidos mediante la asociación de inductancias y capacidades, calculadas para la eliminación de armónicos

concretos. Los filtros activos, en cambio, están constituidos por uno o varios inversores, normalmente de tensión (VSI). Finalmente, los filtros mixtos, están formados por la asociación de filtros pasivos y activos [9].

En una combinación de filtro serie – paralelo cada bloque, a su vez, puede estar formado por la asociación de distintos filtros. Además, se pueden conectar filtros activos o pasivos en cada caso, dando lugar a múltiples combinaciones [9].

La combinación de filtros activos y pasivos permite reducir el tamaño, y por lo tanto el costo de los filtros activos, manteniendo las ventajas que presentan estos últimos frente a los filtros pasivos.

En general las aplicaciones de las distintas estructuras son las siguientes:

Filtros serie:

- a) Reducción de armónicos de tensión en la carga.
- b) Regulación de la tensión.
- c) Reducción del Flicker y los microcortes de tensión.

Filtros Paralelo:

- a) Reducción de los armónicos de corriente.
- b) Compensación del factor de potencia.
- c) Reducción de la corriente por el neutro.

Dependiendo de la aplicación específica, de los autores del trabajo, y de la combinación de perturbaciones a reducir, los APF pueden recibir distintos nombres y utilizar distintas abreviaturas. Los nombres más comúnmente utilizados son [9]:

- a) “Harmonic Power Filter” HPF
- b) “Active Power Line Conditioners” APLC
- c) “Unified Power Quality Conditioner” UPQC
- d) “Universal Power Flow Controller” UPFC

- e) “Universal Power Conditioner” UPC
- f) “Instantaneous Reactive Power Compensators” IRPC
- g) “Active Power Quality Conditioners” APQC

Las denominaciones (b,g) se suelen utilizar para los sistemas basados en varios filtros: serie y paralelo; diseñados para actuar sobre todos los tipos de perturbaciones presentes en la red [9].

Las topologías de filtro más comúnmente aplicadas son los filtros del tipo paralelo y los mixtos, en solitario o combinados con filtros pasivos para reducir la potencia nominal y precio de los primeros [9].

El filtro activo está constituido por: el convertidor de potencia, el enlace de corriente entre el convertidor y el punto de conexión a la red, el elemento almacenador de energía, dispositivos de acondicionamiento de señal y el controlador [10].

## **1.2 FACTS**

Entre las soluciones para mejorar la calidad de la potencia en las redes de distribución basadas en semiconductores de potencias más conocidas, para redes de MT (Media Tensión), se encuentra el compensador estático de potencia reactiva (static var compensator, SVC), aunque también se encuentran otros dispositivos; tales como, el restaurador dinámico de tensión (dynamic voltaje restorer, DVR), el sistema de suministro ininterrumpible de potencia de MT (uninterruptible power supply, MVUPS) y el compensador síncrono estático (static synchronous compensator, STATCOM). Otro a considerar es el interruptor de transferencia de estado sólido (solid state transfer switch, SSTS), el cual permite al cliente industrial conectarse a otra alimentación, si tiene lugar una falla en la red de distribución de MT a la que está conectado [11].

### **1.2.1 Compensador estático de potencia reactiva (SVC)**

Los SVC se comportan como fuentes pasivas de potencia reactiva a la frecuencia fundamental: Se consigue una mejora de la calidad de la red regulando la tensión. Su uso está justificado, especialmente, para la compensación de flicker [11].

Existen, básicamente, tres tipos de compensadores de potencia reactiva (SVC):

- Reactancias controladas por tiristores (TCR).
- Capacidades conmutadas por tiristor (TSC).
- Compensadores basados en inversores PWM.

Las *reactancias controladas por tiristor* (TCR), funcionan como reactancias variables y pueden demandar o no VA inductivos. Dependiendo de cada caso concreto puede haber necesidad de VA inductivos o capacitivos; por lo que, se suele utilizar el TCR en paralelo con condensadores. El TCR se basa en una inductancia y dos tiristores montados en antiparalelo [11].

Actuando sobre el ángulo de disparo de los tiristores se puede modificar la componente fundamental de la corriente absorbida y, por lo tanto, varía la potencia reactiva absorbida. La ecuación (1.1) expresa la potencia reactiva por fase [11]:

$$Q_f = V_f \cdot I_{L1} \quad (1.1)$$

Si los tiristores se disparan en el instante en el que la tensión es máxima o mínima, según corresponda, habrá circulación de corriente por la inductancia durante todo el ciclo. Si se retrasa el ángulo de disparo la corriente circulará durante un tiempo inferior al período. El efecto del retraso en el disparo es que la componente fundamental de la corriente disminuye, esto es equivalente a un incremento en la inductancia de la reactancia, ya que se cumple por fase la ecuación (1.2) [11].

$$V_f = L_f \cdot \omega \cdot I_{L1} \quad (1.2)$$

El TCR se comporta como una susceptancia variable en lo que a la componente fundamental se refiere. Las consecuencias que ocasiona un retraso en el ángulo de disparo de los tiristores son: la disminución de pérdidas en los mismos y que la corriente tiene mayores componentes armónicas, resultando menos senoidal [11].

Si los disparos de los tiristores tienen el mismo retraso, la corriente tendrá todos los armónicos de orden impar.

Debido a la presencia del tercer armónico y de sus múltiplos, se suele montar el TCR en triángulo en lugar de en estrella, con la finalidad de que estos armónicos circulen por el triángulo y no aparezcan en la corriente de línea.

El control está basado en la identificación de la potencia reactiva fundamental y, a partir de ahí, con control analógico o digital, se determinan los ángulos de disparo de los tiristores [11].

Los inconvenientes que plantea este sistema son los siguientes [11]:

- Hacen la conmutación de los tiristores a frecuencia de red (apagado natural), mientras que tienen que reaccionar a las frecuencias bajas del parpadeo o flicker.
- Generan armónicos que dependen del nivel de potencia reactiva fundamental, y no puede ser cambiada con conmutación natural.

Para evitar este problema, se están desarrollando reactancias conmutadas por modulación de anchura de impulsos consiguiendo, de esta manera, que las corrientes inductivas se aproximen bien a las componentes fundamentales de corriente [11].

Las *capacidades conmutadas por tiristores* (TSC), se basan en la conexión o desconexión de bancos de condensadores a la red, a través de dos tiristores conectados en antiparalelo, que actúan como interruptores bidireccionales [11].

Para variar la potencia reactiva en pequeños escalones es preciso disponer de bancos de condensadores de pequeña capacidad, conectando o desconectando, por intermedio de los tiristores, de los bancos que sean precisos. El control utilizado normalmente es el integral.

Con la finalidad de evitar sobrecorrientes, se debe hacer entrar al tiristor correspondiente en conducción en el instante adecuado de máxima tensión de red. En la práctica y con el fin de limitar la corriente en el instante de encendido de los tiristores, se suelen conectar pequeñas inductancias en serie con los condensadores.

La utilización de *compensadores basados en inversores PWM*, en estos momentos, está limitada a aplicaciones de baja y media potencia. Sus ventajas

son la reducción de tamaño, peso y costo de los componentes reactivos, asimismo, se puede realizar un control de potencia reactiva más preciso y con un tiempo de respuesta más rápido; por otra parte, y debido a las altas velocidades de conmutación, no se introducen en la red componentes armónicas de baja frecuencia [11].

### **1.2.2 Restaurador dinámico de tensión (DVR)**

Dentro de los dispositivos de compensación se encuentra el DVR el cual es usado para proteger cargas sensibles de algunos fenómenos electromagnéticos, mediante la inyección directa de tensión en serie entre la fuente de alimentación y la carga.

El DVR puede ser modelado idealmente como una fuente controlada de tensión. Físicamente consta de cuatro unidades fundamentalmente, como son: unidad de almacenamiento de energía, convertidor DC/AC, filtro pasivo de corriente alterna y transformador de acoplamiento [12].

La función básica del DVR es la inyección de forma dinámica de una tensión controlada  $V_{dvr}$  en serie con la tensión de alimentación  $V_{pcc}$  en el punto de acople PCC por medio de un transformador de acoplamiento. El valor de la tensión instantánea es controlado para mitigar algunas perturbaciones que se puedan producir en la tensión de carga debido a perturbaciones en la tensión de alimentación. Esto significa que cualquier diferencia de tensión con respecto a la tensión de servicio ideal, causada por perturbaciones en el alimentador de AC, debe ser compensada por una tensión equivalente generada por el convertidor e inyectada a la red eléctrica a través del transformador [13].

Dentro de las opciones de compensación para las cuales se diseñó el DVR se encuentran los huecos y elevaciones de tensión, sin embargo, propuestas e investigaciones posteriores han permitido ampliar sus opciones a armónicos y desequilibrios de tensión, además debe ser capaz de generar y/o absorber potencia activa y/o reactiva hacia o desde el sistema de alimentación, según el tipo de perturbación que se quiera compensar.

El intercambio de potencias que se realiza entre el DVR y el sistema, dependerá tanto de la topología como de las estrategias de control implementadas [14].

### **1.2.2.1 Elementos que componen un DVR**

#### **-Unidad de almacenamiento de energía**

El objetivo principal de la unidad de almacenamiento de energía es proporcionar la energía necesaria para generar las tensiones de referencia a través de una barra de continua e inyectar la potencia necesaria cuando se requiera.

Los principales dispositivos de almacenamiento de energía utilizados en el DVR son baterías, condensadores y superconductores magnéticos de almacenamiento de energía (SMES por sus siglas en inglés *Superconductive Magnetic Energy Storage*) [15].

Entre los dispositivos anteriormente nombrados las baterías son comúnmente las más utilizadas, debido a su alta efectividad. Estas pueden ser conectadas directamente a la barra de continua o a través de un regulador de tensión. Sin embargo, las baterías generalmente tienen una vida útil corta y requieren un sistema de control que puede resultar muy costoso [16].

Una alternativa interesante a las baterías es el uso de supercondensadores, los cuales tienen rangos de tensión más amplios y pueden ser controlados directamente a la barra de continua. Los supercondensadores tienen una densidad específica de energía menor que una batería, pero una potencia específica mayor, lo cual los hace ideales para cortos pulsos de potencia [17].

Algunos supercondensadores pueden mantener su carga sobre períodos extendidos de tiempo, a fin de actuar como una batería. Sin embargo, a diferencia de las baterías, los supercondensadores tienen un tiempo corto de carga y una vida útil mayor. Por otra parte, los supercondensadores deben tener un controlador de carga-descarga y un circuito de conmutación serie-paralelo para usar la energía almacenada efectivamente con la aplicación de diversas estrategias de compensación para una operación óptima, con el fin de efectuar una compensación dinámica de tensión [16].

### **-Convertidor**

Los convertidores de DC en AC conocidos como inversores, tienen como función cambiar una tensión de entrada en corriente continua a una tensión de salida en corriente alterna, con magnitud y frecuencia deseadas. Asimismo, tanto la tensión de salida como la frecuencia pueden ser variables o fijas [18].

Para el convertidor es necesario tener en cuenta que su capacidad para seguir con exactitud la señal de referencia será dependiente de factores como el nivel de tensión en el almacenador de corriente continua, la frecuencia de conmutación, el filtro y la topología del convertidor.

### **-Filtro pasivo**

La principal tarea del filtro pasivo es mantener el contenido de armónicos de tensión generados por el convertidor DC/AC dentro de los límites permisibles. El sistema de filtrado puede ser ubicado en el lado de alta o baja tensión del transformador de acoplamiento y son referidos generalmente como filtros en el lado de línea y filtro en el lado del inversor respectivamente [19].

El esquema del filtro está compuesto por una bobina, un condensador y generalmente se suele agregar una resistencia que representa las pérdidas en el inversor y la resistencia asociada a la bobina. Este sistema es preferido en lo concerniente a la capacidad de atenuación de armónicos, además evita que las corrientes armónicas de alto orden circulen por el transformador de acoplamiento. Sin embargo, cuando el DVR está en funcionamiento, la bobina de filtro puede causar una caída de tensión y un desfase en la componente fundamental de salida del convertidor, lo cual puede comprometer el esquema de control del DVR. Este problema se resuelve generalmente diseñando un filtro con bobinas de baja inductancia [20].

### **-Transformador de acoplamiento**

El transformador de acoplamiento también conocido como transformador de inyección, no sólo tiene como función reducir la tensión requerida en la barra de continua, sino que también proporciona aislamiento entre el convertidor y la línea.

Esto evita que el almacenador de corriente continua entre en cortocircuito a través de los interruptores de diferentes ramas del convertidor.

El diseño de este transformador es muy importante porque puede verse enfrentado a saturación, sobredimensionamiento, recalentamiento, elevados costos y bajo rendimiento. La tensión a inyectar por el DVR puede consistir en componente fundamental, armónicos deseados, armónicos producidos por conmutación y componente de corriente continua. Si el transformador no está diseñado correctamente, la tensión inyectada puede saturar el transformador y ocasionar un funcionamiento incorrecto del DVR. En la literatura, este problema se resuelve con el sobredimensionamiento del transformador, sin embargo, esto aumenta el costo total y el tamaño del DVR [21].

Los siguientes aspectos deben tenerse en cuenta en el diseño del transformador de inyección para DVR: [21]

-El DVR está permanentemente conectado en la línea, por tanto, las pérdidas de potencia activa en el transformador deben ser mínimas.

-La corriente de carga puede ser lineal o no lineal. Esta corriente fluye a través del transformador produciendo caídas de tensión no lineales en la bobina de dispersión. Por tanto, esta debe ser baja.

-La frecuencia máxima de conmutación del inversor debe ser tenida en cuenta para que el transformador, de manera satisfactoria, reproduzca las tensiones pulsantes de alta frecuencia.

### **1.3 Aplicaciones de la Electrónica de Potencia en el uso de energía renovable**

La investigación en fuentes alternas de energía que utilizan recursos renovables amigables con el medio ambiente, está siendo impulsada cada vez más por los compromisos adquiridos por la mayoría de los países industrializados en función de los tratados mundiales de protección del medio ambiente, como el protocolo de Kyoto y ante el impostergable agotamiento de las fuentes tradicionales de combustible, hecho que cada día se percibe más cercano. Se está llegando al

momento en el que la solución de las necesidades energéticas de la humanidad está obligando a un progreso acelerado de exploración de nuevas fuentes de energía, lo que ha propiciado un avance tecnológico en los últimos años que ha promovido el desarrollo de nuevos equipos que permiten optimizar el aprovechamiento tanto de la energía irradiada por el sol sobre la superficie terrestre como de la energía obtenida del viento [22].

### **1.3.1 Inversores de corriente en sistemas fotovoltaicos**

La energía solar fotovoltaica es una forma limpia y distribuida de producción de energía eléctrica. La investigación y el desarrollo tecnológico que se realiza en esta área posibilita una penetración cada vez mayor de esta tecnología en la producción de energía eléctrica en el mundo como complemento de las fuentes de generación de energía convencionales.

#### **1.3.1.1 Ventajas de los Inversores con flujo de potencia bidireccional**

Las cargas de los inversores de potencia pueden ser resistivas, inductivas o capacitivas, de tal forma que la energía puede fluir en ambos sentidos. En sistemas alimentados con baterías es importante que la energía reactiva regrese a la fuente de corriente continua y, además, por cuestiones de costo y tamaño, es deseable que la característica de bidireccionalidad esté en el mismo inversor.

#### **1.3.1.2 Clasificación de los inversores bidireccionales con aislamiento eléctrico sin filtro intermedio en corriente continua**

##### *-Inversor de tipo directo*

Los inversores de tipo directo transfieren la energía por el transformador sin utilizarlo como elemento de almacenamiento de energía.

El inversor de tipo directo se basa en utilizar un convertidor de CC/CA utilizando una topología que puede ser: puente completo, medio puente o push-pull. El convertidor CC/CA genera una señal modulada en anchura de pulso o con anchura de pulso fijo; esta señal se eleva utilizando el transformador de alta frecuencia, posteriormente se utiliza un convertidor CC/CA con interruptores bidireccionales que puede actuar como rectificador positivo o negativo.

Finalmente, el filtro paso bajo elimina los armónicos de orden elevados y entrega una señal senoidal.

#### *-Inversor de tipo indirecto*

Los inversores de tipo indirectos almacenan energía de forma temporal en el transformador durante un intervalo del período de conmutación.

El inversor de tipo indirecto se basa en utilizar un convertidor *flyback* para generar una señal de tensión cuyo valor corresponde a un semiciclo de la señal de línea, de tal forma que con una segunda etapa de inversión del signo se puede generar la señal senoidal aplicable a la carga alterna.

### **1.3.2 Sistemas Eólicos**

La energía eólica es la energía obtenida del viento, es decir, la energía cinética generada por efecto de las corrientes de aire, y que es transformada por las turbinas eólicas que la convierten en electricidad por medio de aspas o hélices que hacen girar un eje central conectado a través de una serie de engranajes a un generador eléctrico. Es una energía limpia y también la menos costosa de producir [23].

Un ejemplo de la aplicación de la electrónica de potencia en los generadores eólicos es el generador de inducción doblemente alimentado (DFIG). Este tiene la estructura base de una máquina de inducción de rotor bobinado, cuyas bobinas se encuentran alimentadas por una fuente de tensión de magnitud y frecuencia variable, que permiten la regulación de las velocidades de giro de la máquina.

En aplicaciones eólicas el esquema típico de conexión de este tipo de generador es el que se muestra en la Figura 1.1 donde se observa una caja de engranajes, o caja multiplicadora (*Gear-Box*), conectada a los ejes de giro de la hélice y del generador, los devanados del estator conectados directamente a la red y los devanados del rotor, en este caso, a convertidores electrónicos de potencia AC/DC y DC/AC [24].

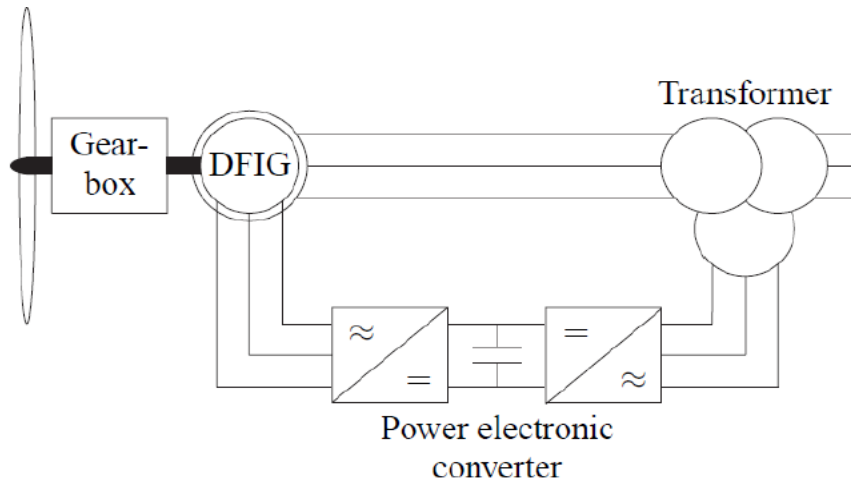


Figura 1.1: Esquema típico de un generador doblemente alimentado

El convertidor electrónico tiene dos convertidores acoplados a través de un condensador. El convertidor del lado del rotor es un inversor utilizado para controlar la potencia de salida del aerogenerador, regulando la tensión y frecuencia de alimentación del rotor [24].

El convertidor del lado de la red es un rectificador, usado para controlar la tensión de corriente continua del condensador de enlace entre ambos convertidores. Además, es posible usar este convertidor para generar o absorber potencia reactiva [24].

### **1.3.2.1 Sistemas de control de un generador trifásico doblemente alimentado**

A continuación, se mencionan los principales esquemas empleados en generadores trifásicos doblemente alimentados.

#### *- Control por medio de reóstatos*

Los primeros esquemas de control de velocidad mecánica en las máquinas de inducción, se componían de resistencias variables o reóstatos, conectados a los bobinados del rotor por medio de escobillas y anillos rasantes [24].

Se trata de un esquema sencillo, que permite aprovechar la energía del viento para un rango acotado de velocidades. Sin embargo, es un sistema ineficiente que sólo disipa energía para lograr el control de velocidad mecánica y el deslizamiento [24].

- Control mediante un dispositivo Scherbius estático

El dispositivo Scherbius estático se compone de dos convertidores encargados de regular la tensión y frecuencia de alimentación, permitiendo un flujo bidireccional de la potencia entre el rotor y la red. Con este sistema, se logra trabajar a un mayor rango de velocidades y se obtiene una mejor utilización de la energía disponible del viento [24].

Los convertidores son conectados entre la red y los anillos rasantes de los bobinados del rotor. El convertidor del lado del rotor (RSC – *rotor side converter*) permite variar la velocidad de la turbina, además de controlar la potencia activa y reactiva de manera de fijar el torque electromagnético y el factor de potencia en un valor determinado. El convertidor del lado de la red (GSC – *grid side converter*) generalmente se encarga de mantener constante la tensión de enlace DC entre los convertidores [24].

Inicialmente los convertidores se basaban en el uso de tiristores directos o ciclo conversores, e indirectos basados en la aplicación de rectificadores-inversores con enlace de corriente continua.

Con el desarrollo de los semiconductores y la electrónica de potencia, particularmente de los IGBT's (*Insulated Gate Bipolar Transistor*), se desarrollaron nuevos sistemas basados en conversores AC/DC/AC con dispositivos de conmutación forzada para niveles de media potencia. La topología más empleada es la de dos inversores conectados entre el estator y rotor en configuración *back-to-back* con enlace de tensión DC. Su principal ventaja es la flexibilidad de control y la baja contaminación armónica. Sin embargo, requiere de grandes condensadores electrolíticos en los enlaces DC, lo cual aumenta el tamaño de la topología y disminuye la confiabilidad del sistema [24].

Otras topologías desarrolladas para reducir el tamaño de los elementos voluminosos del esquema de control, se basan en convertidores AC/AC directos con dispositivos de conmutación forzada. En este sentido, se destacan los convertidores directos de frecuencia de dos etapas y conversores matriciales [24].

Los convertidores AC/DC y CD/AC entre el rotor y la red, permiten el flujo de potencia bidireccional. Los convertidores trabajan en un rango de potencia de hasta un 30% de la potencia nominal del generador [24].

Se incluye el dispositivo —Crowbarll entre los terminales del rotor de la máquina y el convertidor del rotor, que corresponde a un elemento de protección que evita que se produzcan sobre-corrientes en los bobinados del rotor y en el inversor, debido principalmente a fallas y caídas de tensión en la red, o sobretensiones del enlace DC ubicado entre los conversores. Este dispositivo cortocircuita los terminales del rotor, permitiendo elevar el punto de operación de velocidad de la máquina y disminuir el consumo de potencia reactiva [24].

### **1.3.2.2 Métodos de control de un DFIG**

Existe una gran variedad de métodos de control de un DFIG, desarrollados especialmente para aplicaciones eólicas. Muchos de estos métodos son empleados en generadores de inducción y han sido extendidos en generadores doblemente alimentados.

#### *- Control Escalar o V/F*

Uno de los primeros métodos de control empleados en máquinas de inducción son el control escalar o V/F, en el cual se trata de mantener constante el flujo magnético inducido en el entrehierro de la máquina aplicando un voltaje en el rotor en proporción directa a la variación de frecuencia, consiguiendo además que la tensión máxima se mantenga constante [24].

Es un control sencillo, pero que tiene la desventaja de no permitir un manejo independiente del torque y el flujo, con respuestas dinámicas lentas y dificultades en el control frente a elevadas variaciones de carga sobre la máquina. Por otra parte, existe una caída de tensión significativa frente a bajas frecuencias debido a las pérdidas del estator, por lo que es necesaria una compensación [24].

A pesar de sus desventajas, existen algunas aplicaciones desarrolladas con este método en generadores de inducción doblemente alimentados, en conjunto con técnicas de redes neuronales.

- *Control Vectorial o Control De Campo Orientado (FOC-Field Oriented Control)*

El control vectorial o también llamado control de campo orientado, permite manipular el flujo y el torque eléctrico de la máquina de manera independiente, referenciando el sistema trifásico alterno a un nuevo sistema de coordenadas orientado a uno de los flujos magnéticos internos del generador. Con ello se obtienen tensiones y corrientes que pueden ser tratadas como vectores rotatorios [24].

Los sistemas de control vectorial pueden estar orientados al flujo del estator (SFOC- *stator flux oriented control*), al flujo del rotor (RFOC- *rotor-flux oriented control*), al flujo del entrehierro (AFOC- *air gap field oriented control*) o al flujo de la red (GFOC – *grid flux oriented control*) [24].

Existen básicamente dos técnicas diferentes de control vectorial: directa e indirecta. El control vectorial directo se implementa a partir de la medición directa del módulo y la posición del vector espacial de flujo, mientras que el método indirecto estima estos parámetros a partir del desarrollo de un modelo del generador [24].

En el desarrollo de cada uno de los esquemas de control se emplea la transformación de Park o  $dq$  para representar las ecuaciones que describen el comportamiento del generador. Esto establece un sistema de referencia de dos ejes en cuadratura  $d$  y  $q$  tanto en el estator como en el rotor, lo que permite aplicar los esquemas de control con relativa simplicidad [24].

- *Control Directo Del Torque (DTC- Direct Torque Control)*

El control directo del torque es una alternativa a los métodos de control vectorial empleados en DFIG. En este método el ángulo y la magnitud de la tensión del rotor son controlados para obtener un control independiente del torque electromagnético y el flujo reactivo [24].

En un DTC convencional, se selecciona uno de seis posibles vectores espaciales de tensión en cada período de control para mantener el enlace de flujo del estator y el torque eléctrico dentro de una banda de histéresis del generador. Estos

estados son conmutados por un inversor ubicado en la alimentación del rotor, que puede entregar 8 estados o valores posibles de tensión. La selección del estado, se realiza a partir de una tabla de conmutación (*switching table*) que recibe los errores del flujo y el torque, y selecciona como salida la configuración más adecuada para el inversor [24].

La principal ventaja de este método es la rápida respuesta del torque eléctrico, su estructura simple y la baja dependencia de parámetros, en comparación con los métodos de control basados en la orientación de flujos.

El elevado rizado o *ripple* del torque y la frecuencia de conmutación variable, son los dos inconvenientes más relevantes de los DTC convencionales. En la literatura se pueden encontrar varias alternativas de este método de control, que intentan solucionar estos problemas con la utilización de controles predictivos, método con menos sensores (*sensorless*), Control Directo de Par con Modulación por Vectores Espaciales (DTC-SVM), entre otros [24].

### **Conclusiones parciales**

En este capítulo se realizó un estudio de la bibliografía existente sobre las principales aplicaciones de la electrónica de potencia en los sistemas eléctricos actuales. Se exponen los principales dispositivos desarrollados para el mantenimiento de la calidad de la energía, como son Filtros activos y FATCS, así como sus principales características y ventajas de su utilización. Debido a la creciente incorporación de las fuentes de energía renovables en los sistemas eléctricos y el amplio uso de la electrónica de potencia en esta área se abordaron los diferentes tipos de convertidores usados en la generación fotovoltaica y los métodos de control para generadores eólicos doblemente alimentados.

## **Capítulo 2. Perspectivas de aplicaciones de la electrónica de potencia en los sistemas eléctricos.**

Las redes eléctricas actuales fueron diseñadas y puestas en funcionamiento desde mediados del siglo pasado, cuando estaban ubicados los principales centros de producción alejados de las poblaciones. Los sistemas de control y automatización eran prácticamente inexistentes. En el futuro será imperativo un tipo de red capaz de gestionarse así misma prácticamente de forma automática e interactuar dinámicamente con las necesidades instantáneas del sistema. En este capítulo se muestran las simulaciones de un Filtro activo y un DVR, aplicaciones muy importantes en el desarrollo futuro de las redes dada sus prestaciones y fiabilidad.

### **2.1 Redes eléctricas inteligentes**

Actualmente para poder afrontar las demandas energéticas futuras será necesario el diseño de nuevas redes eléctricas o la modernización de las ya existentes para hacerlas más efectivas. Estas redes se denominan Redes inteligentes y su incorporación a los sistemas eléctricos actuales está a la vuelta de la esquina puesto que algunos países ya la han implementado obteniendo resultados satisfactorios. Dichas redes permiten una integración más efectiva de las fuentes de energía renovables y una mayor participación de los usuarios, contribuyendo a la solidificación de un sistema de generación distribuida más fuerte.

Resulta obvio que una red con estas características debe estar sustentada en un fuerte esquema regulatorio muy diferente al que se utiliza en la actualidad, que tenga en cuenta la posibilidad de venta de energía a la red por parte de los usuarios, que permita establecer precios spot o bandas horarias con precios diferenciados, y que posibilite el control de algunos usos finales por parte de las distribuidoras durante pequeños períodos que no afecten a los usuarios [25].

Se puede decir, entonces, que una red inteligente es la conjunción de la red eléctrica tradicional con tecnologías modernas de información y comunicación, que permite integrar datos provenientes de los distintos puntos de la cadena de suministro eléctrico, desde el generador hasta el usuario final; y transformarlos en

información y acciones que lleven a una mejora en su gestión. Su objetivo es elevar la eficiencia, confiabilidad, sustentabilidad, calidad del servicio y el producto, para hacer frente a los nuevos desafíos de múltiples generadores y estilos de consumo [25].

Desde el operador del sistema eléctrico se trabaja para poder aplanar la curva de demanda lo que permite una mayor racionalización, planificación y abaratamiento de la energía. Las disposiciones asociadas a la gestión de la demanda se clasifican en cuatro grandes grupos: reducción del consumo, desplazamiento del consumo de las horas punta a las horas valle, llenado de horas valles y reducción del consumo en las horas punta [25].

Hoy en día ya se están llevando a cabo acciones concretas para poder mejorar estos aspectos y como acciones también son aplicables a los conceptos de las redes inteligentes. De lo que se trata es de poder realizarlas de forma generalizada a todos los usuarios domésticos que en un futuro estarán conectados.

En la siguiente figura se aprecia la generación distribuida en una Red eléctrica inteligente.

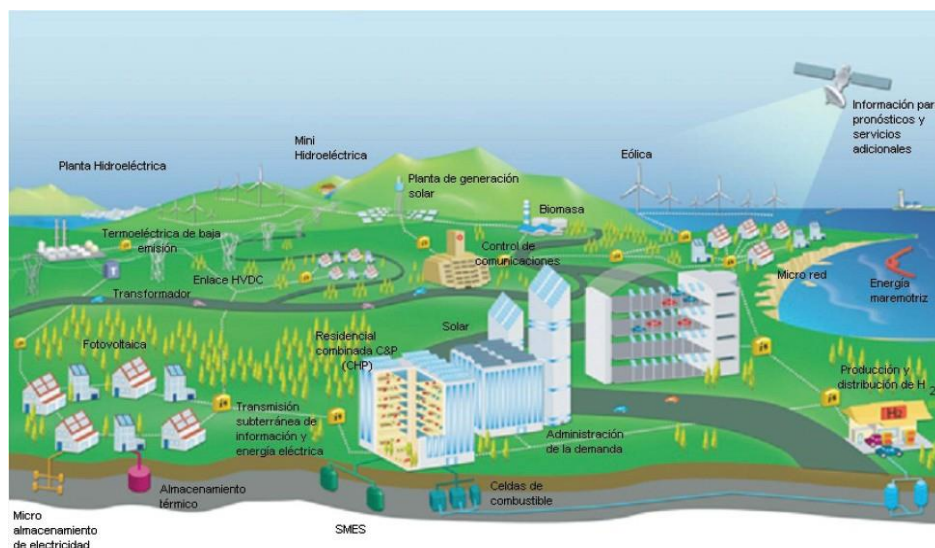


Figura 2.1 Red inteligente del futuro.

Tabla 1 Comparación de las características Smart Grids y las redes eléctricas actuales.

Característica	Red Eléctrica Actual	Smart Grid
<b>Automatización.</b>	Existencia muy limitada de elementos de monitorización, reservándose a la red de transporte.	Integración masiva de sensores, actuadores, tecnologías de medición y esquemas de automatización en todos los niveles de la red.
<b>Inteligencia y control.</b>	La red actual de distribución carece de inteligencia, implementando un control manual	Se enfatiza la creación de un sistema de información e inteligencia distribuidos en el sistema.
<b>Autoajuste.</b>	Se basa en la protección de dispositivos ante fallos del sistema.	Automáticamente detecta y responde a transmisiones actuales y problemas en la distribución. Su enfoque se basa en la prevención. Minimiza el impacto en el consumidor.
<b>Participación del consumidor y generación distribuida.</b>	Los consumidores están desinformados y no participan en la red. No se genera energía localmente, lo que implica un flujo energético unidireccional.	Incorporación masiva de generación distribuida, la que permite coordinarse a través de la red inteligente. En esta generación participa el usuario con la entrega del exceso energético generado localmente.
<b>Resistencia ante ataques.</b>	Infraestructuras totalmente vulnerables.	Resistente ante ataques y desastres naturales con una rápida capacidad de restauración.
<b>Gestión de la demanda</b>	No existe ningún tipo de gestión en la utilización de dispositivos eléctricos, en función de la franja horaria del día, o del estado de la red eléctrica.	Incorporación por parte de los usuarios de electrodomésticos y equipos eléctricos inteligentes, que permiten ajustarse a esquemas de eficiencia energética, señales de precio y seguimiento de programas de operación predefinidos.

<b>Calidad eléctrica.</b>	Solo se resuelven los cortes de suministro, ignorando los problemas de calidad eléctrica. De esta forma persisten problemas de huecos de tensión, perturbaciones, ruido eléctrico, etc.	Calidad eléctrica que satisface a industria y clientes. Identificación y resolución de problemas de calidad eléctrica. Varios tipos de tarifas para varios tipos de calidades eléctricas.
<b>Vehículos eléctricos</b>	Recientemente se están empezando a incorporar puntos de recarga eléctrica en la red, que sólo permiten la recarga de las baterías de los vehículos.	La incorporación de los vehículos eléctricos a la red, está demandando nuevas infraestructuras especializadas destinadas a la recarga y a permitir que cada vehículo pueda convertirse en pequeñas fuentes de generación.
<b>Capacidad para todas las opciones de generación y almacenamiento.</b>	Pocas grandes plantas generadoras. Existen muchos obstáculos para interconectar recursos energéticos distribuidos.	Gran número de diversos dispositivos generadores y almacenadores de energía, para completar a las grandes plantas generadoras. Conexiones "PlugAndPlay". Más enfocado en energías renovables.
<b>Optimización del transporte eléctrico</b>	En la actualidad se pierde una gran cantidad de energía debido a la poca eficiencia en el transporte eléctrico.	Sistemas de control inteligentes que permitan extender los servicios intercambiados entre los distintos agentes del mercado eléctrico y, asimismo, aprovechar eficientemente la capacidad de transmisión de la red.
<b>Preparación de mercados.</b>	Los mercados de venta al por mayor siguen trabajando para encontrar los mejores modelos de operación. No existe una buena integración entre éstos. La congestión en la transmisión separa compradores de vendedores.	Buena integración de los mercados al por mayor. Prósperos mercados al por menor. Congestionamientos de transmisión y limitaciones mínimas.
<b>Optimización de bienes y funcionamiento eficiente.</b>	Integración mínima de los datos de operación y la gestión de bienes. Mantenimiento basado en tiempo.	Sensado y medida de las condiciones de la red. Tecnologías integradas para la gestión de los bienes. Mantenimiento basado en las condiciones de la red.

### **2.1.1 Electrónica de potencia en las Redes inteligentes**

Las soluciones FACTS (Flexible AC Transmission Systems) representan una alternativa y han sido consideradas como una de las 11 tecnologías de la década por el IEEE en 2010, donde se reconoce el papel clave de la electrónica de potencia en las redes eléctricas del futuro. Considerando a la electrónica de potencia una tecnología fundamental, como facilitadora de la calidad y eficiencia de las Redes Inteligentes. En efecto, se está avanzado mucho hacia esa situación, por ejemplo, añadiendo variadores de velocidad a los motores eléctricos, que representan un 28% del consumo de electricidad en el mundo. También mediante el aprovechamiento de otras soluciones como FACTS, HVDC (High Voltage Direct Current), en redes de transmisión o distribución, o la instalación de convertidores de potencia en plantas de generación eólica, solar, para vehículos eléctricos y para alimentar el transporte ferroviario. Por tanto, estas tecnologías están presentes desde la generación hasta el consumo, tanto en las redes de transporte como de distribución [26].

Conforme la penetración energía renovable va creciendo en las redes, las centrales renovables deben avanzar desde una posición en la que necesitan respaldo de generación convencional, a participar activamente en los mercados y acabar siendo la capacidad base de una generación eléctrica sostenible. De hecho, ya representan la mayor parte de la nueva base instalada, por ejemplo, en 2013, globalmente más del 56 % de la nueva capacidad instalada fue de energía renovable. Este hecho resalta la necesidad de una integración avanzada de este tipo de centrales en el sistema y en el mercado. Si el papel de la predicción es muy importante para la integración renovable, también lo es la estabilización y, por último, el almacenamiento. Así lo reflejan los códigos de red que se deben cumplir, con características de calidad de red, de respuesta ante caídas de tensión, de regulación de potencia reactiva para soporte a la red, participando en regulación y mercados de ajuste. La innovación en la electrónica de potencia y el control de los convertidores eólicos, y en los inversores solares está permitiendo cumplir cada vez más requisitos y aportar servicios complementarios a los operadores del sistema [26].

El uso de un STATCOM con almacenamiento energético permite el control dinámico tanto de potencia reactiva como de potencia activa, de manera independiente. Mediante el control de la potencia reactiva, se consigue la estabilidad de tensión con una alta capacidad dinámica. Por otro lado, controlando la potencia activa se abren las siguientes posibilidades [26]:

- Permitir entregar la energía activa en función del precio de electricidad.
- Realizar el balance de las variaciones en la generación solar o eólica.
- Ampliar las posibilidades de participar en regulación secundaria y otros mercados de ajuste a la generación eólica y solar.
- Almacenar energía puede evitar inversiones en líneas reduciendo el pico de demanda.

La tecnología FACTS ha traído los siguientes beneficios [27]:

- Incremento de la capacidad en los sistemas actuales de transmisión.
- Incremento de la confiabilidad y disponibilidad de las líneas de transmisión.
- Incremento en la estabilidad dinámica y transitoria de la red.
- Mejoras en la calidad de la energía eléctrica entregada a los usuarios.
- Su implementación causa un bajo impacto ambiental.

En la siguiente figura se muestra una red eléctrica con fuentes de generación de energía tradicionales y renovables. Además, cuenta con algunas topologías de convertidores FACTS.

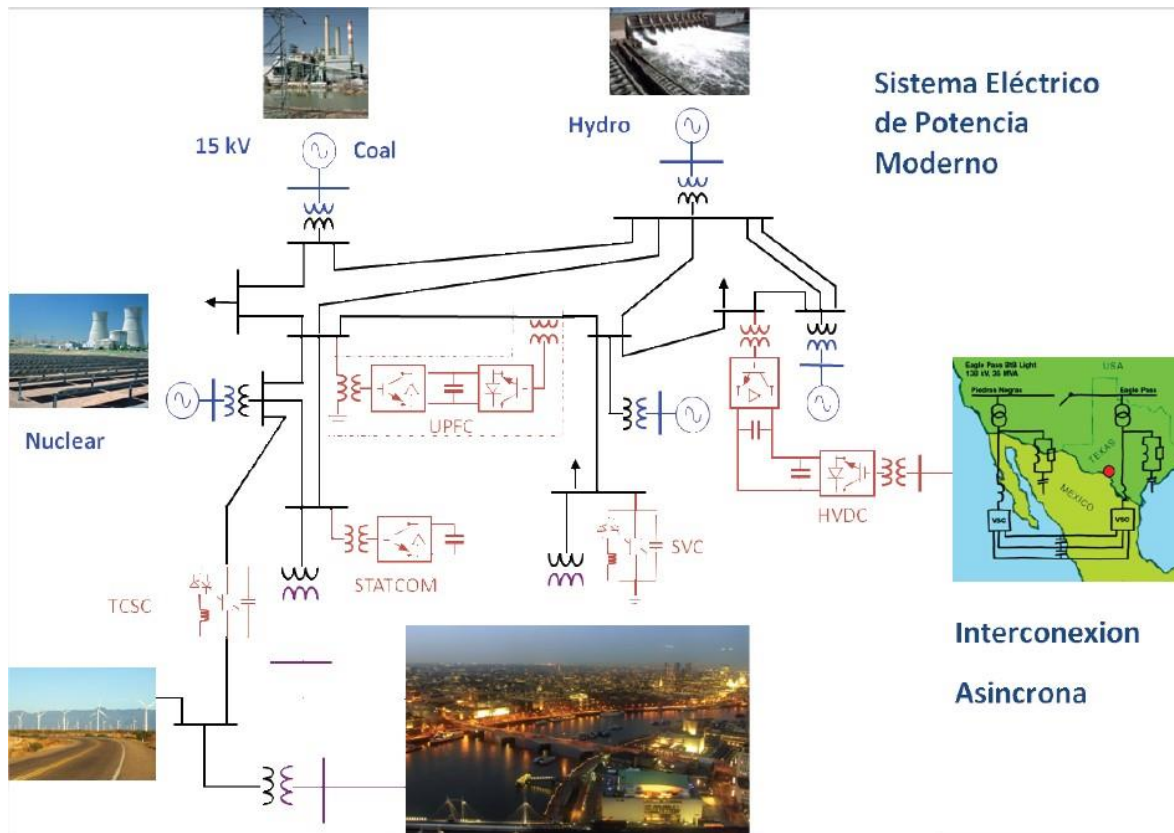


Figura 2.2 Red eléctrica con dispositivos FACTS.

Las redes de energía eléctrica del futuro deberán ser [27]:

- Flexibles: Deberán satisfacer las necesidades de los consumidores con los retos que esto representará en el futuro.
- Accesibles: Garantizarán el acceso a la conexión de todos los usuarios de la red, particularmente a través de fuentes renovables y generación local altamente eficiente con emisiones contaminantes nulas o muy bajas.
- Económicas: Proveerán una cadena de valor por medio de la innovación, la administración eficiente de la energía, la competitividad y la regulación.

Elementos principales de un sistema de transmisión inteligente [27]:

- Sistema integral de protección
- Sistema de ahorro de energía
- Automatización y protección de la subestación

- Tecnología de HVDC y FACTS.

Cuando se implementa un sistema de transmisión inteligente se ofrece solución a varios problemas ocasionados en los sistemas eléctricos de potencia, entre las principales soluciones se encuentran [27]:

- Detectar y atender problemas en el sistema desde su inicio antes de que afecten el servicio.

- Responder a estímulos locales y globales y obtener más información sobre los problemas del sistema.

- Incorporar mediciones, comunicaciones rápidas, diagnósticos centralizados avanzados y controles que restablezcan el estado estable del sistema después de interrupciones o disturbios.

- Adaptar automáticamente los sistemas de protección a las nuevas topologías de la red.

- Re-direccionar flujos de potencia, cambiar patrones de carga, mejorar perfiles de voltaje y realizar acciones correctivas a segundos de haber detectado el problema.

- Permitir a las cargas y a la generación distribuida participar en operaciones de control.

- La red de transmisión debe ser inherentemente diseñada y operada con seguridad y confiabilidad como factor clave.

- Proveer al operador sistemas avanzados de visualización para mejorar su capacidad de supervisar el sistema.

La gestión de generación distribuida mediante una Red inteligente es importante porque [27]:

- Reduce la emisión de gases de efecto invernadero.

- Mejora la eficiencia del sistema.

- Ayuda a diferir la necesidad de crecimiento del sistema.

- Reduce el pico de carga.

- Alivia la congestión.
- Mejora la confiabilidad.
- Mejora la seguridad del sistema.

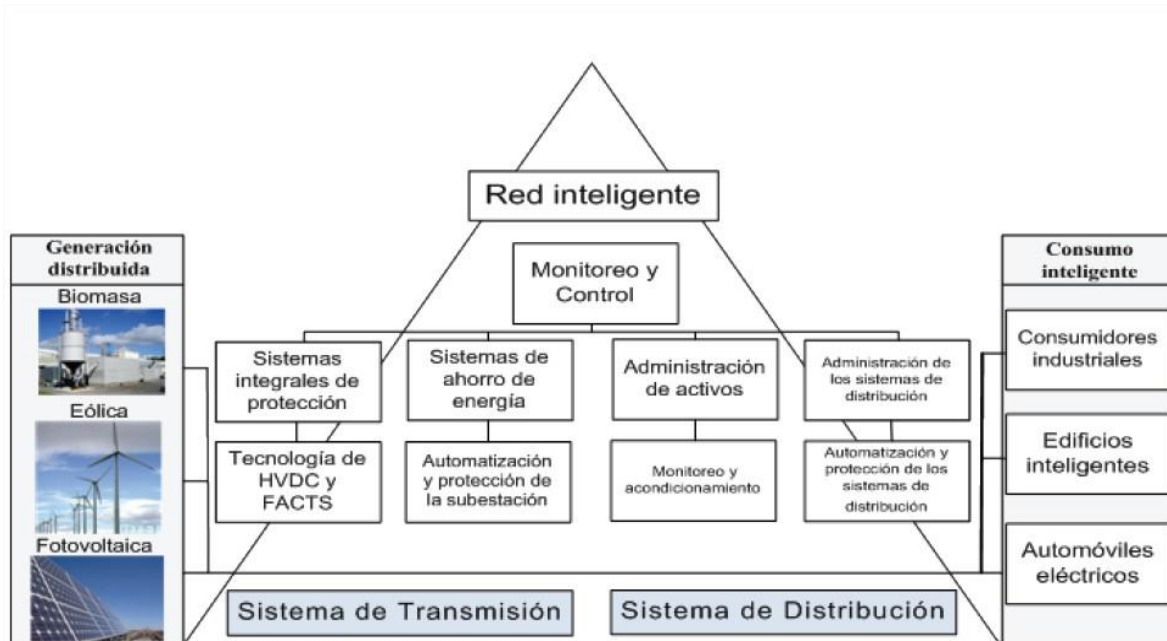


Figura 2.3 Esquema de operación de una Red inteligente.

Principales beneficios económicos al implementar las Redes inteligentes [27]:

- Creación de nuevas fuentes de trabajo, crecimiento económico de la región.
- Optimización de los capitales de inversión debido a menores límites de diseño y a un uso más eficiente de la red.
- Ahorro en impuestos debido a una depreciación mayor.
- Incrementa el nivel de utilización de la red.

Beneficios ambientales del empleo de estos esquemas de gestión de energía eléctrica [27]:

- Reducción en la emisión de gases de efecto invernadero (al implementar mayor número de proyectos basados en fuentes renovables de energía).
- Mejora en la calidad del aire en las zonas urbanas.

La implementación de estas redes ha permitido a los sistemas de transmisión obtener beneficios como la reducción de costos por congestión, disminución en la probabilidad de apagones, al igual que la salida o interrupciones forzadas de líneas u otros elementos de transmisión, la reducción en tiempos de restauración por mantenimiento preventivo, los picos de demanda reducidos en las líneas de transmisión y otros beneficios debidos al autodiagnóstico. En cuanto a la generación distribuida se ha reflejado un incremento de la penetración e integración y una mayor utilización de la misma. También se ha incrementado la seguridad y tolerancia del sistema de transmisión a ataques o desastres naturales y se han presentado mejoras en la calidad de la energía y confiabilidad, así como una mayor disponibilidad y capacidad de energía, debido a la optimización de flujos de potencia [27].

### **2.1.2 Transición hacia las redes de transmisión inteligentes**

La evolución hacia una red inteligente cambiará varios aspectos del modelo comercial actual y la relación de la industria con todos los productores, implicando y afectando a las empresas de generación, los reguladores, los proveedores de servicios de la energía, vendedores de tecnología de automatización y a los consumidores del servicio, de esta manera, las redes inteligentes optimizarán las interconexiones entre los productores y consumidores.

Al observar lo que ha ocurrido en distintos países con algunos sistemas en que se han llevado a cabo reformas estructurales, se concluye que dichas transformaciones se pueden visualizar como un proceso de evolución natural, con el fin de obtener el máximo provecho de los recursos necesarios para la producción y suministro de la energía eléctrica, ya sea mediante la planeación y evolución de los sistemas integrados verticalmente, o a través de la apertura a la competencia para lograr una adecuada integración tecnológica y económica; y es así como surge el concepto denominado “red de transmisión inteligente”; como una visión de la infraestructura eléctrica que integra la generación y distribución flexiblemente controlable. Los retos impuestos por esta nueva visión deben alcanzarse de una manera económica, especialmente en países en desarrollo, ya

que muchos de ellos no pueden tener acceso a tecnologías ambientalmente compatibles. Con la ayuda de nuevas ideas, soluciones inteligentes, así como innovaciones tecnológicas, los retos pueden ser superados [27].

El propósito fundamental de esta reestructuración en el diseño y operación de los sistemas eléctricos, es la de alcanzar los beneficios con una mayor eficiencia y competitividad de mercado eléctrico entre países o regiones a nivel global.

El mercado de las redes inteligentes tendrá un crecimiento dinámico impulsado por el cambio climático y por los programas de estímulo económico, ya que, al integrar grandes cantidades de sistemas renovables de energía, el sistema eléctrico actual deberá adaptarse a este crecimiento, y es de gran importancia mencionar que la infraestructura actual no está diseñada para esta tarea [27].

### **2.1.3 Riesgos a considerar al implementar las redes de transmisión inteligentes**

-Riesgos físicos [27]

Con la implementación de redes inteligentes y el posible incremento en la carga de líneas de transmisión, los operadores de los sistemas eléctricos de potencia se verán forzados a operar los sistemas muy cerca a sus límites de estabilidad. Este nuevo punto de operación representa por sí solo un incremento en la vulnerabilidad del sistema, por lo que es necesario realizar estudios más detallados del comportamiento global del sistema a fin de mantener los márgenes de seguridad.

En sistemas altamente interconectados la estabilidad de la señal pequeña, especialmente oscilaciones inter-área, incrementan su importancia, la cual aumenta más si el sistema aumenta en tamaño o la carga de las redes de transmisión crece.

Las oscilaciones inter-área son un problema común en grandes redes de sistemas de potencia a lo largo y ancho del planeta. Las oscilaciones inter-área de baja frecuencia cuando se presentan en sistemas eléctricos, limitan la cantidad de

transferencia de energía sobre las líneas de transmisión entre las regiones que contienen a los grupos de generadores.

Si el tamaño del sistema y la carga de la red se incrementan, las oscilaciones inter-área también tenderán a incrementarse.

-Riesgos cibernéticos [27]

La transmisión de electricidad sobre redes inteligentes es altamente dependiente de los sistemas de control basados en computadora.

Cuando se tiene un sistema de comunicaciones basado en tecnología IP (*internet protocol*) se incrementa la vulnerabilidad del mismo, debido a los riesgos cibernéticos.

Cualquier falla en la red eléctrica, ya sea intencional o no, podría ser potencialmente devastador.

De no existir eficientes métodos de encriptación para la seguridad del sistema, cualquier persona con pocos conocimientos de ingeniería inversa podría dejar sin alimentación a cualquier usuario que se encuentre conectado a la red de transmisión inteligente.

En el año 2009 el diario *The Wall Street Journal*, reportó que espías cibernéticos provenientes de China, Rusia y algunos otros países habían penetrado las redes eléctricas de Estados Unidos de América y habían implantado *software* malicioso que podría usarse para afectar el funcionamiento del sistema. Desafortunadamente, las redes inteligentes podrían representar un sistema de fácil acceso para *hackers* que se encuentren navegando en el ciberespacio.

Si alguien lograra penetrar al sistema podría sabotearlo fácilmente, provocando apagones de dimensiones similares al ocurrido en Nueva York en el año 2003, que dejó a 50 millones de personas sin servicio eléctrico y de comunicaciones. Una vez ingresando y manipulando la red inteligente se tendría la posibilidad de controlar millones de dispositivos de protección o medidores de manera simultánea. También se podría afectar el balance de carga de un sistema local provocado por algún repentino incremento o decremento del factor de demanda.

### **2.1.4 Redes inteligentes en Cuba**

En el caso de Cuba, aunque todavía no existen proyectos específicos para el desarrollo de una red eléctrica inteligente, se han llevado a cabo inversiones encaminadas a actualizar tecnológicamente la infraestructura existente, incrementando la eficiencia de las redes. Esto puede ser la base para el desarrollo futuro de la tecnología de redes inteligentes. Estas inversiones han tenido diferentes factores impulsores, entre los que se encuentran fundamentalmente los económicos, medioambientales y sociales [25].

Entre los factores económicos, cabe mencionar la disminución de pérdidas y la disminución de la vulnerabilidad frente a eventos climatológicos, como los ciclones. Dentro de los aspectos medioambientales, se contemplan la reducción de las emisiones de carbono, el incremento e integración de las fuentes renovables a la red existente y la mejora de la eficiencia energética. Los factores sociales contemplan la política gubernamental para mejorar las condiciones de vida y la entrega a la población de módulos de cocción eléctricos y equipamiento más eficiente, o sea, dar cobertura al incremento de la demanda de energía [25].

La situación actual puede resumirse en las acciones siguientes [25]:

- Rehabilitación de las redes existentes: Aunque desde hace algún tiempo en Cuba no se producen cortes eléctricos por problemas de generación, lo cierto es que la existencia de cables en mal estado o con calibres inadecuados, transformadores sobrecargados, así como postes y crucetas deteriorados, estaban ocasionando frecuentes averías en los sistemas eléctricos, con las consecuentes afectaciones y molestias.
- Incremento de las fuentes renovables de energía: El Estado cubano, a partir de la Revolución Energética, comenzada en 1996, acomete la producción más limpia y descentralizada de electricidad, baja en carbono. En tal sentido, ha venido incrementándose el desarrollo y producción de recursos energéticos renovables, incluidos la biomasa, el biogás, las pequeñas hidroeléctricas en zonas montañosas y el uso de las energías solar y eólica.

- Remodelación y automatización de subestaciones: Se desarrolla un amplio programa inversionista, que incluye la construcción de modernas subestaciones eléctricas para elevar el servicio a clientes estatales y residenciales. Esto forma parte de la estrategia de la Unión Nacional Eléctrica (UNE) para lograr una alta disponibilidad y reducir las pérdidas técnicas. Las subestaciones modernizadas permiten identificar las interrupciones en breve tiempo, disminuyen la vulnerabilidad ante contingencias climatológicas extremas, soportan fuertes vientos y emiten poco ruido; además, están diseñadas acorde con las normas establecidas para el cuidado del medio ambiente.
- Generación distribuida: Desde 2005 se ha llevado a cabo un fuerte proceso inversionista encaminado a poner en marcha centrales eléctricas de generación distribuida. En el 2011 se generaron con esta tecnología 3 594,8 GWh, lo que representó 20,2% de la generación total.

#### **2.1.4.1 Integración de las fuentes renovables de energía y diferentes tipos de generación**

La tecnología de redes inteligentes permitirá adaptarse mejor a las dinámicas propias de las energías renovables y de la generación distribuida, facilitando a las redes y a los consumidores un acceso más directo a los beneficios vinculados con dichos recursos.

Las habilidades de una red inteligente permitirán el control de manera fácil y directa del flujo bidireccional de energía eléctrica, además de facilitar las acciones de monitoreo, control y respaldo de los recursos a nivel de distribución.

En la moderna red eléctrica deben tener cabida no solamente la generación centralizada de las grandes plantas, cualquiera que sea la fuente utilizada, sino también el creciente abanico de recursos energéticos distribuidos.

Para poder gestionar eficientemente este abanico de nuevas oportunidades (micro-generación renovable, generación distribuida, almacenamiento de energía y generación centralizada con fuentes renovables), es necesario entregar a la red una nueva funcionalidad. Mejoras en la medición del consumo, instalación de sensores y mecanismos de control inteligente en todos los puntos clave de la red,

utilización de nuevos softwares de gestión y previsión de la demanda, y definición de nuevos estándares que favorezcan la medición y las interconexiones entre las diferentes partes de un mismo sistema, son expedientes requeridos a la hora de modernizar la red hacia un mayor nivel de inteligencia [25].

El objetivo principal es la flexibilización del sistema para que pueda albergar tanto la generación renovable centralizada, como todas las opciones de generación y almacenamiento vinculadas con el sistema de distribución.

Los beneficios de esta operación involucran numerosos aspectos. Desde el punto de vista de la fiabilidad del sistema, la combinación de diferentes tipos de generación con las oportunidades ofrecidas por el almacenamiento reducirá la dependencia del segmento de transmisión, incrementando a su vez la flexibilidad operacional. Desde el punto de vista de la seguridad del sistema, aportará un cambio radical, tanto en el ámbito de abastecimiento como ante la ocurrencia de desastres, dado que la descentralización de la generación reducirá el número de objetivos sensibles, como las grandes centrales eléctricas. También económicamente las ventajas son relevantes, y transitan desde la reducción de las pérdidas técnicas, derivadas del acercamiento entre los sitios de generación y de carga, hasta la reducción y reorientación de las inversiones, originariamente destinadas a la construcción de grandes centrales, subestaciones y nuevas líneas de transmisión y distribución [25].

Finalmente, desde el punto de vista medioambiental, la modernización del sistema aportará mucho a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, mediante el fomento aún mayor de la generación distribuida (sobre todo por lo que concierne a la micro-generación a través de tecnologías limpias), así como por el surgimiento de sólidos emplazamientos de fuentes renovables, en particular la hidráulica y la solar, al evitar los problemas vinculados con la intermitencia del suministro y la reducción de la necesidad de invertir en generación centralizada de fuente fósil [25].

Por todo lo anterior, es importante que el esfuerzo que se realiza en Cuba para aumentar la participación de fuentes renovables en la matriz energética nacional,

se realice de cara al futuro, con la visión de una red eléctrica más inteligente. Para ello es imprescindible que las actividades necesarias para desarrollar acciones en el ámbito nacional, se realicen en estrecha coordinación con otros avances mundiales, a fin de limitar duplicaciones, tener en cuenta las peculiaridades nacionales, disminuir las brechas y optimizar los gastos [25].

## 2.2 Implementación de un DVR y un Filtro activo en Simulink

### 2.2.1 Simulación del Filtro activo

También se simuló un filtro activo como el representado en la figura 2.4

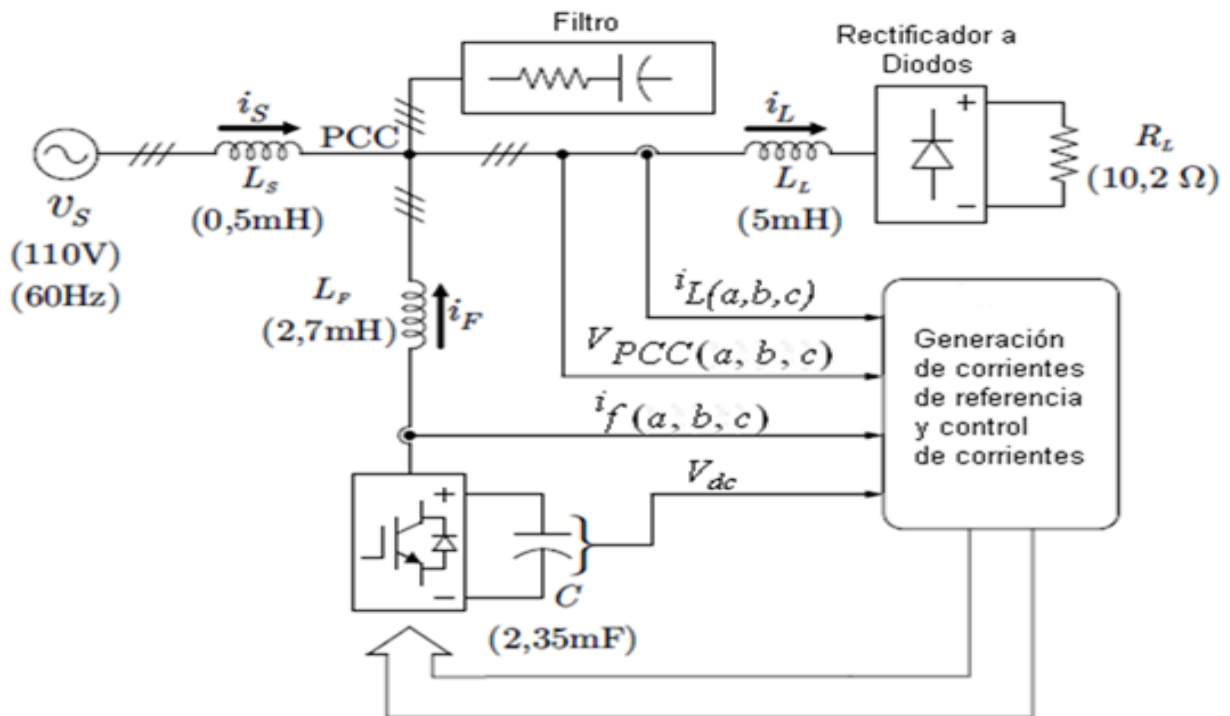


Figura 2.4 Diagrama de bloque del montaje experimental.

Para las condiciones del sistema representado en la figura 2.4, la corriente de carga contiene valores para las siguientes componentes armónicas, quinta armónica de secuencia negativa, séptima armónica de secuencia positiva, oncenava armónica de secuencia negativa y trece armónica de secuencia positiva.

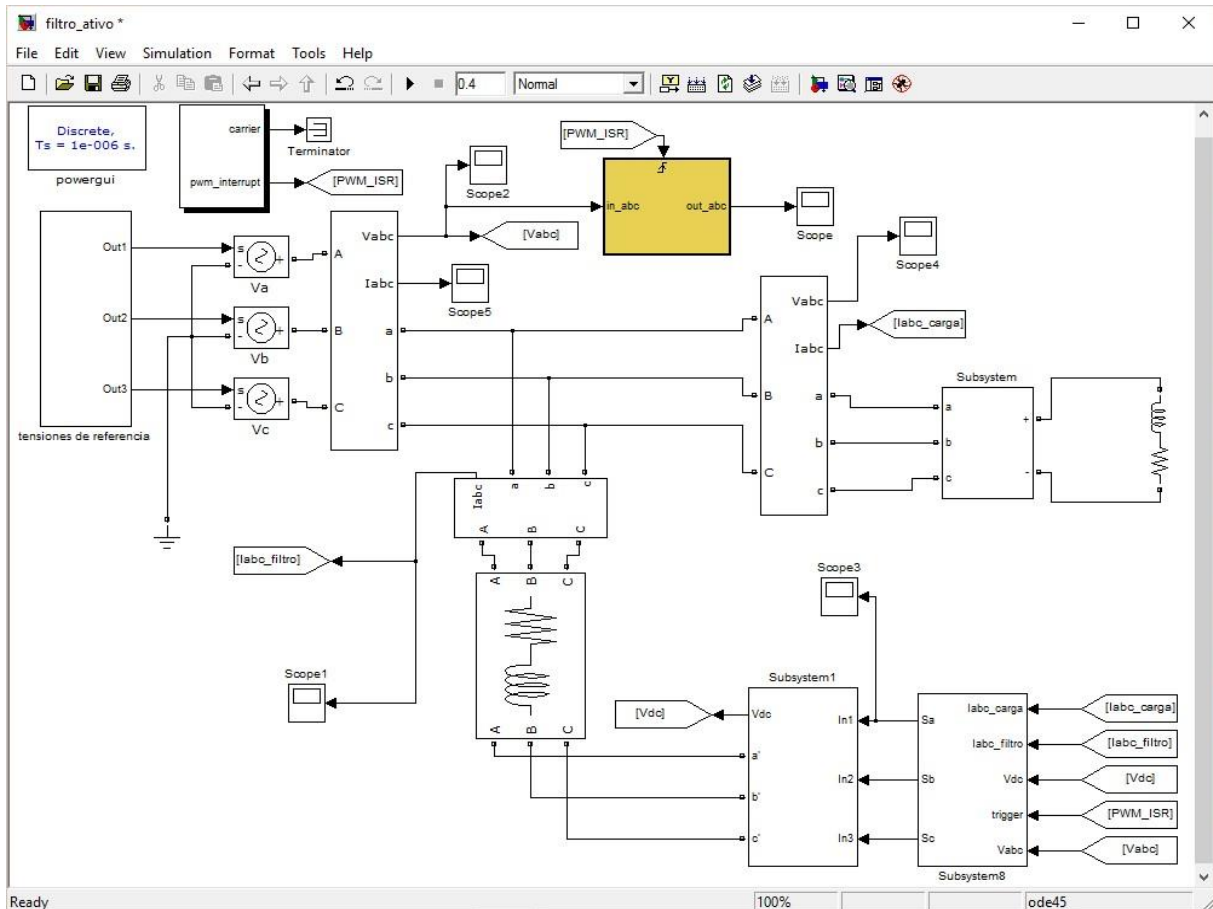


Figura 2.5 Implementación del Filtro activo en el Simulink.

## 2.2.2 Simulación del restaurador dinámico de tensión

El restaurador dinámico de tensión es generalmente empleado para evitar que huecos de tensión de corta duración causen la desconexión o el mal funcionamiento de cargas sensibles. La configuración general de un DVR trifásico se muestra en la figura 2.6. Se compone de un DVR conectado en serie con la línea de alimentación a través de tres transformadores monofásicos (0,8 MVA y 690/690 V) para inyectar las tensiones de compensación. Un filtro paso bajo LC está conectado entre el convertidor en fuente de tensión (VSC) que forma parte del DVR y el transformador.

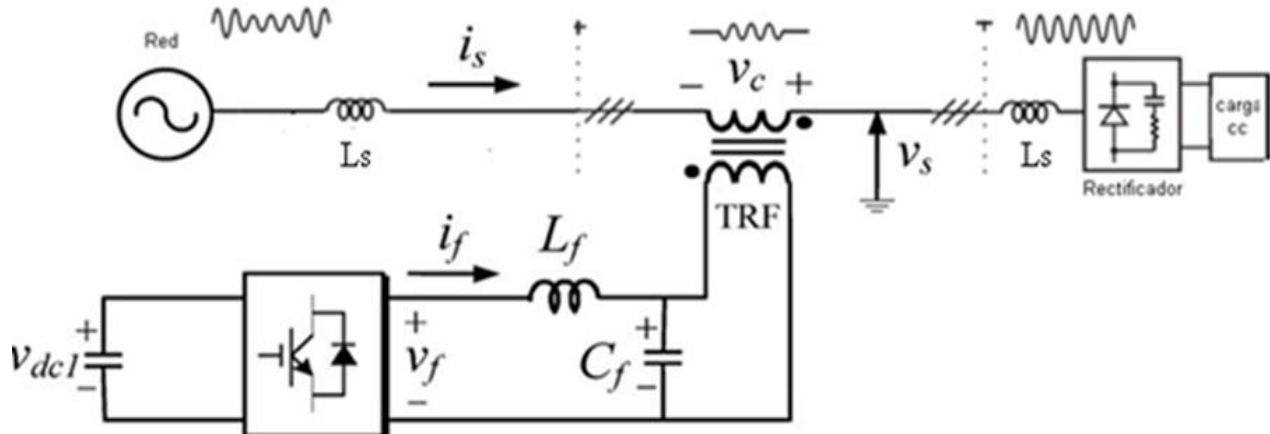


Figura 2.6 Esquema de una fase del DVR trifásico.

### 2.2.2.1 Partes que conforman el DVR

Para llevar a cabo las simulaciones propuestas, se utilizó un sistema eléctrico de 34.5 kV y un transformador de 34.5/0.690 kV. El DVR fue conectado entre la red y la carga sensible, cuya tensión nominal es 690 V. Además del bus de continua y del inversor en fuente de tensión, el DVR necesita un filtro de salida y el transformador de inyección de tensión.

#### 2.2.2.1.1 Filtro de salida

Las tensiones de salida sintetizadas por el convertidor no se pueden aplicar directamente al transformador debido a su contenido de armónicos, provocados por la conmutación del inversor de alta frecuencia. Para corregir los voltajes aplicados al secundario del transformador se coloca un filtro LC en la salida del inversor. Los valores del filtro utilizados en la simulación son:  $L_f = 0.2 \text{ mH}$  y  $C_f = 1000 \text{ mF}$

#### 2.2.2.1.2 Transformador de inyección

El transformador de inyección es conectado en serie, este debe tener bajos valores de resistencias en el devanado primario y secundario para reducir al mínimo las pérdidas. La restricción en los valores de la inductancia de dispersión depende de la caída de tensión y los errores generados en el transformador.

Se utilizan tres transformadores trifásicos para componer la fase de inyección.

### 2.2.2.2 Obtención de la señal de referencia

La señal de referencia se obtiene a partir de la expresión:

$$\begin{bmatrix} V_{Ta}^* \\ V_{Tb}^* \\ V_{Tc}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{sa,antes} & -V_{sa} \\ V_{sb,antes} & -V_{sb} \\ V_{sc,antes} & -V_{sc} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

donde:

$V_{sa, antes}$ ,  $V_{sb, antes}$ , y  $V_{sc, antes}$  son los voltajes antes de ocurrir la falla,  $V_{sa}$ ,  $V_{sb}$  y  $V_{sc}$  son los voltajes instantáneos del sistema.

Para obtener las tensiones de antes de ocurrir la falla se utiliza un PLL (Phase locked loop) con constante de tiempo grande según se muestra en la figura 2.7 de la implementación en el Simulink. Inicialmente, son obtenidas las componentes  $\alpha$  y  $\beta$  de las tensiones del sistema. Con esto se elimina la componente homopolar. Cuando no hay ningún problema en la red, las tensiones son balanceadas y sinusoidales, de modo que el vector tensión  $\alpha\beta$  tiene amplitud constante y gira con velocidad igual a la frecuencia angular de la red. En el caso que se utilice un sistema de referencia  $dq$  girando a la velocidad sincrónica, tal vector tensión sería estacionario, con componentes  $d$  y  $q$  constantes. Si ocurre una falla desbalanceada, la amplitud y la velocidad del vector tensión pasan a ser oscilatorios, tanto en el sistema de referencia  $\alpha\beta$  como en el referencial  $dq$ . El uso de un PLL para obtener la posición angular del vector tensión de la red, impide que el ángulo estimado del vector tensión sufra variaciones instantáneas, debido al integrador existente en el lazo del PLL. Además de eso, al implementar un PLL con dinámica lenta, son atenuadas las oscilaciones en la frecuencia estimada. Aun así, las oscilaciones en la amplitud del vector tensión en  $\alpha\beta$  estarán también presentes en el vector  $dq$ . Entre tanto, si las componentes  $d$  y  $q$  del vector tensión pasaran por filtros paso bajo lentos, aunque haya una disminución o una elevación súbita en la amplitud del vector tensión, o en cada componente  $d$  y  $q$ , esa variación será bastante retardada. Las componentes  $d$  y  $q$  filtradas, junto con el ángulo estimado por el PLL lento pueden entonces ser usados como una buena

alternativa del vector tensión de secuencia positiva y frecuencia fundamental antes de la falla. Este vector tensión corresponde a la tensión que debería estar alimentando a la carga durante y después de la falla. La diferencia entre él y el vector tensión presente en la red debe ser suministrada por el DVR.

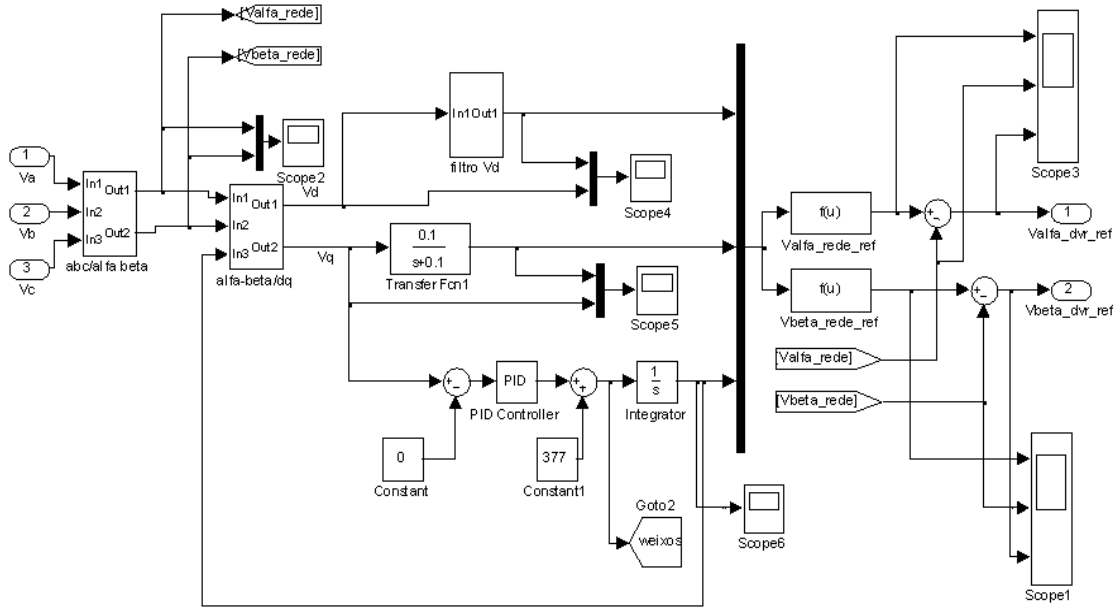


Figura 2.7 Esquema en el Simulink de la obtención de las señales de referencias.

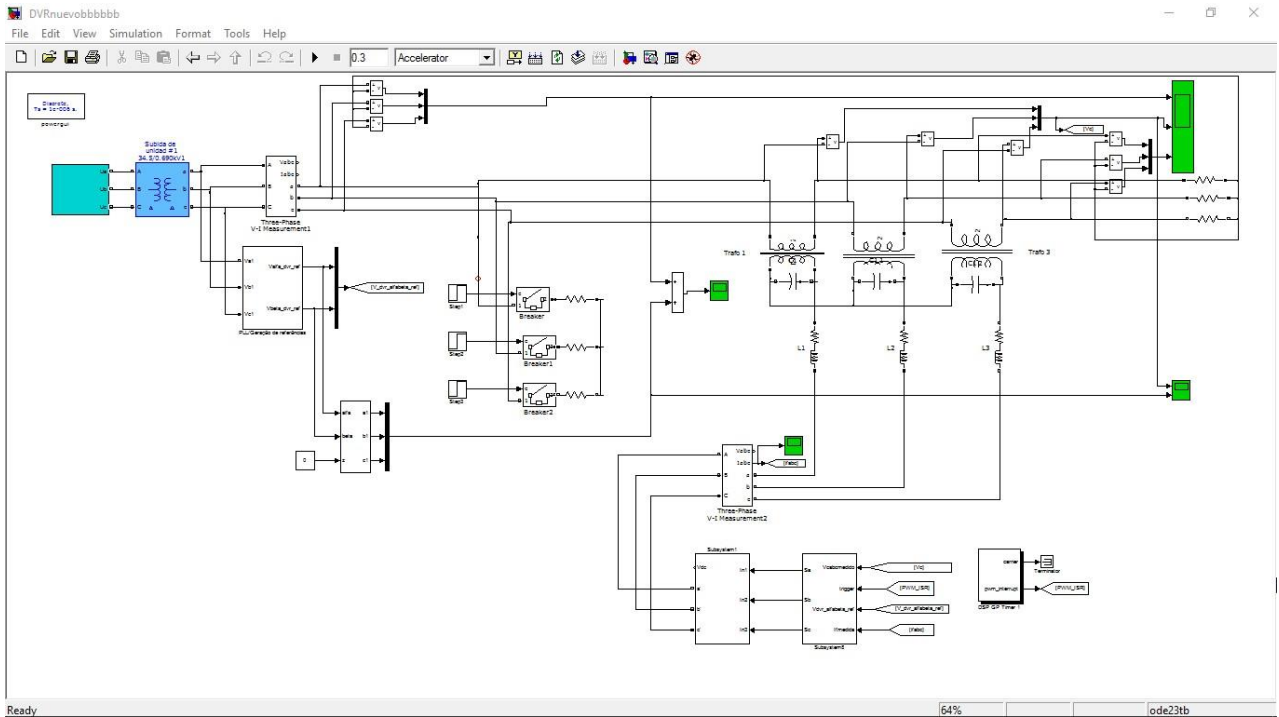


Figura 2.8 Implementación del DVR en el Simulink.

### Conclusiones parciales

En este capítulo se puede apreciar que los avances en tecnologías de electrónica de potencia y su integración sofisticada en los sistemas eléctricos, permiten convertir la red convencional en una red inteligente más interactiva. Aunque en Cuba actualmente no existen proyectos dedicados al desarrollo de este tipo de redes, sí se han realizado inversiones para la modernización de la tecnología existente para mejorar la eficiencia. Además, se implementó en el Simulink de Matlab circuitos de un Filtro activo y de un DVR para su análisis.

### **Capítulo 3. Análisis de los resultados de las simulaciones.**

Con el fin de evaluar el comportamiento de un Filtro activo y un DVR ante diferentes perturbaciones en el suministro eléctrico se implementaron sus circuitos en la herramienta Simulink del Matlab. En este capítulo se muestran los resultados de estas simulaciones.

#### **3.1 Resultados de las simulaciones**

Primeramente se analizarán los resultados de las simulaciones realizadas al filtro activo de potencia.

##### **3.1.1 Resultados de simulación del control diseñado en un filtro activo**

En la figura 2.4 se muestra el esquema de un circuito utilizando un filtro activo de potencia.

Para las condiciones del sistema representado en la figura 2.4, la corriente de carga contiene valores para las siguientes componentes armónicas, quinta armónica de secuencia negativa, séptima armónica de secuencia positiva, oncenava armónica de secuencia negativa y trece armónica de secuencia positiva. Por causa de esas características fueron escogidos controladores de corriente sintonizados justamente con esas componentes armónicas.

La respuesta del control de corriente en régimen permanente para esas corrientes de referencia puede ser observada en la figura 3.1.

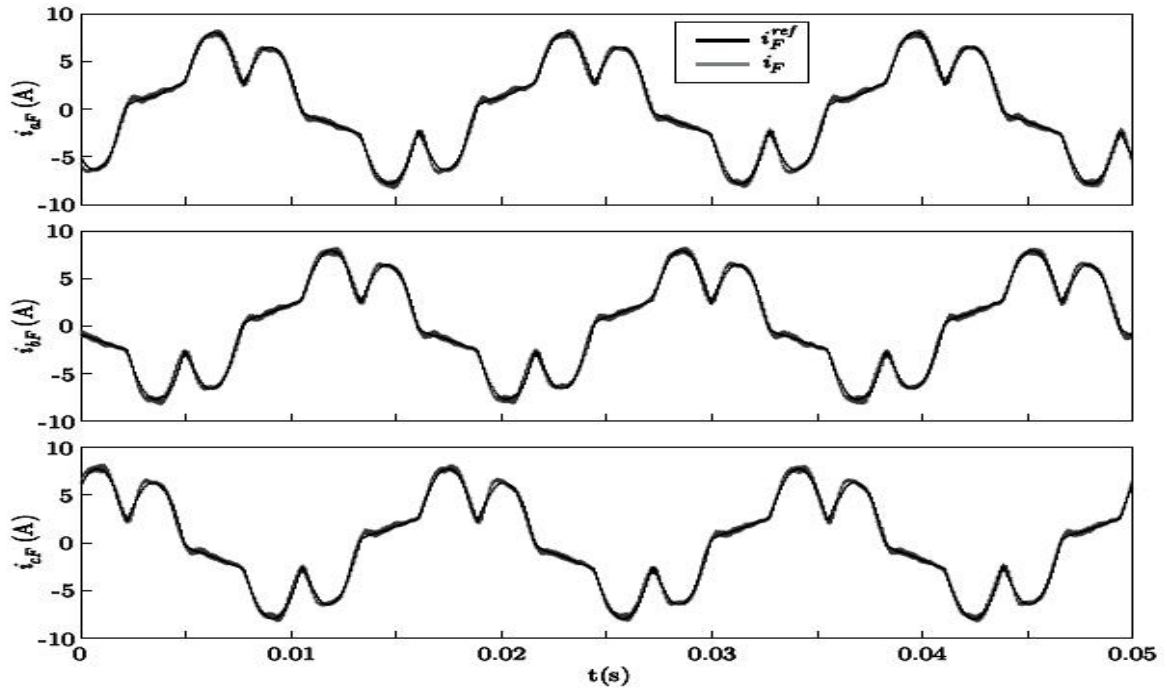


Figura 3.1 Corrientes en la salida del filtro con sus respectivas referencias.

Los gráficos de las tensiones en el PCC (punto común de acoplamiento) ( $V_{aPCC}$ ,  $V_{bPCC}$ ,  $V_{cPCC}$ ), de las corrientes de carga ( $i_{aL}$ ,  $i_{bL}$ ,  $i_{cL}$ ) y las corrientes de la fuente ( $i_{aS}$ ,  $i_{bS}$ ,  $i_{cS}$ ) obtenidos a través de la utilización del control del filtro aparecen en la figura 3.2, se observa el funcionamiento correcto del control y elimina el contenido de armónico de la señal.

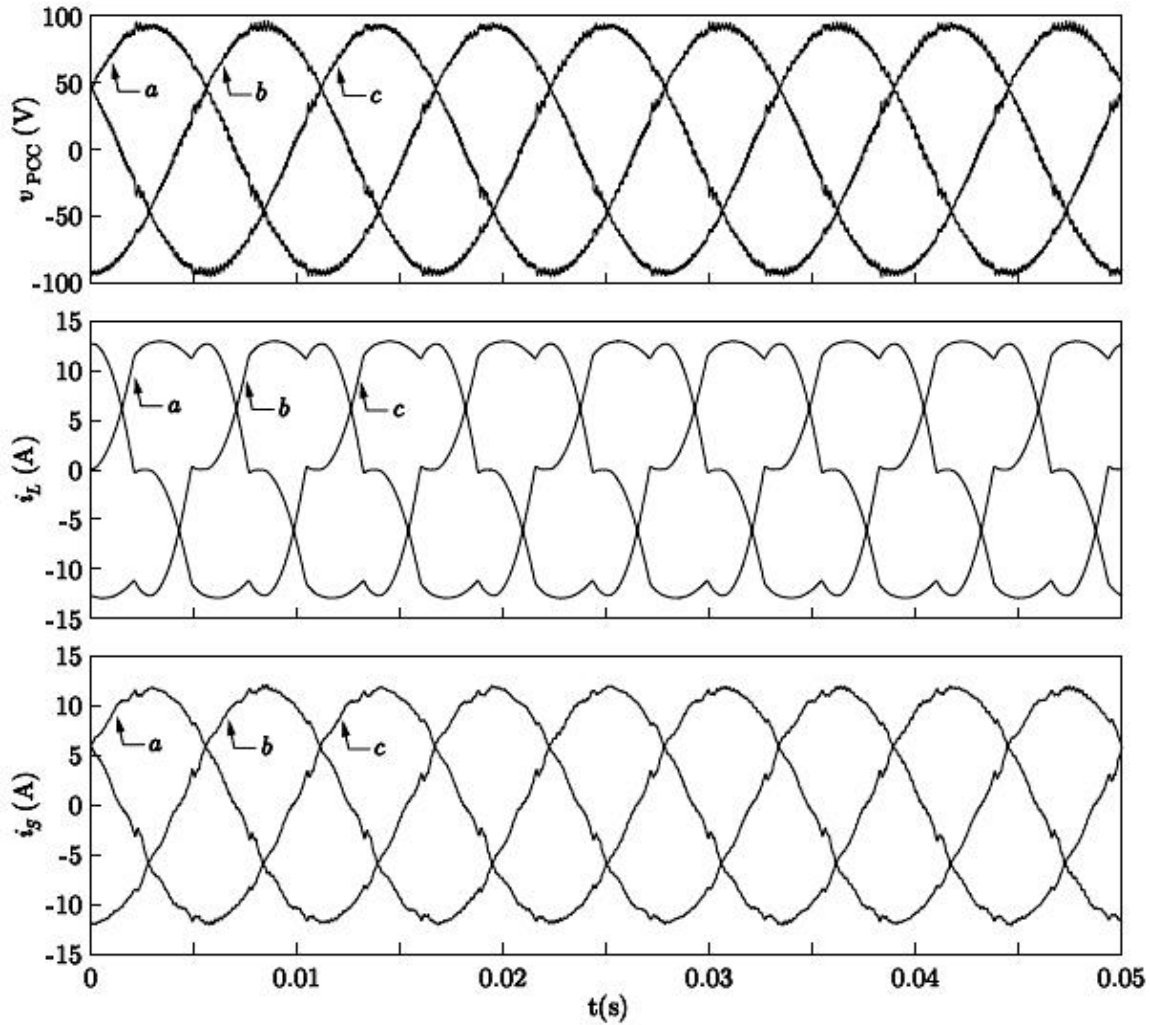


Figura 3.2 Tensiones en el PCC, corrientes de carga y corriente de la fuente

### 3.1.2 Resultados de simulación de un DVR

El dispositivo se implementó en un circuito con una carga resistiva pura, para comparar las formas de onda de tensión en dicha carga en tres condiciones diferentes. Primeramente, cómo se comporta la forma de onda en condiciones de trabajo normales, luego ante un hueco de tensión desbalanceado y finalmente ante un hueco de tensión balanceado.

Las gráficas de las figuras representan, en la parte superior, la tensión de la red; en el centro, el voltaje aportado por el DVR; en la parte inferior, la tensión en la carga.

En la figura 3.3 se puede apreciar que el aporte del DVR es prácticamente cero debido a que el voltaje del sistema presenta una forma de onda sin distorsiones.

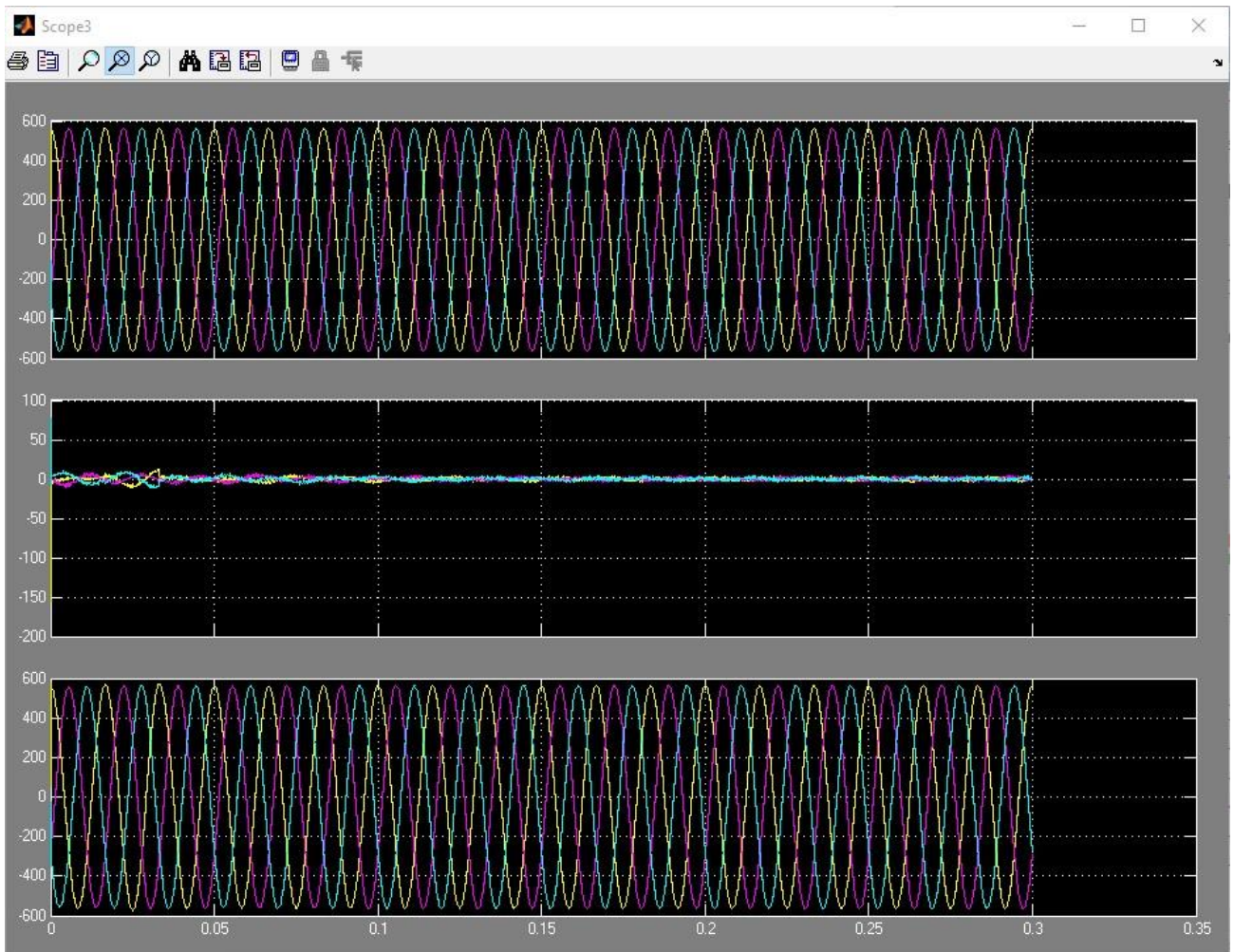


Figura 3.3 Sistema con DVR en condiciones normales de operación.

En la figura 3.4 se observa que a los 0.1 segundos ocurre un hueco de tensión desbalanceado. El DVR responde inyectando tensiones para ser sumadas a las del sistema y obteniéndose un valor de tensión constante en la carga.

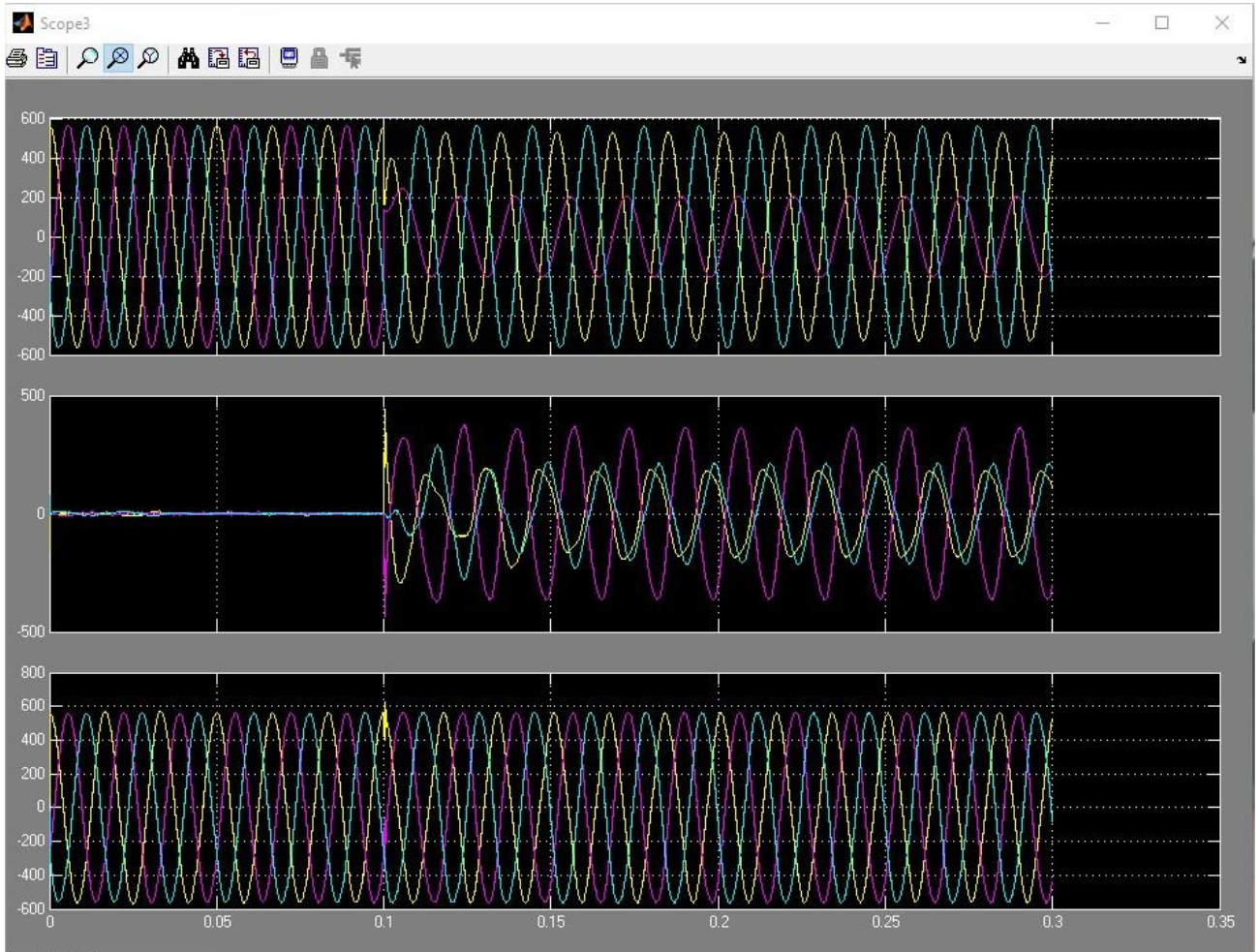


Figura 3.4 Sistema con DVR ante un hueco de tensión desbalanceado.

En la figura 3.5 se provoca un hueco de tensión balanceado a los 0.1 segundos. En ese instante de tiempo el DVR que se mantenía con un régimen de aporte cero, responde con suministro de tensión sumado al del sistema para lograr el valor deseado en la carga.

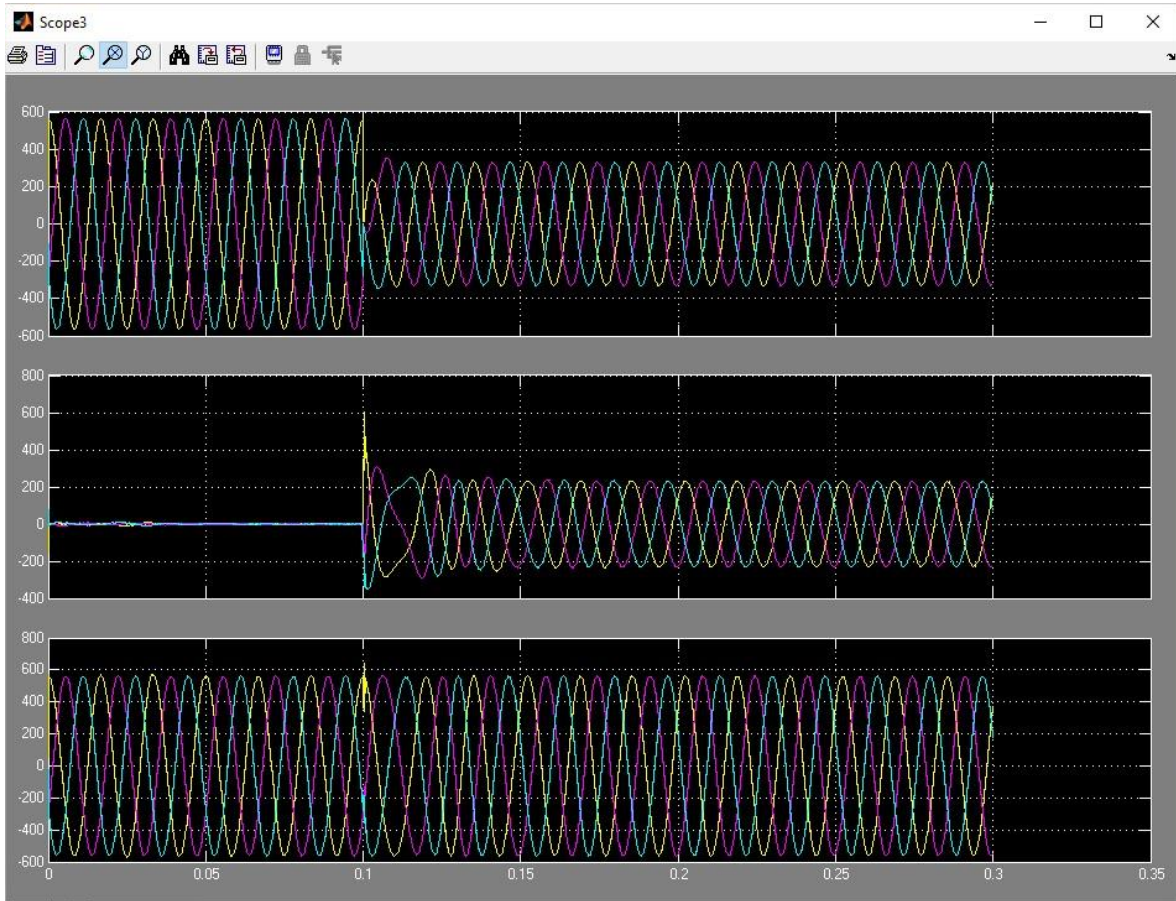


Figura 3.5 Sistema con DVR ante un hueco de tensión trifásico.

### Conclusiones parciales

Con los resultados obtenidos en este capítulo se mostró la importancia de los Filtro activo y DVR en una red eléctrica para lograr brindar un servicio con la mejor calidad posible. La rápida respuesta de estos dispositivos logra que, ante las perturbaciones de red, los consumidores no sufran afectaciones apreciables en su suministro energético, que pudieran implicar un incorrecto funcionamiento de sus equipos.

## **Conclusiones**

1. La electrónica de potencia juega un papel fundamental en el suministro de energía en las redes eléctricas actuales. Múltiples son los aportes al mantenimiento de la calidad de energía que se han realizado, dando lugar a dispositivos de gran fiabilidad y eficiencia como son los Filtros activos, los FACTS y los sistemas de energía renovable.
2. En el futuro los sistemas eléctricos deberán transformarse en redes activas capaces de permitir flujos de potencia bidireccionales, tanto de la red al consumidor como del consumidor a la red. La electrónica de potencia juega un papel fundamental en estas redes del futuro.
3. Los resultados obtenidos mediante las simulaciones muestran el buen desempeño de un Filtro activo y de un DVR para lograr el mantenimiento de la forma de onda del sistema, ante perturbaciones de red.

## **Recomendaciones**

1. Implementar en el Simulink del Matlab el circuito de una Red Eléctrica Inteligente donde estén presentes los dispositivos Filtros activos y FACTS, así como fuentes de generación distribuidas, que incluyen sistemas de generación con fuentes de energía renovables.
2. Implementar de forma práctica algunas de las simulaciones realizadas en el Matlab.

## Referencias

- [1] Muhammad H. Rashid, "Electrónica de Potencia", Prentice Hall Hispanoamericana, S.A., 1995.
- [2] ESCUELA DE CIENCIAS BÁSICAS TECNOLOGIA E INGENIERIA 299019- Electrónica Industrial Act No. 1. Revisión de pre saberes.
- [3] Mohan, Electrónica de Potencia, 3ra edición, Capítulo 1.
- [4] El Blog de la Energía Sostenible. Accedido el 8 de febrero de 2015. [Dirección web] <http://www.blogenergiasostenible.com/>
- [5] Juan Pablo Sanmartin Burbano, "Ubicación Óptima de Dispositivos FACTS en Sistemas de Potencia Implementando un Algoritmo de Búsqueda de la Armonía", Proyecto de Grado.
- [6] Revista Electroindustria, Electrónica de Potencia e Integración de Energías Renovables No Convencionales. Accedido el 9 de febrero de 2016.
- [7] P. Suárez y J. Farith, "Control de filtros activos de potencia para la mitigación de armónicos y mejora del factor de potencia en sistemas desequilibrados", Tesis doctoral, Dep. de Ingeniería Eléctrica, Universidad Carlos III de Madrid, 2007,
- [8] Control De Filtros Activos De Potencia Serie En Sistemas De Distribución De Energía Eléctrica, Báñez Chicharro, Fernando.
- [9] M. Lamich, "Filtros Activos de Potencia", Dep. de Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica De Catalunya,
- [10] PIGAZO, Alberto. "Método de Control de Filtros Activos de Potencia Paralelo Tolerante a Perturbaciones de la Tensión de Red". Tesis Doctoral. Universidad de Cantabria, Santander, España. Junio de 2004.
- [11] Ch. A. Ardila Ríos, A. R. Salamanca Ramírez, "Restaurador Dinámico de Tensión (DVR): Análisis y Estrategias de Control", Tesis de Grado, Dep. de Ingenierías Físico-mecánicas, Universidad Industrial de Santander, 2010.

- [12] Yun Wei Li, Poh Chiang Loh, Frede Blaabjerg, D. Mahinda Vilathgamuwa, "Investigation and Improvement of Transient Response of DVR at Medium Voltage Level", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 43, pp 1309-1319, 2007.
- [13] Chellali Benachaiba, Brahim Ferdi, "Voltage Quality Improvement Using DVR", Electrical Power Quality and Utilisation, Journal Vol.14, No.1,2008.
- [14] John Godsk Nielsen, Frede Blaabjerg, "A Detailed Comparison of System Topologies for Dynamic Voltage Restorers", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.41 pp1272-1280, 2005
- [15] Agileswari K. Ramasamy, Vigna Ramachandaramurthy, Rengan Krishna Iyer, "Dynamic Voltage Restorer Lab Prototype", IEEE International Conference on Power and Energy, 2008.
- [16] John Hee Han, JinGeun Shon, Dong Seo, Hee Jong Jeon, "Development of on-line type Dynamic Voltage Compensation System Using Supercapacitor", The 7th International Conference on Power Electronics, October 2007.
- [17] Illinois CapacitorsInc, Supercapacitors, Disponible en internet: <http://www.illinoiscapacitor.com/pdf/Papers/supercapacitor.pdf>. Consultado: 8 de septiembre 2010.
- [18] D.A. Martínez Victoria, "Balastro Electrónico Mono-etapa", Tesis Licenciatura, Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones, Dep. de Ingeniería Electrónica, Universidad de las Américas Puebla, diciembre 2000.
- [19] Krzysztof Piatek, "Sliding mode control of DVR with minimized energy injection", Conference on Power Electronics and Applications, 2005.
- [20] S. S. Choi, B. H. Li, D. M. Vilathgamuwa, "A Comparative Study of Inverter-And Line-Side Filtering Schemes in the Dynamic Voltage Restorer", IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Vol.4, pp 1967-1972,2000.
- [21] Sasitharan S., Mahesh K. Mishra, B. Kalyan Kumar and Jayashankar V., "Rating and Design Issues of DVR Injection Transformer", Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2008.

[22] A. C. Badilla., "Proyecto solar fotovoltaico conectado a la red", Costa Rica, 2005.

[23] 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. Santa Clara, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, 2013.

[24] E. A. Sierra Jiménez, "Análisis del diseño y control de un generador trifásico doblemente alimentado", Tesis de grado, Dep. de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Chile, Santiago de Chile, 2012.

[25] J.R. Gómez Sarduy, P.R. Viego Felipe, "Redes Eléctricas Inteligentes" <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=243536>, febrero 2, 2016, 10.00am

[26] C. de Palacios Rodríguez, "Cómo hacemos avanzar a la red eléctrica hacia una red inteligente mediante el uso de electrónica de potencia", *energética xxi*, no. 144, octubre, 2014.

[27] E. Velasco Ramírez, C. Ángeles Camacho y M. García-Martínez, "Redes de transmisión inteligente. Beneficios y riesgos", *Ingeniería Investigación y Tecnología*, vol. XIV, no. 1, enero-marzo, 2013.