



WHITEPAPER

Requerimientos y soluciones del Código de Red.

Al continuar aumentando mundialmente la capacidad de generación de electricidad, incluyendo una mayor participación de generación renovable y, más cargas no lineales y otras desafiantes que se conectan a la red eléctrica, requerimientos más estrictos con relación a la conexión de la red, operación de ésta y balanceo de la generación (renovable o no) y el consumo (cargas) los presentan los operadores del sistema de transmisión (TSO) y de distribución (DSO). Estos requerimientos se compilan en los códigos de red (también conocidos como códigos de las redes) y garantizan que los sistemas de energía eléctrica permanezcan confiables y firmes a la vez que suministran energía continua de alta calidad. Los Códigos de Red definen los requerimientos que las instalaciones (generadores, consumidores y redes eléctricas) tienen que cumplir para lograr los requerimientos del código de red. El cumplimiento se puede satisfacer por los generadores, cargas controlables, soluciones convencionales de mejoramiento en la calidad de la energía y/o soluciones modernas electrónicas de potencia.

1. Códigos de Red.

Un código de red es una especificación técnica que define los parámetros que unas instalaciones conectadas a una red eléctrica tiene que satisfacer para garantizar un funcionamiento apropiado seguro, estable, eficiente y económico del sistema de energía eléctrica. Las instalaciones pueden ser una planta generando electricidad (renovable o no), un consumidor (carga) u otra red eléctrica (red de transmisión, de distribución o micro).

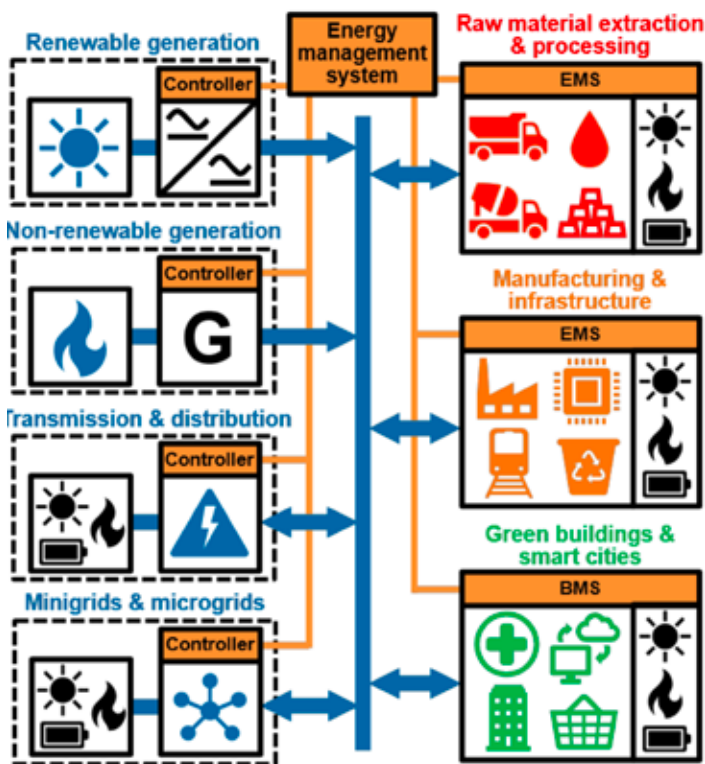


Fig 1: Instalaciones que necesitan cumplir con los códigos de red

Los contenidos de un código de red pueden variar dependiendo en el país, los requerimientos de los TSO o de los DSO. El código de red regula las condiciones generales relacionadas con cómo se conectan las instalaciones a la red eléctrica. El código también cubre el uso de la red, servicios del

sistema, expansión de la red, operación general de la red y el mejoramiento en la calidad de la energía.

Con relación a las plantas de generación, las reglas del código de redes se aplican a todas las plantas que alimentan la red de control de la red, desde plantas de energía grandes hasta productores de potencia independientes. Entre otras cosas, el código de redes define las condiciones específicas que estas plantas deben satisfacer para participar en proveer servicios complementarios a la red. El código de redes también especifica el comportamiento requerido de estas plantas durante las perturbaciones del sistema. Estos requerimientos incluyen, por ejemplo, el control del voltaje, el control del factor de potencia, la respuesta a una falla del sistema (p. ej. corto circuito), la respuesta a los cambios de frecuencia en la red y, el requerimiento para manejarse durante interrupciones cortas de la conexión.

1.1. Tipos de Códigos de Red

Los códigos de redes se pueden dividir en tres grupos siguiendo la terminología de la Red Europea de Operadores del Sistema de Transmisión para Electricidad (ENSTO-E, 2019).

- Códigos de conexión: Orientado a entregar energía más verde y a adoptar patrones de consumo más inteligentes.
- Códigos de operación: Enfocado a reforzar la seguridad del suministro.
- Códigos de mercado: Dirigido a permitir una integración más amplia del mercado eléctrico.

Códigos de conexión	Requerimientos para generadores (RfG). Conexión de la demanda (DCC). Conexión HVDC (HVDC).
Códigos de operación	Operación del sistema (SOGL). Emergencia y restablecimiento (ER).
Códigos del mercado	Administración de la localización y congestión de la capacidad (CACM). Localización de la capacidad futura (FCA). Balanceo de la electricidad (EB).

Tabla 1: Tipos de códigos de red (ENSTO-E, 2019)

1.2. Requerimientos del Código de Redes

Los requerimientos técnicos en los códigos de redes los determina la necesidad de mantener la confiabilidad, seguridad y calidad del suministro de energía y satisfacer los siguientes objetivos:

- Se deben cumplir las necesidades de energía eléctrica de todos los consumidores confiablemente.
- El voltaje y la frecuencia deben mantenerse dentro de los límites establecidos para evitar el daño al equipo conectado a la red eléctrica.
- El sistema de energía eléctrica debe poder recuperarse rápidamente de las perturbaciones del sistema.
- En todo momento el sistema de energía eléctrica debe operar sin poner en peligro al público o al personal operativo.

Los requerimientos técnicos para los servicios y las capacidades para los generadores, consumidores y redes eléctricas se presentan en los códigos de redes. Cuando se necesiten estos servicios y capacidades también se pueden usar para respaldar el sistema de energía eléctrica.

Normalmente no están disponibles todo el tiempo y dependen de si el generador o la carga está en la línea y operando a un nivel donde se pueda proveer un servicio o capacidad. Normalmente solo se requieren cuando se necesitan, algunos servicios y capacidades se proporcionan para situaciones anormales/de urgencia (accionados por el evento). Los requerimientos del código de redes se pueden dividir en tres grupos:

- Servicios complementarios de red: Los servicios requeridos por el TSO o el DSO para mantener la integridad y estabilidad del sistema de energía eléctrica.
- Capacidades de gestión de la estabilidad y energía del sistema: Mejoran la estabilidad del sistema y aseguran la gestión eficiente del suministro de energía.
- Capacidades de mejoramiento en la calidad de la energía: Son las capacidades requeridas para mitigar los diferentes problemas de calidad de la energía del sistema de energía eléctrica.

Categoría	Requerimiento
Servicios complementarios de la red	
Respaldo de la frecuencia	Reserva de contención de la frecuencia (FCR) / Reserva de control primaria / Reserva de respuesta a la frecuencia. Reserva de restablecimiento automático de la frecuencia (aFRR) / Reserva de control secundario / Reserva de rotación. Reserva de restablecimiento manual de frecuencia (mFRR) / Reserva de control terciario / Reserva de rotación. Control activo de energía. Control de índice de progresión. Seguimiento de la carga.
Respaldo del voltaje	Control de voltaje. Control de potencia reactiva. Control de factor de potencia. Capacidad rápida de inyección de corriente reactiva (FCRI).

	Capacidad de bajo voltaje sin fallas (LVRT). Capacidad de alto voltaje sin fallas (HVRT).
Respaldo del restablecimiento del sistema	Capacidad de arranque desde apagón. Capacidad de aislamiento.
Capacidades de gestión de la estabilidad y energía del sistema	
Mejoramiento en la estabilidad del sistema	Mejoramiento en la estabilidad del ángulo del rotor. Mejoramiento en la estabilidad de la frecuencia. Mejoramiento en la estabilidad del voltaje. Aumento de la capacidad de transferencia de potencia. Amortiguación de la oscilación de la potencia (POD). Amortiguación de la resonancia sub-sincrónica (SSR). Firmeza de la capacidad.
Gestión del suministro de energía	Rasurado de picos. Nivelación de la carga. Cambio de la carga.
Capacidades de mejoramiento en la calidad de la energía	
Mitigación de las distorsiones de la forma de la onda	Armónicas. Interarmónicas. Lograr.
Mitigación de variaciones de corta duración	Bajas de voltaje. Aumento de voltaje rms. Interrupciones.
Mitigación de variaciones de larga duración	Voltaje bajo. Voltaje alto. Interrupciones sostenidas.
Mitigación de transitorias	Transitorias impulsivas. Transitorias oscilatorias.
Mitigación de otros problemas de calidad de energía	Desbalanceos de voltaje. Fluctuaciones de voltaje (parpadeo). Variaciones de frecuencia de energía. Factor de potencia bajo (atrasado o adelantado).

1.3. Acatamiento del código de redes (GCC)

Donde un código de redes está vigente, el TSO o DSO requiere de la prueba del acatamiento de las instalaciones (planta generadora o carga), pero los procedimientos para proporcionar esto difiere entre los países y, puede incluir las declaraciones del fabricante, declaraciones del propietario de las instalaciones, prueba de la unidad del fabricante, prueba de las instalaciones y, estudios/modelos del comportamiento estático y/o dinámico.

También es posible proporcionar el cumplimiento por medio de certificados emitidos por un certificador autorizado.

1.4. Estándares internacionales y códigos de malla

Debido al variado enfoque, propósito y contenido de los estándares individuales, códigos de los estándares y de redes se relacionan uno con otro en formas diferentes:

- Los estándares internacionales se pueden aplicar como referencia cuando se escribe un código de redes y modificarse de acuerdo con las necesidades específicas de un país.
- Los estándares internacionales que gobiernan la conexión de las plantas generadoras en algunos casos pueden usarse en lugar de un código de redes.
- Se puede hacer referencia a los estándares desde el código de redes. Por ejemplo, los códigos de redes a menudo especifican los requerimientos de la calidad de la energía haciendo referencia a los estándares relevantes.

2. Respaldo de la frecuencia

La diferencia entre la energía disponible (generación) y la energía demandada (consumidores) causa variaciones en la frecuencia. El respaldo de la frecuencia es un conjunto de servicios complementarios de la red que mantienen la frecuencia dentro de márgenes dados por la modulación continua de la potencia activa para mantener la frecuencia dentro de límites permisibles para evitar el potencial desechado de la potencia, inestabilidad y la pérdida del sistema eléctrico.

El respaldo de la frecuencia se relaciona al balance

a corto plazo de la energía y frecuencia del sistema de potencia eléctrico. Este es el principal servicio proporcionado por los generadores (en línea para los servicios automáticos y en línea y fuera de línea para servicios activados de plazo más largo). También pueden proporcionarlo sistemas de cargas flexibles y de almacenamiento de energía.

2.1. Reserva de contención de la frecuencia (FCR)

La FCR es una reserva de operación de potencia activa necesaria para la contención constante de desviaciones de la frecuencia (fluctuaciones) del valor nominal. La FCR se enfoca a la confiabilidad operacional de un área sincrónica dada estabilizando la frecuencia del sistema en un marco de tiempo de segundos a un valor estacionario aceptable después de una perturbación o incidente. No restablece la frecuencia del sistema al punto de ajuste.

El FCR se activa automática y localmente. Tiene una respuesta instantánea que se debe mantener por hasta quince (15) minutos antes de que se libere y un tiempo de activación total de hasta treinta (30) segundos. El FCR la pueden proporcionar los generadores, los sistemas de respuesta a la demanda o de almacenamiento de energía.

FCR es la terminología usada por ENTSO-E. El término usado por la Unión para la Coordinación de Transmisión de Electricidad (UCTE) es reserva de control primario. El término usado por la Corporación Nacional de Confiabilidad Eléctrica Americana (NERC) es reserva de respuesta a la frecuencia.

2.1.1 Reserva de contención de frecuencia para perturbaciones (FCR-D)

La FCR-D es otro servicio complementario específico para el sistema de energía eléctrica Nórdico con el propósito de estabilizar el sistema

en caso de perturbaciones donde la frecuencia cae a menos de 49.9 Hz y estará completamente comprometido a los 49.5 Hz. 50% de la reserva se regulará hacia más en un lapso de 5 segundos y el 100% de la reserva se regulará hacia más en un lapso de 30 segundos.

2.2 Reserva de restablecimiento de la frecuencia (FRR)

La FRR es una reserva de operación de energía activa para restablecer la frecuencia del sistema al valor nominal después de que ocurra un desbalanceo del sistema repentino (p. ej. la interrupción de una planta de energía). El FRR está enfocado a restablecer la frecuencia del sistema en el marco de tiempo definido dentro del área sincrónica dada liberando las reservas de frecuencia amplia. Para sistemas interconectados grandes, donde se implementa un control de restablecimiento de frecuencia descentralizado, la FRR también se enfoca a restablecer el balanceo entre la generación y la carga para cada TSO, restableciendo los intercambios de energía entre los TSO a su punto de ajuste.

La FRR se activa centralmente y debe tener un tiempo de activación de 30 segundos hasta los 15 minutos (dependiendo de los requerimientos específicos del área sincrónica). La pueden proporcionar los generadores, los sistemas de respuesta a la demanda o de almacenamiento de energía. La FRR reemplaza la FCR si la desviación de la frecuencia dura más de 30 segundos.

2.2.1 Reserva de restablecimiento de frecuencia automática (aFRR)

La aFRR es un complemento automático en el proceso de la FRR. La reserva aFRR difiere de la FCR en que la primera se controla remotamente por un controlador centralizado mientras que la FCR se controla localmente. Una ventaja de la aFRR sobre la FRR es que se puede basar en un orden de

mérito y tomar en cuenta los congestionamientos de la red eléctrica.

La aFRR es la terminología usada por ENTSO-E. El término usado por la UTCE es reserva de control secundario. El término usado por la NERC es reserva rotatoria.

2.2.2 Reserva de restablecimiento de frecuencia manual (mFRR)

La mFRR se usa para el balanceo de la energía y para manejar los congestionamientos en las situaciones normales y de perturbaciones. La mFRR es el recurso de balanceo principal el cual cuando se activa manualmente sustituye las activaciones tanto de la FCR restante como de la aFRR y regresa la frecuencia al objetivo. El tiempo de activación requerido es de 15 minutos.

La mFRR es la terminología usada por ENTSO-E. El término usado por la UCTE es reserva de control terciario. El término usado por la NERC es reserva rotatoria.

2.3. Control de energía activo

El control de energía activo es necesario para asegurar una operación de red estable y confiable, estabilizar la fluctuación de la potencia activa, mantener el balance entre la generación y la demanda y darle el apoyo a la red eléctrica durante contingencias. El control de energía activo de los recursos de la energía distribuida (DER) está aumentando en su importancia para resolver los congestionamientos en las redes de transmisión y de distribución.

La estabilización y balanceo de las redes está siendo más desafiante en regiones con altos niveles de generación distribuida, especialmente donde existen grandes cantidades de generación renovable inyectada a la red eléctrica. Estas regiones necesitan capacidades de control de

energía activos para responder al despacho o a las señales de control de generación automáticas para garantizar la operación confiable de la red. El control de energía activo lo pueden proporcionar los sistemas de almacenamiento de energía que también nivelan las fluctuaciones de energía de las fuentes de generación intermitentes como lo son la energía eólica y la solar.

En las micro-redes remotas y aisladas, se requiere del control de energía activo para el balance de la energía bajo cualquier posible contingencia que pueda ocurrir, para lograr el balance de la energía aun con insuficiente suministro de ésta.

2.4. Control del índice de progresión

El control del índice de progresión se refiere a la habilidad de limitar las progresiones de energía de las plantas de generación para lograr una interconexión segura y confiable con la red eléctrica. Esto es especialmente importante para las plantas de energía para que puedan subir y bajar la carga rápidamente, como las plantas de energía solar o eólicas. Si los cambios en la energía generada son muy rápidos, la red eléctrica está sujeta a un cambio repentino en la generación y en el flujo de la energía en varios puntos. Tal escenario causa un problema grave con la entrega de energía, ya que las plantas batallan para mantener el balance de la energía de cara a los cambios rápidos. Por lo tanto, el control del índice de progresión debe contratar el cambio rápido en la energía producida para garantizar que las instalaciones entreguen un índice de progresión considerado aceptable para las TSO y DSO.

El control del índice de progresión involucra establecer, amortiguar y cambiar el nivel de la carga de una planta generadora de una manera constante durante un tiempo fijado (p. ej. progresión hacia arriba y hacia abajo) para lidiar con los cambios en la generación, demanda,

flujos del interconector o la disponibilidad del generador. Si la planta generadora no tiene la capacidad de controlar los índices de progresión, se pueden utilizar sistemas de almacenamiento de energía para el control del índice de progresión y el suministro de energía programado por medio de progresiones de energización configurables, periodos de energía constante y progresiones de desenergización configurables.

En micro-redes remotas y aisladas, la conexión a la red eléctrica a menudo no es económica o es técnicamente imposible. Las instalaciones fuera de la red a menudo se energizan con generadores de combustible fósil los cuales son caros y causan altas emisiones. Estos generadores normalmente tienen progresiones hacia arriba y hacia abajo frecuentemente resultando en un mayor consumo de combustible y de más emisiones. En estos casos, los sistemas de almacenamiento de energía pueden reducir los costos totales del sistema para operar con gradientes de potencia menores y/o menos ciclos de arranque/apagado.

2.5. Seguimiento de la carga

La capacidad del seguimiento de la carga asegura que la demanda de energía de las cargas dentro de una región o área específica se satisfaga con el balanceo continuo del suministro eléctrico (generación) y la demanda del usuario final (carga). Esto se puede lograr asignando los sistemas de generación en línea o almacenamiento de energía cuya producción se eleve o baje según sea necesario para seguir los cambios en la carga momento a momento. El seguimiento de la carga también se puede lograr usando los recursos de gestión de la respuesta a la demanda y la carga incluyendo las cargas reducibles/interrumpibles y el control directo de la carga.

Normalmente, las plantas de generación se usan para el seguimiento de la carga. Para seguir la

carga, la generación se opera de tal manera que su producción es menos que su producción de diseño o nominal (también llamada como operación de carga parcial). Eso permite que los operadores aumentar la producción del generador según sea necesario para ofrecer el seguimiento hacia arriba de la carga que se adecue al aumento de la carga. Para el seguimiento hacia abajo, la generación arranca a un nivel de producción alto y la producción disminuye al disminuir la carga.

Los sistemas de almacenamiento de energía son una buena solución para el seguimiento de la carga ya que su potencia puede fluir hacia adentro y hacia afuera de la red en tiempo real dependiendo de los cambios fluctuantes del consumo. Su uso en lugar de las plantas de generación tiene muchos beneficios:

- Pueden operar fácilmente a niveles parciales de producción.
- Pueden responder casi en tiempo real, dentro de los milisegundos, para seguir exactamente las subidas y bajadas de la variación de la carga.
- Se pueden usar efectivamente tanto para el seguimiento hacia arriba de la carga (al aumentar la carga) como para el seguimiento hacia abajo (al disminuir la carga), bien sea cargando o descargando.
- Se pueden combinar con las plantas de generación para proporcionar la respuesta inmediata mientras la planta se pone en línea.

3. Respaldo del voltaje

El respaldo del voltaje se compone de un juego de servicios adicionales requeridos para mantener el voltaje del sistema de energía eléctrica dentro de los límites prescritos durante la operación normal y durante las perturbaciones conservando

el balance de la generación y consumo de la generación de potencia reactiva.

El respaldo del voltaje se relaciona con el suministro de potencia reactiva (inyección y absorción) y se puede proveer con fuentes dinámicas (generadores, condensadores sincrónicos, soluciones de electrónica de energía), fuentes pasivas (bancos de capacitores, bancos de reactores en derivación), controladores de flujo de potencia unificados (UPFC) así como equipo de red como los transformadores de cambio de bornes en las subestaciones y las cargas:

- Gestión del perfil del voltaje y el despacho de la potencia reactiva (régimen estable): Para mantener el perfil del voltaje cercano al deseado y dentro de los márgenes de la banda de tolerancia con un marco temporal de horas.
- Mantener la estabilidad (dinámica) del voltaje: Para controlar los voltajes de la red en un marco temporal dinámico (de segundos a minutos), para evitar un evento lento de colapso del voltaje o limitar su profundidad y extensión en caso de un incidente.

3.1. Control del voltaje

El control del voltaje se refiere a controlar el perfil del nodo de voltaje a un valor objetivo o dentro de la gama objetivo. Este control se logra comúnmente inyectando y absorbiendo la potencia reactiva en un nodo controlado de voltaje por medio de fuente sincrónicas, soluciones electrónicas de potencia (STATCOM, SVC, BESS), transformadores con cambio de bornes en las subestaciones, conmutación de líneas de transmisión, plantas de energía virtual incluyendo las instalaciones de demanda y si es necesario, desecho de carga. Las TSO o DSO pueden despachar manual o automáticamente la potencia reactiva usando las fuentes de potencia activa y reactiva pasiva

que pertenecen a la generación, transmisión, distribución o micro-redes, usando métodos óptimos de flujo de energía.

3.2. Control de potencia reactiva

La necesidad de potencia reactiva varía según varíe la demanda y según las fuentes de generación varían. Como la potencia reactiva no es viable transmitirla por largas distancias en la red eléctrica, su producción se distribuye por el sistema de energía eléctrica, normalmente más cerca a los lugares donde se necesita.

Existen diferentes soluciones que pueden proporcionar el control de la potencia reactiva inyectándola o absorbiéndola:

- Las soluciones de electrónica de potencia como STATCOM, SVC y BESS pueden proporcionar una respuesta en tiempo real.
- Los condensadores sincrónicos pueden proporcionar el control de la potencia reactiva en el marco temporal de segundos.
- Los bancos de capacitores conmutados mecánicamente (MSC) y los reactores conmutados mecánicamente (MSR) pueden proporcionar el control de la potencia reactiva de segundos a minutos.

3.3. Control del factor de potencia

El control del factor de potencia involucra la regulación del factor de potencia en el lugar requerido del sistema de energía eléctrica para mantener el intercambio de la potencia reactiva mientras se mantienen los voltajes del sistema dentro de límites predeterminados.

La mayoría de los generadores y cargas conectados al sistema de energía eléctrica no son ideales y

dan como resultado un flujo de potencia reactiva y un factor de potencia menor a 1. Aunque es deseable, no todos los dispositivos cuentan con la capacidad integrada de control del factor de potencia, resultando en flujos de potencia reactiva neta a través del sistema de energía que aumentan la carga en el sistema y reducen la potencia activa que puede suministrarse.

Este problema puede abordarse a niveles de la generación, transmisión, distribución o las micro-redes añadiendo dispositivos con capacidad de control del factor de potencia, como bancos de capacitores, bancos de reactores en derivación, condensadores sincrónicos o soluciones de electrónica de potencia como STATCOM, SVC y BESS.

Las micro-redes remotas y aisladas normalmente no cuentan con capacidades integradas para el control del factor de potencia y, éste depende solo de las cargas. Los sistemas de almacenamiento de energía instalados en estas micro-redes pueden proporcionar las capacidades necesarias para obtener una operación óptima y eficiente.

3.4. Capacidad de inyección rápida de corriente reactiva (FRCI)

El propósito principal de la FRCI es la de respaldar el sistema de energía eléctrica durante un colapso de voltaje inducido por una falla. La inyección en tiempo real de la corriente reactiva podría soportar la estabilidad del voltaje del sistema a corto plazo. La FRCI durante las fallas en la red por los parques eólicos y plantas de energía solar actualmente es un requerimiento obligatorio en la mayoría de los códigos de redes nacionales.

Orientada hacia la seguridad dinámica del sistema y la calidad del voltaje, la capacidad de FRCI se puede proporcionar con generadores rotatorios, soluciones de electrónica de energía (STATCOM,

SVC, BESS), bancos de capacitores, bancos de reactores en derivación, subestaciones HVDC o cualquier otro equipo capaz de una regulación rápida de la corriente reactiva.

3.5. Capacidad de permanecer conectado durante la falla (FRT)

Se espera que las plantas generadoras permanezcan conectadas a los voltajes del sistema dentro de una gama de voltaje definida y no tener un efecto nocivo en la habilidad de las TSO o DSO para mantener el voltaje del sistema dentro de esa gama. Deben permanecer en servicio bajo condiciones normales de operación o perturbaciones del sistema y, durante las excursiones de voltaje y frecuencia asociadas con las fallas de corto circuito del sistema.

La inhabilidad de la planta generadora para permanecer conectado durante una falla podría resultar en la desconexión de grandes cantidades de generación y posiblemente el colapso del sistema. La capacidad de FRT de la generación de permanecer conectada durante las perturbaciones en el sistema de potencia es crítica para la seguridad del sistema de potencia, la estabilidad del sistema y, es uno de los requerimientos más desafiantes en los códigos de redes. Muchos códigos de redes han introducido la capacidad de FRT para manejar el impacto de los cambios en las mezclas de generación conectadas a sus redes.

La capacidad de FRT de las plantas generadoras depende de la tecnología del generador y las características del diseño y control. Para cumplir con los requerimientos de FRT, ciertas tecnologías de generación pueden necesitar capacidades adicionales de control de voltaje dinámico integrado o externo.

3.5.1 Capacidad de permanecer conectado a bajo voltaje (LVRT)

La capacidad LVRT se refiere a la habilidad de una planta de generación de permanecer conectada al sistema de energía eléctrica y operar por una cierta cantidad de tiempo por periodos de bajo voltaje en el punto de conexión (caídas de voltaje, bajo voltaje o interrupciones). Inyectar suficiente potencia reactiva puede garantizar una operación ininterrumpida de la planta generadora, evitando la inestabilidad del voltaje. Esto puede hacerse con bancos de capacitores o soluciones de electrónica de potencia como STATCOM, SVC y BESS.

3.5.2 Capacidad de permanecer conectado a alto voltaje (HVRT)

La capacidad HVRT se refiere a la habilidad de una planta generadora de continuar conectada al sistema de energía eléctrica y operar por un cierto tiempo por periodos de alto voltaje en el punto de conexión (oleadas o sobrevoltajes). El absorber suficiente potencia reactiva puede garantizar una operación ininterrumpida de la planta generadora, evitando la inestabilidad del voltaje. Esto se puede lograr con bancos de reactores en derivación o soluciones electrónicas de potencia como STATCOM, SVC, TSR y BESS.

4. Respaldo para el restablecimiento del sistema

El respaldo para el restablecimiento del sistema se un conjunto de servicios adicionales de la red requeridos para regresar el sistema de energía eléctrica a la operación normal después de un apagón. Desde el punto de vista del generador, incluyen el arranque por el apagón y la capacidad de aislamiento.

4.1. Capacidad de arranque por el apagón

La capacidad de arranque por el apagón se usa en la fase de restablecimiento del sistema de energía

eléctrica y se define como un conjunto de acciones implementadas después de una perturbación con consecuencias a gran escala para llevar el sistema de energía eléctrica del estado de emergencia o apagón total o parcial al normal. El proceso de restablecimiento tiene tres etapas: Re-energización del apagón, gestión de la frecuencia y re-sincronización. La re-energización puede implementarse usando dos estrategias:

* La re-energización de arriba a abajo usando fuentes de voltaje externas cuando la red se re-energiza desde un TSO, empezando desde las líneas de interconexión.

* La re-energización de abajo a arriba basándose en las capacidades de fuentes internas se hace usando el equipo que proporciona la capacidad de controlar el voltaje y velocidad/frecuencia en una red aislada. Tales unidades (como los sistemas de almacenamiento de energía o pequeños generadores diésel) se conocen como que tienen capacidad de arranque por apagón.

La capacidad de arranque por apagón normalmente se considera cuando se diseñan plantas de generación. No todas las plantas de generación tienen, o se requiere que tengan, esta capacidad de arrancar por apagón.

4.2. Capacidad de aislamiento

La operación de aislamiento es la operación independiente de una red (o parte de ella) que después de desconectarse se aísla del sistema interconectado, teniendo cuando menos una planta generadora o sistema HVDC que suministra energía a esta red y controla la frecuencia y el voltaje.

La mayoría de los generadores de corriente no están diseñados para funcionar en condiciones de aislamiento, separados de la red principal. Esto

podría ser un servicio futuro de los generadores, especialmente conectados a las redes de distribución, la habilidad de la operación aislada de la generación distribuida mejoraría la confiabilidad de la red.

En la práctica, la operación de aislamiento se puede llevar a cabo definiendo sub-redes adecuadas, llamadas celdas, donde el suministro de energía dependería totalmente de generadores distribuidos o sistemas de almacenamiento de energía en la celda. Estas celdas garantizarían la disponibilidad de la energía eléctrica a un cierto nivel. Los generadores y sistemas de almacenamiento de energía necesitarían de activarse rápidamente en caso de aislamiento, pudiendo mantener la frecuencia y voltaje estables durante el aislamiento y mantener la impedancia de la red dentro de la gama y simetría de la fase y, la capacidad de manejar las corrientes de falla. También necesitarían poder reconectarse a la red principal cuando estén en sincronía.

5. Mejoramiento en la estabilidad del sistema

5.1. Mejoramiento en la estabilidad del sistema de energía

La estabilidad del sistema de energía es la habilidad de un sistema de energía eléctrica, para una condición de operación inicial dada, de recuperar un estado de equilibrio de la operación después de estar sujeto a una perturbación física, con la mayoría de las variables del sistema acotadas para que prácticamente todo el sistema permanezca intacto. Las perturbaciones del sistema pueden ser de varios tipos como cambios repentinos de la carga, el cortocircuito repentino entre la línea y la tierra, falla entre líneas, fallas de las tres líneas, conmutación, etc.

Para mejorar la estabilidad del sistema de energía,

con máquinas síncronas se pueden instalar estabilizadores del sistema, pero su confiabilidad es solo efectiva para perturbaciones pequeñas alrededor del punto de operación. Debido a su rápido tiempo de respuesta, las soluciones electrónicas de energía como los compensadores en serie controlados por tiristor (TCSC), BESS, SVC, STATCOM y los compensadores en serie síncronos estáticos (SSSC), comúnmente se usan para mejorar la estabilidad.

5.1.1 Mejoramiento en la estabilidad del ángulo del rotor

La estabilidad del ángulo del rotor se refiere a la habilidad de las máquinas síncronas de un sistema de energía interconectado de permanecer en sincronía después de haber estado sujetas a una perturbación. Depende de la habilidad de mantener/restablecer el equilibrio entre el par electromagnético y el mecánico de cada máquina síncrona en el sistema. La inestabilidad que pueda resultar ocurre en la forma de oscilaciones angulares en aumento de algunos generadores llevando a su pérdida de sincronismo con otros generadores.

5.1.2 Mejoramiento en la estabilidad de la frecuencia

La estabilidad de la frecuencia se refiere a la habilidad de un sistema de energía de mantener una frecuencia estable enseguida de una alteración grave del sistema resultando en un significativo desbalanceo entre la generación y la carga. Depende en la habilidad para mantener o restablecer el equilibrio entre la generación y la carga, con un mínimo de pérdida no intencional de la carga. La inestabilidad que pueda resultar ocurre en la forma de oscilaciones sostenidas de la frecuencia llevando al disparo de las unidades de generación y/o las cargas.

5.1.3 Mejoramiento en la estabilidad del voltaje

La estabilidad del voltaje se refiere a la habilidad de un sistema de potencia de mantener voltajes

estables en todos los colectores después de estar sujetos a una perturbación desde una condición de operación inicial dada. Depende en la habilidad para mantener o restablecer el equilibrio entre la demanda de la carga y la del suministro. La inestabilidad del voltaje puede ocurrir en la forma de una caída o elevación de los voltajes en algunos colectores. Un posible resultado es la pérdida de la carga en un área o el disparo de las líneas de transmisión y otros elementos por sus sistemas de protección llevando a interrupciones en cascada.

5.2. Aumento en la capacidad de transferencia de energía

El aumento de la capacidad en la transferencia de energía se refiere a cuánto se puede mejorar la transferencia de energía entre las áreas interconectadas antes que se comprometa la seguridad del sistema. La capacidad en la transferencia de energía de un sistema está influenciada por:

- Límite de estabilidad: Depende de la clase de voltaje, la longitud de la línea y la configuración de la red del sistema de potencia.
- Límite térmico: Depende del tipo de conductor, sus características de la flecha de tensión, temperatura máxima permisible del conductor, temperatura ambiente, etc.

La capacidad de transferencia de energía de un sistema de transmisión o distribución se puede aumentar se puede aumentar por medio de:

- Mejoramiento de los límites de estabilidad con soluciones de electrónica de energía como capacitores en serie, SVC, STATCOM, TSC, TSR, etc. Mejoran la capacidad de transferencia de energía proporcionando el respaldo adecuado de potencia reactiva así como la reducción en la reactancia de la línea.

- Aumento de los límites térmicos con la aumentando la corriente del sistema, escogiendo un conductor de alta capacidad térmica o múltiples líneas conductoras.

También se pueden usar sistemas de almacenamiento de energía para aumentar la capacidad de transferencia de potencia de un sistema, ya que pueden estabilizar el voltaje y frecuencia del sistema para continuar la exportación de potencia maximizando el uso de la capacidad disponible de transferencia de energía de la línea de transmisión o distribución.

5.3. Amortiguamiento de la oscilación de la energía (POD)

Las oscilaciones electromecánicas de generadores rotativos debido a la falla de los sistemas, conmutación de la línea de transmisión, cambio repentino en la energía de los generadores y el cambio repentino de las cargas críticas causan la oscilación de la energía. La variación de la potencia puede ser grande durante las oscilaciones de ésta y pueden limitar su flujo, causar desgaste mecánico de los sistemas de generación de energía y problemas en la calidad de ésta.

Debido a la característica resistiva muy baja de la línea, la habilidad del amortiguamiento de la oscilación del sistema de transmisión y distribución es muy bajo. Las soluciones electrónicas de potencia se pueden usar para el amortiguamiento de la oscilación de la potencia:

- * Dispositivos conectados en serie incluyendo una fuente variable y compensadores en serie de impedancia variable como TCSC y SSSC.
- * Dispositivos conectados en derivación como SVC, STATCOM y BESS que proporcionan el control dinámico del voltaje del sistema

controlando la velocidad de la máquina rotatoria.

5.4. Amortiguación de la resonancia subsincrónica

El uso de capacitores en serie fijos para el mejoramiento en la capacidad de transferir energía en las redes eléctricas puede causar interacciones entre los generadores de turbina y estas redes compensadas en serie causando resonancia subsincrónica (SSR) lo cual lleva a oscilaciones adversas afectando electromecánicamente a los generadores. Debido a un cambio de topología o impedancia de la red compensada, la resonancia eléctrica puede concordar con la resonancia mecánica en la flecha de los generadores. Tal resonancia puede aumentar la oscilación torsional creando el riesgo de la fatiga y daño al ensamble de la flecha del rotor de los conjuntos generadores de turbina y finalmente destruir toda la flecha.

Se pueden usar varias técnicas y dispositivos para el amortiguamiento de la SSR incluyendo estabilizadores del sistema de potencia y soluciones de electrónica de potencia como SSSC, TCSC, UPFC, STATCOM, SVC y BESS.

5.5. Conservación de la capacidad

Para conservar la integridad de la red eléctrica y garantizar la calidad de la energía, resultado de los generadores, voltaje y frecuencia de redes deben constantemente conservarse a niveles especificados.

Con fuentes renovables altamente variables e intermitentes como las plantas de energía solar y parques eólicos, la habilidad de conservar estos niveles se puede comprometer al pasar las nubes, cambios en la velocidad del viento o grietas en los tableros PV. Estos incidentes pueden causar una rápida fluctuación de la energía producida y desviaciones en voltaje y frecuencia, causando

inestabilidad y perturbaciones en la operación del sistema. La aptitud para la conservación de la capacidad se usa por varias razones:

- * Estabilizar, suavizar y amortiguar el resultado de las plantas de generación renovables para asegurar que se mantengan los niveles correctos de frecuencia y voltaje.
- * Asegurarse que el resultado de potencia aumente y disminuya a un índice especificado por los operadores de las redes (respaldo al aumento/disminución) para garantizar una generación muy constante y satisfacer la demanda de carga en tiempo real.
- * Permitir que el resultado de la potencia de las plantas de generación renovables sea más consistente proporcionando la energía cuando el resultado caiga temporalmente.

La conservación de la capacidad es una aplicación importante para los sistemas de almacenamiento de energía y especialmente valiosos cuando ocurre una demanda pico. La implementación de sistemas de almacenamiento de energía también evita la necesidad de que las TSO y DSO compren o creen generación distribuable adicional o actualizar el equipo de transmisión y distribución.

6. Manejo del suministro de energía

6.1. Rasurado de picos

El rasurado de picos se refiere a nivelar los picos en el uso de la electricidad (principalmente por consumidores industriales y comerciales con cargas altamente variables), reduciendo la demanda de los picos. Con el rasurado de picos, los consumidores reducen el consumo de energía rápidamente por un periodo corto evitando los repuntes en el consumo. El rasurado de picos se puede hacer rebajando temporalmente la

producción, activando un sistema de generación in situ o usando sistemas de almacenamiento de energía. Los principales beneficios son:

- * Los consumidores ahorran en el recibo de electricidad reduciendo los cargos por demanda de pico y/o reduciendo la energía contratada.
- * Las instalaciones eléctricas pueden reducir los costos de operación de generar energía durante los periodos de picos y evitar la inversión de plantas de energía complementarias.

Los sistemas de almacenamiento de energía son idealmente adecuados para servir como activos de rasurado de picos ya que pueden suministrar y absorber energía activa en tiempo real cuando se necesita, suministrándole a los picos de una carga variable y quitando la necesidad de poner en línea una nueva fuente de generación para cubrir una demanda de poco tiempo.

A los sistemas de almacenamiento de energía se les puede ordenar que carguen durante las horas sin picos (cuando los costos de energía son bajos). En tales casos el beneficio del rasurado de picos es doble; al reducir tanto el cargo de la energía y el costo de la misma.

La capacidad para rasurar los picos puede ser particularmente benéfica en micro-redes, donde el costoso arranque de generadores de combustible fósil se puede evitar proporcionando la energía extra de un sistema de almacenamiento de ésta durante la demanda del pico.

6.2. Nivelación de la carga

La meta de la nivelación de la carga es la de aplanar el perfil de ésta durante un cierto periodo en lugar de solo quitar los picos en la carga. Esto puede hacerse con capacidad de generación extra, reduciendo la demanda de la carga y/o usando

sistemas de almacenamiento de energía. Los beneficios de la nivelación de la carga son:

- * Posponer las inversiones en las actualizaciones de las redes eléctricas o en nueva capacidad de generación.
- * Los grandes consumidores que pueden mantener un perfil de carga plano le ayudan a las TSO y DSO ya que pueden determinar más eficientemente su despacho económico.
- * Reducir la congestión en el sistema de energía eléctrica.
- * Se pueden obtener beneficios económicos en la operación bajo un esquema de precios de electricidad dinámicos.

Los sistemas de almacenamiento de energía pueden proporcionar capacidades de nivelación de carga almacenando energía durante periodos de carga ligera en el sistema y entregándola durante periodos de alta demanda. Esto ayuda a balancear la demanda de la carga, reduciendo la carga de las redes, evitando el uso de plantas de generación menos económicas y, reduciendo el esfuerzo en el nivel del sistema en general.

La capacidad de nivelación de la carga de los sistemas de almacenamiento de energía son una función importante en el diseño de las micro-redes. Son útiles para reducir la influencia de la variación de la carga y para bajar los costos de la micro-red.

6.3. Desviación de la carga

La desviación de la carga es una forma de manejo de la misma, usada principalmente en las instalaciones eléctricas. Involucra desplazar el consumo eléctrico de las cargas a diferentes tiempos a cierta hora o día. No lleva a la reducción de la cantidad neta de energía consumida,

sencillamente involucra cambiar la hora cuando se consume la electricidad en lugar de cuanta electricidad se utiliza. La desviación de la carga altera el patrón de consumo energía. Por lo tanto, el consumo de energía en horas pico se cambia a los periodos cuando hay menos actividad.

En áreas con alta penetración de generación renovable, las TSO y DSO pudieran tener problemas de adecuación del recurso si la demanda y la generación están desbalanceados. Esto es donde los sistemas de almacenamiento de energía acoplados con la generación renovable pueden ayudar a mantener la integridad de las redes proporcionando capacidades de desviación de la carga. Se pueden cargar cuando la generación es más alta que la demanda y descargarse cuando la demanda empieza a repuntar. Esto también puede ayudar a reducir los costos de la energía del usuario final, ya que pueden cargarse con energía de bajo costo y descargarse cuando los precios de energía son altos.

En instalaciones de menor escala, micro-redes o edificios, los sistemas de almacenamiento de energía ofrecen muchas ventajas cuando se usan junto con sistemas PV solares, facilitando el auto-consumo y la auto-suficiencia. Para lograr esto, la desalineación ente el perfil de energía solar diario y la demanda de la instalación debe salvarse agregando la capacidad de almacenamiento de energía al sistema PV solar.

7. Mejoramiento de la calidad de la energía

7.1. Problemas de la calidad de la energía

Una mala calidad de la energía puede causar innumerables problemas en cualquier instalación conectada a una red eléctrica. La instalación puede ser una planta de generación de electricidad (renovable o no), un consumidor (carga) u otra red

eléctrica (red de transmisión, distribución o micro).

Los problemas de calidad de la energía (eventos o perturbaciones se pueden clasificar de acuerdo a la naturaleza de la distorsión de forma de onda. Pueden ser de estado estable o no. Los problemas de estado estable se pueden describir aún más por la amplitud, frecuencia, espectro, modulación, impedancia de la fuente, atributos de la profundidad y área del grado.

Los problemas de estado no estable se pueden describir aún más por otros atributos como el índice de elevación, índice de incidencia y potencial de la energía.

Categoría	Duración	Magnitud del voltaje
Distorsiones de la forma de onda		
Compensación DC	Estado estable	0 – 0.01%
Armónicas	Estado estable	0 – 20%
Interarmónicas	Estado estable	0 – 2%
Graduación	Estado estable	
Ruido	Estado estable	0 – 1%
Variaciones de corta duración		
Caída de voltaje (inst.)	0.5 - 30 ciclos	0.1 - 0.9 pu
Caída de voltaje (moment.)	30 ciclos - 3 s	0.1 - 0.9 pu
Caída de voltaje (temp.)	3 s - 60 s	1.1 - 0.9 pu
Onda de voltaje (inst.)	0.5 - 30 ciclos	1.1 - 1.8 pu
Onda de voltaje (moment.)	30 ciclos - 3 s	1.1 - 1.4 pu
Onda de voltaje (temp.)	3 s - 60 s	1.1 - 1.2 pu
Interrupciones (moment.)	0.5 ciclos - 3 s	<0.1 pu
Interrupciones (temp.)	3 s - 60 s	<0.1 pu
Variaciones de larga duración		
Subvoltajes	>60 s	0.8 - 0.9 pu
Sobrevoltajes	>60 s	1.1 - 1.2 pu
Interrupciones sostenidas	>60 s	0.0 pu
Transitorias		
Transit. Impulsiv. (nanoseg)	<50 ns	
Transit. Impulsiv. (microseg)	50 ns - 1 ms	
Transit. Impulsiv. (miliseg)	>1 ms	
Transit. Oscilat. (baja frec.)	0.3 - 50 ms	0 - 4 pu
Transit. Oscil. (media frec.)	20 μ s	0 - 8 pu
Transit. Oscil. (alta frec.)	5 μ s	0 - 4 pu
Otros problemas de calidad de la energía		
Desbalanceo de voltaje	Estado estable	0.5 - 2 %
Fluctuac. de voltaje (interm.)	Intermitente	0.1 - 7 %
Variación de frec. energía	<10 s	
Bajo factor de potencia (atrasado o adelantado)	Intermitente	

Tabla 3: Problemas de la calidad de la energía

7.2. Soluciones para los problemas de calidad de la energía

Existen varias soluciones que se pueden aplicar una vez que el problema de la calidad de la energía y su magnitud se identifican. Estas soluciones ofrecen diferentes niveles de mitigación del problema dependiendo de su complejidad técnica y de la inversión financiera. Las soluciones para el mejoramiento de la calidad de la energía se pueden aplicar para resolver la mayoría de los problemas de ésta que los clientes pudieran enfrentar.

Las soluciones para el mejoramiento de la calidad de la energía se pueden dividir en convencionales como los bancos de capacitores conmutados con contactor o interruptor, bancos de reactor en derivación y filtros de armónicas pasivos y soluciones modernas de electrónica de potencia los filtros de armónica activos, generadores VAR estáticos, SVC, STATCOM, compensadores VAR híbridos (HVC) y BESS.

8. Soluciones a los requerimientos del Código de Redes

8.1. Posibles soluciones

Los códigos de redes definen los requerimientos que las instalaciones (generadores, consumidores y redes) tienen que acatar para lograr el cumplimiento con el código de red. El acatamiento se puede satisfacer con generadores conectados, cargas controlables, soluciones convencionales de mejoramiento de la calidad de la energía y/o soluciones modernas de electrónica de potencia.

8.2. Soluciones con electrónica de potencia

Existe una amplia gama de soluciones electrónicas de potencia que pueden resolver en tiempo real

cualquier requerimiento del código de redes que pudiera aparecer en sistemas de energía eléctrica en bajo y alto voltaje.

Filtros de energía activa	Filtros de armónica activa (AHF). Generadores VAR estáticos (SVG). Balanceadores de carga activa (ALB). Compensadores VAR híbridos (HVC).
Compensadores estáticos	Condensadores sincrónicos estáticos (STATCOM). STATCOM híbridos. Compensadores VAR estáticos (SVC). Reactores conmutados por tiristor (TSR). Reactores controlados por tiristor (TCR).
Dispositivos basados en almacenamiento de energía	Sistemas de calidad de energía ininterrumpidos (UPQ). Sistemas de almacenamiento de energía de batería (BESS).
Sistemas de energía híbridos	Sistemas de energía híbridos en redes (HPS en redes). Sistemas de energía híbridos fuera de redes (HPS fuera de redes).

Tabla 4: Soluciones electrónicas de potencia para los requerimientos del código de redes

9. Conclusiones

Los códigos de red presentan los requerimientos técnicos para los servicios y capacidades de los generadores, consumidores o redes eléctricas. Incluyen los servicios necesarios adicionales de redes, capacidades para la estabilidad del sistema y manejo de la energía y, las capacidades de mejoramiento de la calidad de la energía que las instalaciones tienen que acatar para lograr el cumplimiento con el código de redes y respaldar el sistema de energía eléctrica.

Las soluciones electrónicas de potencia pueden proporcionar los servicios y capacidades necesarios para el acatamiento del código de redes. Hacen posible adaptar en tiempo real la generación y consumo para que acate los códigos de redes y, se usa el almacenamiento de energía, para que sea predecible, confiable y disponible en el tiempo más rentable.

	AHF	SVG	ALB	HVC	SVC	STATCOM	Hybrid STATCOM	TSR	TCR	UPQ system	BESS	On-grid HPS	Off-grid HPS
Respaldo para la frecuencia													
Reserva de contención de frecuencia													
Reserva de restablecimiento de frec. auto.													
Reserva de restablecimiento de frec. man.													
Control de energía activa													
Control de índice de variación													
Seguimiento de la carga													
Respaldo de voltaje													
Control de voltaje													
Control de potencia reactiva													
Control de factor de potencia													
Cap. de inyección de corr. reactiva rápida													
Cap. de permanencia en bajo voltaje													
Cap. de permanencia en alto voltaje													
Respaldo para restabl. del sistema													
Capacidad arranque de apagón													
Capacidad de aislamiento													

Tabla 5: Soluciones electrónicas de energía aplicadas a los servicios adicionales de redes: Solución primaria (verde) y secundaria (amarilla).

	AHF	SVG	ALB	HVC	SVC	STATCOM	Hybrid STATCOM	TSR	TCR	UPQ system	BESS	On-grid HPS	Off-grid HPS
Mejoramiento de estabilidad del sistema													
Mejoram. de estabilidad del ángulo de rotor													
Mejoram. de estabilidad de la frecuencia													
Mejoram. de estabilidad del voltaje													
Aumento cap. de transferencia de energía													
Amortiguación de oscil. de energía (POD)													
Amortiguación de resonancia sincrónica													
Reforzamiento de la capacidad													
Manejo del suministro de energía													
Rasurado de pico													
Nivelación de la carga													
Cambio de la carga													

Tabla 6: Soluciones electrónicas de energía aplicadas a la estabilidad del sistema y manejo de energía: Solución primaria (verde) y secundaria (amarilla).

	AHF	SVG	ALB	HVC	SVC	STATCOM	Hybrid STATCOM	TSR	TCR	UPQ system	BESS	On-grid HPS	Off-grid HPS
Distorsiones de la forma de onda													
Armónicas													
Interarmónicas													
Impulsos													
Variaciones de corta duración													
Falla de voltaje													
Fluctuación de voltaje													
Interrupciones													
Variaciones de larga duración													
Sub-voltajes													
Sobre-voltaje													
Interrupciones sostenidas													
Transitorias													
Transitorias impulsivas													
Transitorias oscilatorias													
Otros problemas de calidad de energía													
Desbalanceo de voltaje													
Fluctuaciones de voltaje (parpadeo)													
Variaciones de frecuencia de potencia													
Bajo factor de potencia (atrasado o adel.)													

Tabla 7: soluciones electrónicas de energía aplicadas a los problemas de calidad de la energía: Solución primaria (verde) y secundaria (amarilla).

10. Referencias

ENSTO-E. (2019). Códigos de red. Recuperado 15 de julio, 2019, del sitio en la red ENSTO-E: https://www.entsoe.eu/network_codes/

IEEE/CIGRE. (2004). Definición y Clasificación de la Estabilidad del Sistema de Energía. Transacciones IEEE en sistemas de energía (p. 1387 - 1401). Joint Task Force on Stability Terms and Definitions. Recuperada 25 de Agosto de 2019.

IRENA. (2016). Ampliar la energía renovable variable: El papel de los códigos de red. Recuperada 15 de julio de 2019.

Next Kraftwerke. (2019). ¿Qué es el código de red? Recuperada 15 de julio de 2019, del sitio en red de Next Kraftwerke: <https://www.next-kraftwerke.com/knowledge/what-is-the-grid-code>

REserviceS. (2012). Servicios complementarios: especificaciones técnicas, necesidades y costos del sistema. REserviceS Consortium. Recuperada 8 de julio de 2019.