



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



**DESARROLLO DE UN ALGORITMO AUTÓNOMO PARA  
LA MEJORA DEL APROVECHAMIENTO DEL  
CONVERTIDOR DC/AC Y LA OPTIMIZACIÓN DE LA  
POTENCIA APARENTE EFECTIVA EN SISTEMAS DE  
GENERACIÓN DISTRIBUIDA CONECTADOS A REDES  
ELÉCTRICAS TRIFÁSICAS CON NEUTRO**

**Autor: Carmen Marina Muro Tuesta**

**Tutor: Dr. D. Salvador Orts Grau**

Trabajo Fin de Máster presentado en el Departamento de Ingeniería Electrónica de la Universitat Politècnica de València para la obtención del Título de Máster Universitario en Ingeniería de Sistemas Electrónicos

Curso 2020-21

Valencia, marzo de 2021



*“En memoria de mi querido tío Hugo Marcial Tuesta Cabrera quien siempre me alentó a superarme profesionalmente y que falleció víctima de la epidemia de COVID-19, que en paz descansa”.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Con todo mi corazón a mi madre María Rosa por su apoyo incondicional y sobre todo por sus sabios consejos; a mi padre Luis Donal por siempre preocuparse por mi y estar orgulloso de mis logros.

A mi hermano Julio por alentarme a culminar mi trabajo de fin de máster.

Agradecer de manera especial y sincera al Dr. Salvador Orts, quien fue un apoyo fundamental para la realización del presente trabajo, por sus invaluable enseñanzas y guía.

Gracias.

## RESUMEN

El presente trabajo toma como referente el funcionamiento de un convertidor DC/AC conectado en paralelo a redes de distribución eléctrica en sistemas de generación distribuida. Donde la potencia activa generada por el convertidor DC/AC es entregada al punto de conexión a red (PCC) y esta será absorbida por la carga de acuerdo con sus requerimientos. En el caso que la potencia activa fundamental de secuencia positiva que requiere la carga sea menor que la potencia activa generada por el convertidor DC/AC, la potencia activa fundamental de secuencia positiva remanente será absorbida por la red eléctrica.

Debido a que las fuentes de generación son fuentes de energías renovables y dependen generalmente de las condiciones climatológicas estas no funcionan las 24 horas al 100%, desaprovechando el uso de la potencia aparente nominal del convertidor DC/AC.

Por ese motivo se busca la manera de mejorar el aprovechamiento del convertidor, pudiéndose utilizar como un compensador de ineficiencias tal como lo refieren múltiples estudios. Esto es de gran utilidad ya que en la actualidad las redes de distribución eléctrica presentan altas ineficiencias debido al tipo de equipos que se conectan y generan desequilibrio de corrientes y tensiones, desfase de corriente y distorsión armónica, afectando al resto de instalaciones conectadas y disminuyendo la calidad del suministro eléctrico. Donde la diferencia entre la potencia activa inyectada por el sistema de generación distribuida y la potencia nominal del convertidor DC/AC es la potencia disponible para la compensación de los fenómenos ineficiente de la carga. Eso quiere decir que la potencia de compensación de ineficiencias puede ser para compensar el 100% o menos de las ineficiencias.

En el caso que haya disponibilidad de potencia en el convertidor para compensar el 100% de las ineficiencias, la red inyectaría únicamente potencia activa fundamental de secuencia positiva a la carga, mostrando unas corrientes de red completamente senoidales.

En el caso que no se pueda compensar el 100% de las ineficiencias, se aplicaría una compensación selectiva en donde se debe ponderar las potencias ineficientes y de acuerdo, con la potencia disponible del convertidor se compensarán parcialmente cada una de las potencias ineficientes. Dando como resultado que la red inyecte o no potencia activa, además de la potencia no eficiente que falte por aportar a la carga.

Con estas 2 aplicaciones operando en simultáneo se dice, que el convertidor DC/AC está operando en modo híbrido de generación -compensación.

La identificación de cada una de las potencias se basa en el IEEE Std. 1459-2010. en función de las corrientes y tensiones medidos en el punto de conexión a red.

Según esta descripción se plantea y evalúa un algoritmo de simulación para la mejora del aprovechamiento del convertidor DC/AC y la optimización de la potencia aparente efectiva conectado a sistemas de generación distribuida.

Finalmente se somete el algoritmo a simulación y se presentan los resultados del sistema híbrido de generación -compensación para una misma carga que contenga armónicos, desbalance y desequilibrio; bajo diferentes configuraciones de corriente máxima del convertidor y corriente generada por el modelo del sistema de generación de energías renovables.

## RESUM

El present treball presa com a referent el funcionament d'un convertidor DC/AC connectat en paral·lel a xarxes de distribució elèctrica en sistemes de generació distribuïda. On la potència activa generada pel convertidor DC/AC és entregada al punt de connexió a xarxa i aquesta serà absorbida per la càrrega d'acord amb els seus requeriments. En el cas que la potència activa fonamental de seqüència positiva que requereix la càrrega siga menor que la potència activa generada pel convertidor DC/AC, la potència activa fonamental de seqüència positiva romanent serà absorbida per la xarxa elèctrica.

Pel fet que les fonts de generació són fonts d'energies renovables i depenen generalment de les condicions climatològiques aquestes no funcionen les 24 hores al 100%, desaprofitant l'ús de la potència aparent nominal del convertidor DC/AC.

Per aqueix motiu es busca la manera de millorar l'aprofitament del convertidor, podent-se utilitzar com un compensador d'ineficiències tal com el refereixen múltiples estudis. Això és de gran utilitat ja que en l'actualitat les xarxes de distribució elèctrica presenten altes inefficiències a causa de la mena d'equips que es connecten i generen desequilibri de corrents i tensions, desfasament de corrent i distorsió harmònica, afectant la resta d'instal·lacions connectades i disminuint la qualitat del subministrament elèctric. On la diferència entre la potència activa injectada pel sistema de generació distribuïda i la potència nominal del convertidor DC/AC és la potència disponible per a la compensació dels fenòmens ineficient de la càrrega. Això vol dir que la potència de compensació d'ineficiències pot ser per a compensar el 100% o menys de les inefficiències.

En el cas que hi haja disponibilitat de potència en el convertidor per a compensar el 100% de les inefficiències, la xarxa bé podria o no injectar només potència activa fonamental de seqüència positiva a la càrrega, mostrant uns corrents de xarxa completament \*senoidales.

En el cas que no es puga compensar el 100% de les inefficiències, s'aplicaria una compensació selectiva on s'ha de ponderar les potències ineficients i d'acord amb la potència disponible del convertidor es compensaran parcialment cadascuna de les potències ineficients. Donant com a resultat que la xarxa injecte o no potència activa, a més de la potència no eficient que falte absorbir la càrrega.

Amb aquestes 2 aplicacions operant en simultani es diu que el convertidor DC/AC està operant en manera híbrida de generació -compensació.

La identificació de cadascuna de les potències es basa en el \*IEEE \*Std. 1459-2010. en funció dels corrents i tensions mesurats en el punt de connexió a xarxa.

Segons aquesta descripció es planteja i avalua un algorisme de simulació per a la millora de l'aprofitament del convertidor DC/AC i l'optimització de la potència aparent efectiva connectat a sistemes de generació distribuïda.

Finalment se sotmet l'algorisme a simulació i es presenten els resultats del sistema híbrid de generació -compensació per a una mateixa càrrega que continga harmònics, \*desbalance i desequilibri; sota diferents configuracions de corrent màxim del convertidor i corrent generada pel model del sistema de generació d'energies renovables.

## **ABSTRACT**

This work is based on the operation of DC/AC converters connected to electrical distribution networks in distributed generation systems. The generated active power is delivered to the grid through the DC/AC converter. This power can be absorbed by the loads connected downstream to the converter connection point or even delivered to the grid if the power exceeds the load requirements.

When the generation sources are renewable energy sources, and due to their dependency on weather conditions, they do not operate 24 hours a day at rated power, wasting the use of the DC/AC converter capability.

For this reason, a way to improve the use of the converter is to make it work as a power compensator, as reported in several studies. This is of great utility since the electrical distribution networks are not fully efficient due to the presence of current and voltage unbalance, current phase shift and harmonic distortion. These kind of phenomena could affect the rest of the connected installations, reducing the quality of the electrical power supply. The difference between the active power injected by the distributed generation system and the nominal power of the DC/AC converter will be the power available for the compensation of these inefficient phenomena, that might be fully compensated or not depending on this available power.

In the case that there is enough power available in the converter to compensate 100% of the inefficiencies, the network will show fully sinusoidal network currents, meaning that only active power is being delivered or absorbed by the distribution network.

When full compensation is not possible, a selective compensation would be applied. Selective compensation will be done by weighting the inefficient powers to perform a partial compensation. As a result, the grid will inject or not active power, in addition to the inefficient powers that may not be compensated by the converter.

This dual operating mode can be named hybrid generation-compensation mode.

The identification and quantification of the inefficient phenomena is based on IEEE Std. 1459-2010.

According to this description, an algorithm for the improvement of the DC/AC converter utilization through the optimization of the effective apparent power is proposed and evaluated by simulation. The results of the hybrid generation-compensation system are presented for the same load containing harmonics, unbalance and imbalance; under different configurations of maximum current of the power converter and different generated power values from the renewable energy generation system.

## ÍNDICE GENERAL

Capítulo 1 .....	7
1. Introducción.....	7
1.1. Sistema de distribución de energía eléctrica .....	8
1.2. Sistemas eléctricos trifásicos .....	8
1.3. Ineficiencias en la red eléctrica .....	9
1.4. Causas y efectos de la distorsión armónica en los sistemas eléctricos .....	9
1.5. Causas y efectos de los desequilibrios de tensiones de excitación y cargas en los sistemas eléctricos .....	10
1.6. Causas y efectos de desfase de corrientes y tensiones en los sistemas eléctricos.....	11
Capítulo 2 .....	13
2. Teorías de la potencia eléctrica .....	13
2.1. Teoría de la potencia del IEEE Std. 1459-2010.....	14
2.2. Teoría de la potencia eléctrica del IEEE Std. 1459-2010 en sistemas trifásicos:.....	14
2.2.1. Sistema trifásico lineal y equilibrado:.....	17
2.2.2. Sistema trifásico lineal, con tensiones asimétricas y corrientes desequilibradas.....	19
2.2.3. Sistema trifásico no lineal con tensiones asimétricas y corrientes desequilibradas.....	22
2.3. Convertidores de potencia DC/AC en sistemas trifásicos a cuatro hilos.....	27
2.4. Estrategias para la compensación de potencia no eficiente por el SAPC.....	31
2.4.1. Flujo de potencias e identificación de corrientes de referencia para la compensación de fenómenos no eficientes.....	33
2.4.2. Corriente de compensación para SAPC con estrategia de compensación selectiva y generación de potencia activa.....	38
Capítulo 3 .....	40
3. Sistema propuesto .....	40
3.1. Algoritmo para realizar el escalado de las corrientes de compensación usando la estrategia de equilibrado de potencias.....	48
Capítulo 4 .....	54
4. Resultados de simulación .....	54
4.1. Condiciones de alimentación .....	54



4.1.1.	Simulación del modelo del SAPC con carga trifásica no lineal, desequilibrada y reactiva, efectuando compensación global sin aporte de energía en el bus DC del convertidor .....	55
4.1.2.	Simulación del modelo del SAPC con carga trifásica no lineal, desequilibrada y reactiva, efectuando compensación selectiva sin aporte de energía en el bus DC del convertidor : Caso 1 ..	62
4.1.3.	Simulación del modelo del SAPC con carga trifásica no lineal, desequilibrada y reactiva efectuando, compensación selectiva sin aporte de energía en el bus DC del convertidor : Caso 2 ..	67
4.1.4.	Simulación del modelo del SAPC con carga trifásica no lineal, desequilibrada y reactiva, efectuando compensación selectiva sin aporte de energía en el bus DC del convertidor : Caso 3 ..	72
4.1.5.	Simulación del modelo del SAPC en modo híbrido de generación y compensación con carga trifásica no lineal, desequilibrada y reactiva, con aporte de energía en el bus DC del convertidor .....	78
4.1.5.1.	Simulación del modelo del SAPC en modo híbrido de generación y compensación: Prueba 1.....	78
4.1.5.2.	Simulación del modelo del SAPC en modo híbrido de generación y compensación: Prueba 2.....	82
4.1.5.3.	Simulación del modelo del SAPC en modo híbrido de generación y compensación: Prueba 3.....	86
Capítulo 5	.....	90
5.	Conclusiones de la simulación y propuesta de actividades a desarrollar en el futuro .....	90
5.1.	Conclusiones de la simulación .....	90
5.2.	Propuesta de actividades a desarrollar en el futuro .....	91
Capítulo 6	.....	92
6.	Bibliografía.....	92

## MOTIVACIÓN, OBJETIVOS Y SUMARIO DEL TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

### Motivación

Ante el dilema de encontrar la manera de desarrollar un sistema que necesite menos recursos contaminantes para producir energía eléctrica, hace pensar en la forma de impulsar la implementación de sistemas de generación basados en energías renovables. Para tal fin se buscó gran cantidad de información de diversos autores tales como [2], [5],[25], [27], [30], [33] entre otros ,surgiendo así la idea de que la mejor manera de emplear menos recursos para producir energía eléctrica es haciendo más eficientes los sistemas ya implantados basados en cualquier método de generación, es aquí como se llega al concepto de eficiencia energética, que viene a ser la relación entre los resultados obtenidos y los recursos energéticos utilizados [15].

Dentro del concepto de eficiencia energética se detecta que la mayor parte de equipos conectados actualmente a la red eléctrica son los causantes de generar los fenómenos ineficientes tales como desfase de corriente respecto de la tensión, desequilibrio de corriente producto de las cargas o fuentes desbalanceadas y distorsión armónica de corriente o voltaje producto de las cargas no lineales. Todos estos son los que debemos eliminar o reducir de la red eléctrica buscando su mejor aprovechamiento.

Los estudios de la potencia en sistemas monofásicos y trifásicos con cargas no lineales, desequilibrio y desfase están descritos por Fryze [35], Budeanu [36] y Buchholz [37], sin embargo, han surgido nuevas teorías que están perfeccionando el cálculo de las potencias conforme ha surgido la necesidad de entenderlos en las últimas décadas y basan su desarrollo en la identificación de los componentes de la potencia efectiva aparente  $S$ .

Por otro lado, la potencia efectiva aparente es el concepto en el que se basa la tarificación eléctrica y el desarrollo de nuevos equipos de medición de energía eléctrica, como se mencionó esto estaría bien en redes que no sean afectadas por fenómenos ineficientes en donde se mediría correctamente la potencia útil y se pagaría justamente por el servicio recibido. La tarificación incluye, por una parte, el pago por la energía eficiente consumida y, por otra parte, el pago o recargo por consumo de energías no eficientes que empeoran la calidad del suministro en el sistema eléctrico . Para lograrlo se requiere de equipos de medida convenientemente adaptados que ya están siendo desarrollados . Actualmente en España, el sistema de tarificación eléctrica penaliza el consumo de energía reactiva mediante la instalación de equipos de medida del consumo de potencia reactiva en las instalaciones [2]. Mientras que no existe penalizaciones por la inyección de armónicos a la red.

Uno de los métodos más empleados para la compensación de ineficiencias en redes eléctricas de baja tensión es la conexión en paralelo de un convertidor DC/AC como compensador activo (Shunt Active Power Compensator - SAPC) en la red muy cerca de la instalación que las produce. El objetivo principal del SAPC es la mejora de la calidad del sistema eléctrico, “aguas arriba” del punto de conexión a red.

Como resultado del estudio de la potencia eléctrica bajo condiciones sinusoidales y no sinusoidales, equilibradas y no equilibradas, la IEEE hizo una publicación en el 2010 del IEEE Std. 1459, donde plantea las definiciones de las magnitudes de potencia no activa. Estas definiciones serán de utilidad para estudiar un algoritmo, que en base a las magnitudes de las potencias ineficientes calculadas a partir de las corrientes y tensiones en el punto de conexión a red, controle el convertidor DC/AC para que este sea el encargado de generar las corrientes no eficientes requeridas por las instalaciones y las

inyecte a las cargas, haciendo que esas corrientes que afectan tanto la eficiencia de la red, ya no circulen por el resto de la red hacia otras instalaciones,

Como se tiene el convertidor DC/AC conectado a red, este puede ser aprovechado en la generación de energía proveniente de un sistema de generación de energía renovable. La corriente activa generada por el inversor será aprovechada por la carga según su requerimiento y si aún queda corriente disponible la red la absorberá obteniendo un sistema distribuido de generación de energía.

Resultando el “paquete completo” en pro de desarrollar un algoritmo, que implantado en un sistema real, eleve la eficiencia de la red eléctrica , como se propone en este TFM.

## Objetivo

Utilizar la teoría de potencia, plasmada en el estándar 1459 de la IEEE, para identificar las potencias ineficientes en sistemas eléctricos trifásicos e implementar el control de un convertidor DC/AC de conexión en paralelo a la red eléctrica para que funcione en modo híbrido de generación -compensación de ineficiencias, planteando los siguientes objetivos:

- Determinar las corrientes generadas por una carga no lineal con desequilibrio y componentes reactivas, que identifican a los fenómenos no eficientes que empeoran la calidad de la red eléctrica.
- Diseñar e implementar un algoritmo para controlar un convertidor DC/AC conectado en paralelo a la red eléctrica, que funcione en modo híbrido de generador- compensador, es decir:
  - Que inyecte potencia activa en el punto de conexión a red cuando en el lado del bus de continua se conecte una fuente generadora de energía y mientras no se alcance la totalidad de la capacidad del convertidor de conexión a red.
  - Que funcione como compensador de ineficiencias selectivo. Este compensador, aprovechando la potencia aparente disponible del convertidor deberá permitir la compensación en forma independiente o en cualquier combinación, de los fenómenos de desequilibrio, desfase y distorsión, dependiendo del grado de afectación sobre la red, aumentando la eficiencia energética.
- Verificar el funcionamiento del algoritmo de control del convertidor DC/AC para que funcione en modo híbrido de generación-compensación ante diferentes configuraciones de corriente máxima del convertidor y de la fuente generadora de energía en el bus DC.

## Sumario

El trabajo de fin de máster presenta la siguiente estructura:

En el capítulo 1 se detallan los conceptos de eficiencia energética y sistemas distribuidos de generación de energía. Así como también la descripción de las topologías sobre las cuales se puede aplicar la solución presentada en este trabajo. Finalmente describe los fenómenos ineficientes generados por instalaciones que se sirven de las redes eléctricas, indicando las causas y efectos de dichos fenómenos.

En el capítulo 2 se indican las primeras teorías de la potencia eléctrica sobre las cuales se han desarrollado la teoría de potencia eléctrica del IEEE Std. 1459. Se da una visión general de la teoría potencia eléctrica del IEEE Std. 1459-2010 y su aplicación en sistemas eléctricos trifásicos. Además se describen las definiciones de corrientes, voltajes y potencia eléctrica aplicadas en el estándar bajo condiciones senoidales, no senoidales, balanceadas y desbalanceadas. Se describe el convertidor DC/AC como componente del sistema híbrido de generación- compensación. Asimismo se detalla el flujo de potencias ante la afectación de cada uno de los fenómenos ineficientes en la instalación eléctrica en estudio. Se describen las 2 estrategias de compensación de potencias ineficientes: global o selectiva. Finalmente se plantea la ecuación que caracteriza a la corriente que compensa las ineficiencias producidas.

En el capítulo 3 se describe el sistema propuesto sobre el cual se plantea el algoritmo de control del convertidor DC/AC conectado en paralelo a la red eléctrica para que funcione en modo híbrido de generación- compensador , con el objetivo de obtener el mejor aprovechamiento de la potencia aparente del convertidor. Se detallan los modelos de simulación de los diferentes componentes del SAPC y de la carga. Se muestra el flujograma y detalla la lógica del algoritmo implementado para la captura de valores de corriente y voltaje en el punto de conexión a red del SAPC , cálculo de las potencias eléctricas bajo el IEEE Std. 1459-2010, cálculo del mantenimiento del bus DC del convertidor y selección del grado de compensación de ineficiencias.

En el capítulo 4 se muestran los resultados de la simulación de la aplicación del algoritmo ante diferentes configuraciones del inversor y de la fuente de generación de energía distribuida, donde se detalla el comportamiento de las corrientes, voltajes y potencias, logrando identificar la cantidad de potencia activa que puede ser absorbida por la red eléctrica, los estados de compensación de ineficiencia y la optimización de la potencia aparente efectiva en este tipo de sistemas. Asimismo, se presentan las conclusiones obtenidas producto de las simulaciones del algoritmo.

En el capítulo 5 se encuentran las conclusiones a las que se llegó luego de la ejecución de la simulación y las líneas de trabajo futuras.

Finalmente, el capítulo 6 recoge las referencias utilizadas en el TFM.

# CAPÍTULO 1

## 1. Introducción

Siguiendo el camino hacia la transición energética liderada por la Comisión Europea, plantearon que uno de los objetivos energéticos europeos al 2020 es una mejora del 20% de la eficiencia energética. Ahora los países europeos consumen menos energía que hace 10 años, principalmente gracias al aumento de la eficiencia energética. La eficiencia energética es un término que relaciona al cociente entre el consumo energético de una economía y su producto interior bruto (PIB).[15]

En la Unión Europea, según las políticas de demanda la eficiencia energética es un gran instrumento para mejorar la disponibilidad de una oferta de energía a precios asumibles. La reducción del consumo de energía contribuye a reducir la intensidad energética de la economía y la dependencia exterior. [15]

Según [15] se puede tener un potencial ahorro energético en diferentes sectores:

- Sector de la edificación
- Sector industrial
- Sector de la generación eléctrica
- Sector de las administraciones públicas
- Sector del transporte

El sector de la edificación es uno de los sectores que más energía final consume en toda la Unión Europea, alcanzando un 40% del consumo de energía total. Por lo que supone un gran campo de actuación para mejoras en eficiencia energética.[15]

El sector de generación eléctrica tiene su principal ganancia de eficiencia energética incrementando el papel de las tecnologías más eficientes en el mix de generación. A la fecha, más del 60% de la estructura de generación eléctrica en España es con tecnologías cuya materia prima son energías no renovables. Considerando que las energías renovables tienen una eficiencia de casi el 100%, es sumamente recomendable ponderar su utilización en el mix de generación.

A la fecha España, presenta una dependencia energética del exterior y se refleja en el 41% de la energía eléctrica que es importada de países como Marruecos, Francia y Portugal. Siendo necesaria la utilización de mejoras en los sistemas de generación eléctrica. En la última década los sistemas de generación distribuida basados en energías renovables contribuyen más y más a la producción global de energía. Turbinas de viento tanto como sistemas fotovoltaicos han sido fuentes confiables de generación y deben continuar siendo utilizadas con la finalidad de alcanzar su máxima eficiencia y contribuir a satisfacer la creciente demanda de energía en el mundo.

Otro mecanismo de ganancia de eficiencia energética, es la reducción o eliminación de los efectos nocivos en la red eléctrica originados por cargas no lineales, cargas monofásicas, variadores de frecuencia, etc. conectados a ellas, que generan desequilibrios, corrientes no sinusoidales con distorsión armónica y desfases de las corrientes y tensiones.

Esto conlleva a idear un sistema híbrido que se implemente en múltiples sectores con la finalidad de reducir consumos de energía innecesarios para mejorar la eficiencia energética y apoye en la generación de energía eléctrica, disminuyendo la demanda del sector de la generación eléctrica estándar.

Se puede tomar como ejemplo la iniciativa impulsada en el Reino Unido por el gobierno llamada "Green Deal", donde se pretende facilitar a los dueños de viviendas urbanas y rurales la posibilidad en mejoras de índole energético en sus domicilios, con la finalidad de mejorar la eficiencia energética.

Es de suma importancia definir el ambiente en el cual se va a diseñar e implementar un sistema de mejora, por ello se tiene:

### **1.1. Sistema de distribución de energía eléctrica**

Se denomina sistema de distribución de energía eléctrica al conjunto de equipos (comunicaciones, protecciones, control, etc) que permiten energizar en forma segura y fiable un número determinado de cargas esparcidos en un territorio, en distintos niveles de tensión. También está conformado por las líneas eléctricas de aproximación a los grandes centros de consumo (ciudades o instalaciones industriales de cierta importancia) que vienen de los transformadores ubicados en los centros de transformación y las líneas que van a los usuarios domésticos.

En España, se consideran como instalaciones de distribución de energía eléctrica a las líneas con tensión menor de 220 kV. Las líneas eléctricas tienen una distribución normal para la industria y el uso doméstico en redes trifásicas, sistema de cuatro hilos. Esto da una tensión trifásica de 400 voltios servicio en estrella y una tensión monofásica de 230 voltios. Para los clientes industriales, de 3 fases 690/400 voltios también está disponible. Clientes industriales grandes tienen su propio transformador con 10 kilovoltios hasta 220 kV entrada. Con una señal transmitida de 50Hz en el espectro electromagnético.

La legislación vigente controla que la tensión de alimentación que llega a los consumidores finales esté dentro de los márgenes, sea cual sea la carga demandada, para evitar malfuncionamiento o deterioro de los equipos de los consumidores.

En tal sentido es necesario realizar mejora en el diseño que conduzca a pérdidas bajas en las etapas de generación, transporte, distribución y consumo de energía eléctrica, haciendo prevalecer niveles máximos de seguridad y suministro sin interrupciones.

Actualmente la estructura de los sistemas eléctricos se encuentra atravesando un proceso de cambio favorable ante la necesidad de reducir la complejidad del transporte de la energía desde las plantas de generación a los consumidores que siguen el modelo tradicional de estar centralizadas, frente a esto está la creciente puesta en funcionamiento de pequeñas centrales de generación ubicadas cerca de las áreas de consumo permitiendo acercar producción y consumo, a esto se llama generación distribuida. Cabe resaltar que ambos modelos de generación siguen siendo complementarios para el desarrollo de los sistemas eléctricos de potencia.

Los sistemas de generación distribuida se definen como la tecnología de generación de energía a pequeña escala que se puede conectar directamente a la red del consumidor o a la red de distribución y se generan a partir de fuentes de energía renovables, biomasa o cogeneración.

### **1.2. Sistemas eléctricos trifásicos**

La topología de las redes de distribución para realizar diferentes estudios y análisis en el sistema trifásico estándar es:

- Sistema trifásico a tres hilos (sin neutro)
- Sistema trifásico a 4 hilos (con neutro), donde el neutro del sistema de generación se conecta al punto neutro de la instalación eléctrica del cliente.

En este trabajo se estudiará el sistema trifásico a 4 hilos, ya que es un sistema más general en redes de distribución .

### **1.3. Ineficiencias en la red eléctrica**

La naturaleza de la potencia reactiva, el flujo de energía y las oscilaciones, así como la potencia aparente en sistemas monofásicos y trifásicos son ampliamente discutidas en publicaciones técnicas en general. Sin embargo, después de más de medio siglo se han producido cambios en los equipos que son conectados a la red eléctrica y han generado nuevos fenómenos energéticos.

En régimen permanente cualquier sistema eléctrico genérico, puede presentar los siguientes fenómenos energéticos:

- Transferencia de energía útil o flujo unidireccional de potencia.
- Un flujo bidireccional de potencia, originado por desfases entre corriente y tensión.
- La distorsión armónica, debida a la falta de linealidad en la carga.
- La asimetría en sistemas polifásicos.

Siendo la transferencia de energía útil el único fenómeno eficiente, mientras que los siguientes 3 mencionados corresponden a fenómenos no eficientes.

La identificación y cuantificación de las ineficiencias depende de la teoría de potencia eléctrica que se emplee y que se detalla más adelante.

### **1.4. Causas y efectos de la distorsión armónica en los sistemas eléctricos**

Los armónicos son señales de voltaje o corriente cuyas frecuencias son múltiplos de la frecuencia fundamental y causan una señal de voltaje o corriente no sinusoidal. Son producto del avance de la electrónica, producidos principalmente por cargas no lineales y materiales ferromagnéticos. Las cargas no lineales cambian la naturaleza sinusoidal de la corriente de alimentación AC y consecuentemente alteran la caída de voltaje en la red de suministro, generando a su vez distorsión de corriente en cargas lineales conectadas a la red [18]. Las cargas son no lineales si su energización no requiere de la totalidad de la onda de tensión, sino trozos de esta en cada ciclo, absorbiendo del generador corrientes en impulsos bruscos los cuales generan ondas de corriente distorsionada , que originan a la vez corrientes armónicas que retornan a la red perjudicando a las instalaciones vecinas.

En gran medida las fuentes de armónicos son las cargas no lineales que se encuentran en los usuarios domésticos, de servicios e industriales. Estas cargas no lineales incluyen convertidores electrónicos de potencia, dispositivos magnéticos saturados, controladores de fase AC, ciclo convertidores, rectificadores y en menor grado máquinas rotativas. La emisión de armónicos de corriente de estos dispositivos es variante, dependiendo del control de los dispositivos, características del sistema, etc. Los convertidores estáticos de potencia son las cargas no lineales más grandes y se utilizan en la industria como fuentes de alimentación ininterrumpida. Los usuarios domésticos utilizan equipos monofásicos como las computadoras y equipos de comunicación que son encendidos en gran número al mismo tiempo generando corrientes no sinusoidales que contienen armónicos, ya que cuenta con un diodo rectificador que convierte el voltaje AC en DC. Dichas cargas tienen el potencial de crear una gran cantidad de perturbaciones para la red eléctrica y el usuario final.[32]



El principal efecto de los armónicos de corriente y voltaje en los sistemas eléctricos es el posible aumento de temperatura en los receptores y equipos por la disipación de potencia. En los conductores puede producir el efecto pelicular, que consiste en el aumento de densidad de corriente en la superficie del conductor, produciendo un sobrecalentamiento de los conductores y aumentando las pérdidas. En líneas trifásicas de 4 hilos, la línea del neutro se puede sobrecalentar, debido a las excesivas corrientes armónicas que pasan por la línea del neutro, afectando las condiciones de transferencia de calor de todo el cableado.[10]

Los armónicos de corriente pueden ocasionar resonancias en las bancadas de condensadores de los equipos de compensación pasiva de reactiva. También pueden ocasionar el mal funcionamiento de interruptores magnetotérmicos, aperturando las líneas a causa de un incremento de la corriente que circula por ellos.

En equipos que utilizan la detección del cruce por cero de la tensión de red como punto de sincronización, como son los controles de fase en rectificadores controlados o para reguladores de alterna, incluso en equipos de medida o compensación activa digitales, la presencia de tensiones distorsionadas por componentes armónicas en la red de alimentación puede provocar el error en la detección del cruce por cero y con ello el mal funcionamiento de los equipos.[2]

Los armónicos traen varios problemas a las empresas de distribución de energía eléctrica y sus usuarios, tales como: bajo factor de potencia, baja eficiencia de energía, interferencias electromagnéticas, distorsión en la línea de voltaje, sobrecargas y vibraciones en máquinas eléctricas conectadas a la red, etc.

En el año de 1994 en Japón se establecieron las pautas que actualmente se utilizan para la mitigación armónica, manteniendo los niveles armónicos de corriente y voltaje controlados y promoviendo mejores prácticas para el diseño de equipos. [27]

La propagación de armónicos en sistemas de alta tensión es menor que en sistemas de media tensión (6.6 kV). La razón principal es que la expansión y la interconexión de los sistemas de energía de alto voltaje ha hecho que los sistemas de alto voltaje sean más rígidos, es decir que sean difíciles de adaptarse a los cambios que puedan ocurrir en las redes eléctricas y en el contenido armónico de las cargas conectadas a ellas. Por ejemplo en Japón existe alto nivel de contaminación armónica. El valor máximo de voltaje de 5<sup>o</sup> armónico en el área del centro de un sistema de distribución de energía de 6.6 kV excede el 7% en condiciones de carga ligera durante la noche [11]. Estas observaciones basadas en la medición real sugieren que el aumento del voltaje del 5<sup>o</sup> armónico en la noche se debe a la "propagación armónica" como resultado de la resonancia armónica en serie y / o paralela entre inductores de línea y condensadores de derivación para la corrección del factor de potencia instalado en el sistema de distribución.[12]

### **1.5. Causas y efectos de los desequilibrios de tensiones de excitación y cargas en los sistemas eléctricos**

El fenómeno de desequilibrio está definido por la presencia de tensiones y corrientes con componentes de secuencia directa, inversa y homopolar.

Determinamos un sistema trifásico desequilibrado cuando al menos pueden suceder 2 situaciones :

- Las fuentes de alimentación trifásicas están desbalanceadas, quiere decir fuentes con fases y magnitudes diferentes.
- Las impedancias de carga son diferentes

En estos casos se produce la circulación de corrientes desequilibradas por las líneas y, en los sistemas a cuatro hilos, se produce circulación de corriente por el conductor neutro [6].

El voltaje equilibrado depende de cada fase de una línea trifásica que tenga una magnitud de corriente similar con un factor de potencia similar. En general, el voltaje de suministro del proveedor de energía se mantiene a un nivel relativamente bajo de desequilibrio de fase, ya que incluso un nivel bajo de desequilibrio puede causar una ondulación significativa del suministro de energía y efectos de calentamiento en los equipos del sistema de generación, transmisión y distribución.

Los voltajes de suministro del proveedor de energía generalmente se mantienen con un desequilibrio de menos del 1%, aunque el 2% no es infrecuente. El desequilibrio de voltaje superior al 2% debe reducirse, cuando sea posible, reequilibrando las cargas monofásicas o corrigiendo el mal funcionamiento que lo causa [14]. El desequilibrio de voltaje superior al 5% puede ser causado por condiciones de fase única, durante las cuales falta una fase de un circuito trifásico o se desenergiza. Los monitores de fase a menudo son necesarios para proteger los motores trifásicos de los efectos adversos de la fase única.

El desequilibrio de voltaje aumenta el calentamiento de los motores y conductores de la red eléctrica y puede generar corrientes desequilibradas y armónicos no característicos para los equipos electrónicos, como los variadores de velocidad. Los motores de alta eficiencia pueden ser más susceptibles a problemas con voltajes no balanceados debido a valores de reactancia de secuencia negativa más bajos. Los niveles deseables de desequilibrio son inferiores al 1% en todos los niveles de voltaje.

Según [7] y [8] como resultado, la causa más común del desequilibrio de tensiones en las líneas de distribución son las cargas monofásicas de los clientes que se sirven en el sistema y pueden generar a su vez desequilibrio de corrientes en otras cargas trifásicas equilibradas que están conectadas al PCC. El número y tipo de clientes monofásicos por fase debe ser similar a lo largo de una línea de distribución para mantener voltajes equilibrados a lo largo de la línea.

Las cargas en redes residenciales y en edificios comerciales son principalmente cargas monofásicas alimentadas por un transformador trifásico en la configuración  $Y/\Delta$ , lo cual ocasiona un desequilibrio de cargas [9].

El desequilibrio de carga provoca la asimetría de la corriente de carga, por lo que, además de la componente simétrica de corriente de la secuencia positiva, la corriente de carga también puede contener componentes de secuencia homopolar y negativa.

### **1.6. Causas y efectos de desfase de corrientes y tensiones en los sistemas eléctricos**

En [1] el fenómeno de desfase es el producto entre las componentes fundamentales de secuencia directa de las tensiones y las corrientes.

El fenómeno de desfase contiene energía no aprovechada que no se transforman por el sistema, generando ineficiencias. El desfase de corrientes y tensiones de secuencia positiva contribuye a la generación de potencia reactiva, originando un flujo bidireccional entre la carga y la red.

Tradicionalmente es generado por las reactancias inductivas y/o capacitivas y/o convertidores electrónicos en el sistema. Pero en [34] en base a la comparación de expresiones de potencia reactiva instantánea en sistemas equilibrados y no equilibrados pone de manifiesto que el fenómeno de desfase también es provocado por los desequilibrios de tensiones y cargas.

Los efectos es el incremento de las pérdidas de potencia activa, debido a la circulación de la componente de corriente reactiva. La circulación de la corriente reactiva incrementa las caídas de tensión en la red eléctrica. Sobrecalentamiento innecesario en componentes del sistema como resultado de la transferencia de la corriente reactiva.

En general, las corrientes generadas por los fenómenos ineficientes generan un sobredimensionamiento de los elementos del sistema eléctrico , debido a que los elementos deben de soportar toda la corriente y potencias útil y no útil que llega hasta los clientes.

# CAPÍTULO 2

## 2. Teorías de la potencia eléctrica

Durante años científicos buscaban desarrollar teorías que identificaran los fenómenos que se producían en los sistemas eléctricos, conforme iban evolucionando las teorías estas reflejaban fielmente estos fenómenos. Es así como Budeanu en 1927 estableció las definiciones potencia en el dominio de la frecuencia [20]. Definió como  $P$  a todas las componentes de potencia activa que consumía la carga, definió como  $Q$  a todas las componentes de potencia reactiva generada por la carga y definió como  $D$  a todas las componentes de potencia generadas por la distorsión armónica de corriente y tensión. Budeanu dijo que  $P$  era la potencia eficiente consumida por la carga, mientras que  $Q$  y  $D$  eran llamadas potencias ineficientes. Pero esta manera de englobar las potencias estaba errado como se verá más adelante en la descomposición de potencias definidas en IEEE St. 1459-2010.

Luego la formulación expuesta por Fryze en 1931 aplicaba un estudio de la potencia en el dominio temporal [19]. Y de la misma manera que Budeanu tenía una manera errónea de englobar las potencias eficientes de las ineficientes.

En 1950 Buchholz extendió el trabajo de Fryze a sistemas genéricos de múltiples conductores y fases [21]. En donde la potencia instantánea desarrollada colectivamente por todas las fases es independiente del nodo elegido para la medida de la tensión. Introduciendo de esta manera el valor colectivo tanto para tensiones como para corrientes.

A través de los años, se ha estado debatiendo sobre los valores relativos bajo condiciones no sinusoidales de varias definiciones de las cantidades de potencia eléctrica. El único real consenso que ha emergido es que las actuales definiciones usadas para evaluar el flujo de la energía eléctrica en redes de potencia no es el adecuado para los estudios económicos cuando voltajes o corrientes no sinusoidales y/o cuando cargas no balanceadas causan corrientes y voltajes asimétricos en sistemas polifásicos.[4]

Todo esto debido a los cambios que han ocurrido en los últimos 50 años, el nuevo entorno de la red eléctrica está condicionada a los siguientes factores:

Equipos electrónicos de potencia, tales como variadores de velocidad ajustables, rectificadores controlados, lámparas de balastos electrónicos, hornos de arco y inducción, salas de computadoras personales, representan la mayor parte de cargas no lineales que aumentan dentro de la industria y los clientes comerciales. Dichas cargas generan una serie de perturbaciones para las empresas que suministran el servicio eléctrico y equipos del usuario final, debido al flujo de energía no activa causada por los armónicos de corriente y voltaje.[32]

La instrumentación diseñada para señales senoidales de frecuencias de 60/50Hz es propensa a presentar errores cuando la corriente y voltaje están distorsionados.

Los microprocesadores y microcomputadoras, permiten fabricar instrumentos eléctricos con nuevos, precisos y versátiles quipos de medición capaces de medir cantidades eléctricas con ayuda de avanzados modelos matemáticos.

Existe la necesidad de cuantificar correctamente la distorsión causada por cargas no lineales, para aplicar un cobro económico justo con la finalidad de mantener la calidad del servicio eléctrico.

La medición siempre ha sido un compromiso entre las capacidades técnicas de los equipos, el costo del consumo y las consideraciones teóricas. Las características seleccionadas para medidores de la generación anterior eran precisos para tensiones y corrientes sinusoidales, pero las cargas actuales son cada vez más no lineales y la tecnología del medidor de muestreo digital no promete medir un rango de cantidades que no estaban disponibles en el pasado.

La definición y medidas de potencia activa no necesita mayor investigación ya que esta correctamente definida para operación en estado estacionario en sistemas monofásicos y polifásicos con tensiones y corrientes lineales y cargas balanceadas, para fuentes de voltaje senoidales y simétricas, pero para sistemas polifásicos con cargas desbalanceadas existen múltiples definiciones de potencia aparente. Definir correctamente la potencia aparente es sumamente importante por que la economía de las empresas de generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica hacen sus cálculos en base a esta [3].

Es por ello que gracias a las definiciones del IEEE Std. 1459-2010, estas sirven como herramienta para la correcta descomposición de las potencias dentro de un sistema eléctrico y sirven como fundamento para investigaciones sobre equipos de medida y como principio para la obtención de las corrientes de referencia en filtros activos.[5] Permitiendo relacionar cada una de las corrientes con el fenómeno energético producido por la carga o redes vecinas, ayudando a diseñar redes de compensación independientes para cada uno de los fenómenos.

Uno de los mecanismos para incrementar la eficiencia energética es reducir el efecto de las ineficiencias generadas por cargas conectadas a la red estándar o defectos de los equipos de generación, es por ello necesario la identificación de las ineficiencias.

### **2.1. Teoría de la potencia del IEEE Std. 1459-2010**

IEEE Estándar 1459 nace en el año 2000 como consecuencia de los estudios realizados en situaciones no sinusoidales por el grupo de trabajo de la IEEE.

La IEEE publicó en el año 2010 la revisión del estándar 1459, siendo esta actualmente la versión más reciente del estándar. Este estándar tiene las definiciones usadas para las medidas de potencia eléctrica bajo condiciones sinusoidales y no sinusoidales, equilibradas y no equilibradas. Contiene también las expresiones matemáticas que fueron utilizadas en el pasado y que sirvieron de base para proponer nuevas expresiones. Con estas expresiones la IEEE pretende dar las pautas para evaluar el desempeño de los equipos modernos o para diseñar y construir nuevas generaciones de instrumentos.[25]

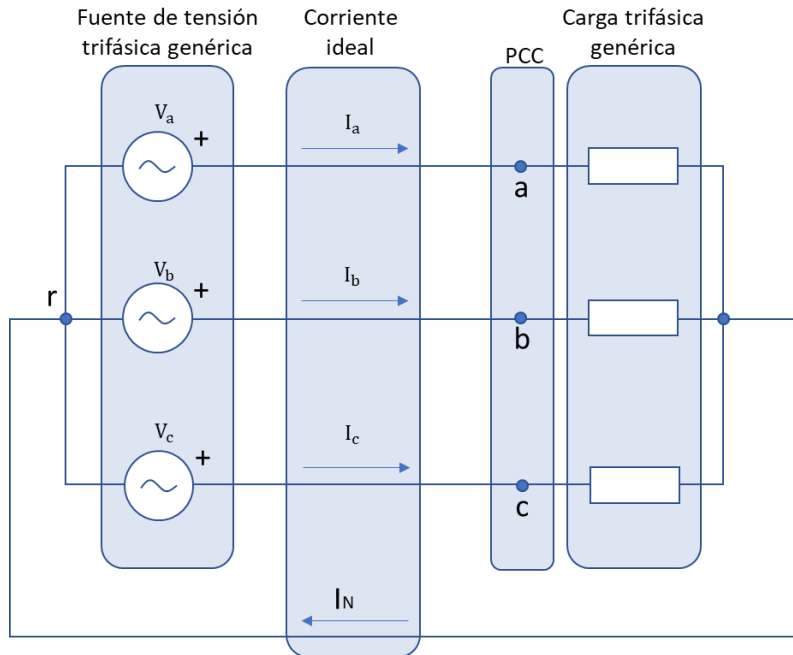
En los siguientes apartados, se cuantificarán las potencias para cada caso analizado siguiendo la teoría de potencia del IEEE Std. 1459-2010.

### **2.2. Teoría de la potencia eléctrica del IEEE Std. 1459-2010 en sistemas trifásicos:**

En la red eléctrica no es muy común encontrar sistemas de bajo voltaje con señales sinusoidales perfectas y balanceadas de 3 fases, solo bajo condiciones de laboratorio. En el caso de sistemas trifásicos de 3 hilos, el voltaje de la línea a neutro es definida asumiendo un nodo neutro artificial que puede ser simulado con la ayuda de 3 resistencias conectadas en estrella (Y). [1]

La Figura 2-1 corresponde a un sistema eléctrico a 4 hilos, que consta de una fuente de alimentación trifásica que alimenta a una carga trifásica por medio de conductores ideales, donde podemos medir las tensiones y corrientes en el PCC.

Con este diagrama se pueden analizar los diferentes casos que se presentan como en condiciones: lineales, no lineales, equilibradas o desequilibradas y sus múltiples condiciones.



**Figura 2-1 Sistema trifásico a 4 hilos considerando una línea ideal**

La IEEE en el Std. 1459 describe el cálculo de la potencia instantánea en un sistema trifásico de tensiones desbalanceadas y corrientes desequilibradas de la misma manera que un sistema ideal de tensiones balanceadas y corrientes equilibradas.

Siguiendo esta descripción se tiene que para un sistema de conexión estrella (Y) se tiene la misma disipación de potencia efectiva en un sistema de tensiones no simétrico a un sistema de tensiones simétrico es ( $P_Y$ ):

$$P_Y = \frac{V_{ar}^2 + V_{br}^2 + V_{cr}^2}{R_Y} = \frac{3V_e^2}{R_Y} \quad (2-1)$$

Donde  $V_{ar}$ ,  $V_{br}$  y  $V_{cr}$  son los valores eficaces del voltaje referidos a un punto de referencia arbitrario  $r$  para las fases a, b y c respectivamente;  $R_Y$  es la resistencia de cada una de las fases para un sistema de conexión estrella.

De la misma manera la disipación de potencia en la carga ( $P_\Delta$ ) para un sistema de conexión triángulo ( $\Delta$ ) es:

$$P_\Delta = \frac{V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2}{R_\Delta} = \frac{3(\sqrt{3}V_e)^2}{R_\Delta} \quad (2-2)$$

Donde  $V_{ab}$ ,  $V_{bc}$  y  $V_{ca}$  son los valores eficaces de los voltajes de línea y  $R_{\Delta}$  es la resistencia equivalente para un sistema de conexión en triángulo.

Eligiendo  $R_{\Delta}=3R_Y$  se cumple que  $P_{\Delta}=P_Y$ , de la igualdad resulta:

$$\frac{V_{ar}^2 + V_{br}^2 + V_{cr}^2}{R_Y} + \frac{V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2}{3R_{\Delta}} = \frac{3V_e^2}{R_Y} + \frac{3(\sqrt{3}V_e)^2}{3R_{\Delta}} \quad (2-3)$$

Despejando de la ecuación (2-3) se obtiene la expresión general del voltaje efectivo  $V_e$  para sistema trifásico a 4 hilos:

$$V_e = \sqrt{\frac{1}{18} [3(V_{ar}^2 + V_{br}^2 + V_{cr}^2) + (V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)]} \quad (2-4)$$

De manera similar, para obtener la corriente efectiva  $I_e$  de un sistema trifásico de cuatro hilos, el IEEE Std. 1459 basa el cálculo en las pérdidas de potencia  $\Delta P$  de la red del sistema de distribución:

$$\Delta P = r(I_a^2 + I_b^2 + I_c^2) + r_n I_n^2 \quad (2-5)$$

Donde  $r$  es la resistencia de los conductores de fase,  $r_n$  es la resistencia del conductor de neutro,  $I_a$ ,  $I_b$  e  $I_c$  es la corriente eficaz para las fases  $a$ ,  $b$  y  $c$  respectivamente; e  $I_n$  es la corriente eficaz que circula por el neutro. Para simplificar los cálculos la IEEE Std.1459 asume  $r_n = r$ .

$$\Delta P = r(I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + I_n^2) \quad (2-6)$$

Según las ecuaciones mostradas en el Std. 1459 se verifica que existe un sistema equilibrado equivalente que provoca las mismas pérdidas de potencia, para cualquier conjunto de corrientes desequilibradas. En sistemas equilibrados se cumple que  $I_a = I_b = I_c = I_e$  e  $I_n = 0$ . Así representamos las pérdidas:

$$\Delta P = 3rI_e^2 \quad (2-7)$$

Igualando (2-6) y (2-7) se obtiene la expresión general de  $I_e$ :

$$I_e = \sqrt{\frac{1}{3}(I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + I_n^2)} \quad (2-8)$$

La potencia efectiva aparente  $S_e$  se define en la siguiente ecuación:

$$S_e = 3V_e I_e \quad (2-9)$$

$S_e$  cuantifica todos los fenómenos físicos que pueden aparecer en el sistema de potencia durante la transferencia de energía.  $S_e$  son las pérdidas en el conductor de neutro en un sistema trifásico de cuatro hilos, así como el fenómeno del desequilibrio.  $S_e$  es la máxima potencia que puede ser transmitida por un sistema de distribución trifásico a una carga trifásica perfectamente equilibrada, alimentada por un sistema de tensiones con una tensión efectiva igual a  $V_e$ , manteniendo las mismas pérdidas en las líneas [31]. Varios equipos de potencia, como por ejemplo transformadores o interruptores se clasifican en términos de su potencia aparente.

En este apartado se han plasmado las expresiones de  $V_e$ ,  $I_e$ , y  $S_e$  validas bajo cualquier condición de operación. En los siguientes apartados se evaluará dichas expresiones para sistemas trifásicos lineales equilibrados, sistemas trifásicos lineales desequilibrados, sistemas trifásicos no lineales equilibrados y sistemas trifásicos no lineales desequilibrados.

### 2.2.1. Sistema trifásico lineal y equilibrado:

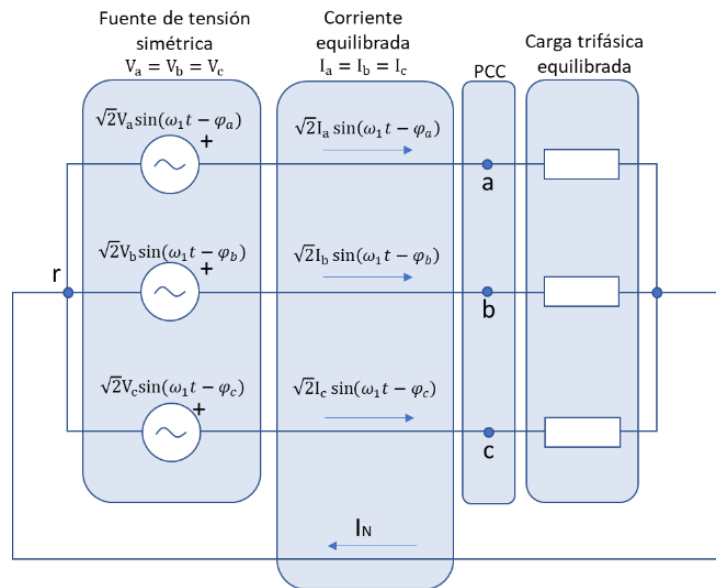


Figura 2-2 Sistema eléctrico trifásico a 4 hilos lineal y equilibrado

En el sistema de potencia de la *Figura 2-2* la fuente de tensión es simétrica y lineal donde  $V_{a1} = V_{b1} = V_{c1} = V_1^+$  el superíndice “+” indica que el valor eficaz de las tensiones de fase sólo contienen valores de secuencia positiva y el subíndice “1” indica componentes fundamentales. Las tensiones de fase  $v_{z1}(t)$  en el PCC pueden verse en la siguiente ecuación.



$$v_{z1}(t) = v_{z1}^+(t) = \sqrt{2}V_1^+ \sin(\omega_1 t - \varphi_z) \quad (2-10)$$

Donde el subíndice “z” indica cada una de las fases en el sistema eléctrico (z=a, b, c, neutro),  $\omega_1$  es la pulsación fundamental, y  $\varphi_z$  es la fase inicial de las tensiones línea-neutro ( $\varphi_a = 0, \varphi_b = \frac{2\pi}{3}, \varphi_c = \frac{4\pi}{3}$ ),  $v_{a1}$  se encuentra en el origen de ángulos, así que todos los ángulos de las tensiones y corrientes son medidos con respecto a dicha tensión.

Las corrientes son equilibradas y lineales donde  $I_{a1} = I_{b1} = I_{c1} = I_1^+$  y la corriente que circula por el neutro es nula ( $I_N = 0$ ). Las corrientes instantáneas de fase  $i_{z1}(t)$  se definen en:

$$i_{z1}(t) = i_{z1}^+(t) = \sqrt{2}I_1^+ \sin(\omega_1 t - \varphi_z + \beta_1^+) \quad (2-11)$$

Donde  $\beta_1^+$  es el ángulo de desfase de las corrientes con respecto a las tensiones, en este caso se cumple ángulo de desfase del  $V_1^+$  respecto del origen de ángulos es  $\alpha_1^+ = 0$  y  $\theta_1^+ = \beta_1^+ - \alpha_1^+ = \beta_1^+$ ; si  $\beta_1^+$  es positivo la corriente fundamental de secuencia directa está adelantada con respecto a la tensión y está provocada por cargas capacitivas, si  $\beta_1^+$  la negativa la corriente se encuentra retrasada con respecto a la tensión y está provocada por cargas inductivas. [31]

La potencia instantánea trifásica fundamental  $p(t)$ , es la contribución de la potencia instantánea de cada fase y viene dada por:

$$p(t) = v_a(t)i_a(t) + v_b(t)i_b(t) + v_c(t)i_c(t) \quad (2-12)$$

La única expresión de potencia instantánea para esta situación que aparece en el IEEE Std 1459, es la expresión (2-12) y sólo es usada para calcular la potencia activa ( $P$ ).  $P$  en este caso coincide con la potencia activa de secuencia positiva  $P_1^+$  y se obtiene calculando el valor medio de  $p(t)$  como se muestra en:

$$P = P_1^+ = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} p(t) dt = 3 V_1^+ I_1^+ \cos \theta_1^+ \quad (2-13)$$

Donde  $\theta_1^+$  es el ángulo de desfase entre la tensión y la corriente ( $\theta_1^+ = \beta_1^+ - \alpha_1^+$ ).  $P_1^+$  es la única potencia activa que se considera eficiente, ya que en su totalidad es transferida desde el generador hacia la carga. La potencia reactiva que en este caso es la potencia reactiva de secuencia positiva  $Q_1^+$  es:

$$Q_1^+ = 3V_1^+ I_1^+ \sin \theta_1^+ \quad (2-14)$$

$S_e$  en este caso coincide con la potencia aparente fundamental de secuencia positiva  $S_1^+$  ya que no existe asimetría de tensión ni desequilibrios de corriente y puede calcularse a partir de la ecuación (2-9) como sigue:

$$(S_1^+)^2 = (P_1^+)^2 + (Q_1^+)^2 = (3 V_1^+ I_1^+)^2 \quad (2-15)$$

El factor de potencia para este caso es la relación entre  $P_1^+$  y  $S_1^+$ :

$$P_F^+ = \frac{P_1^+}{S_1^+} \quad (2-16)$$

$P_F^+$  se usa como indicador de la eficiencia de este tipo de sistemas, ya que indica la parte de la potencia entregada que es aprovechada realmente.[31]

### 2.2.2. Sistema trifásico lineal, con tensiones asimétricas y corrientes desequilibradas.

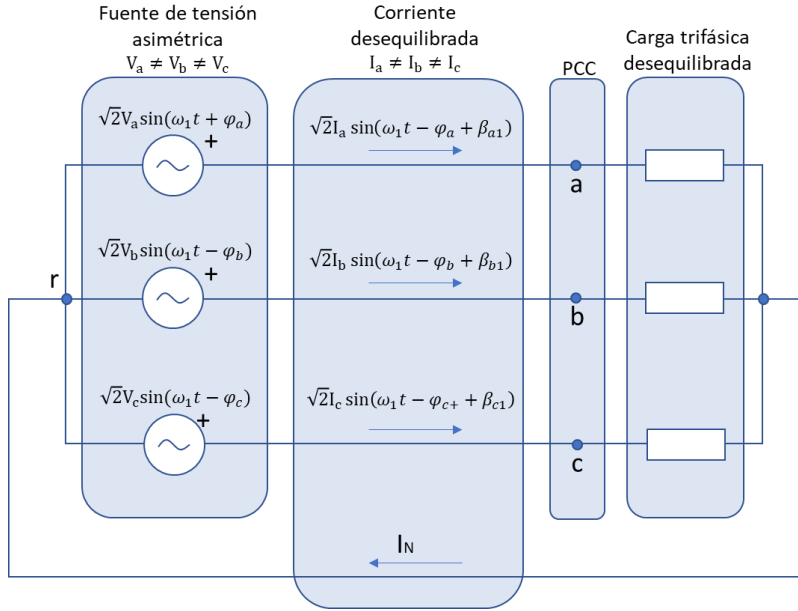
Cuando los voltajes medidos en el PCC de cada rama son diferentes ( $V_{a1} \neq V_{b1} \neq V_{c1}$ ).  $v_{z1}(t)$  en el PCC se expresa :

$$v_{z1}(t) = \sqrt{2}V_{z1} \sin(\omega_1 t - \varphi_z) \quad (2-17)$$

Las corrientes son lineales y desequilibradas ( $I_{a1} \neq I_{b1} \neq I_{c1}$ ), y la corriente que circula por el neutro no es nula ( $I_{a1} \neq 0$ ),  $i_{z1}(t)$  está definida por:

$$i_{z1}(t) = \sqrt{2}I_{z1} \sin(\omega_1 t - \varphi_z + \beta_{z1}) \quad (2-18)$$

Recordando  $\varphi_z$  es la fase inicial de las tensiones línea-neutro ( $\varphi_a = 0, \varphi_b = \frac{2\pi}{3}, \varphi_c = \frac{4\pi}{3}$ ) y  $\beta_{z1}$  es el desfase de  $i_{z1}$  con respecto a la tensión  $v_{z1}$ .



**Figura 2-3 Sistema trifásico a 4 hilos lineal y desequilibrado**

Usando el teorema Stokvis-Fortescue a partir de las componentes fundamentales, se calculan las componentes simétricas para las tensiones:

- El voltaje fundamental de secuencia positiva ( $V_1^+$ ).
- El voltaje fundamental de secuencia negativa ( $V_1^-$ ).
- El voltaje fundamental de secuencia homopolar ( $V_1^0$ ).

Así las componentes simétricas de un sistema desequilibrado pueden calcularse a partir de la siguiente matriz de transformación ( $\alpha = e^{j(\frac{2\pi}{3})}$ ):

$$T = \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-19)$$

$V_e$  en este caso coincide con el voltaje efectivo fundamental ( $V_{e1}$ ) y puede calcularse en términos de las componentes simétricas como sigue:

$$V_{e1} = \sqrt{(V_1^+)^2 + (V_1^-)^2 + \frac{(V_1^0)^2}{2}} \quad (2-20)$$

Debido a que las magnitudes de corrientes tampoco son iguales, estas pueden expresarse en términos de las componentes simétricas utilizando la matriz de transformación de Stokvis-Fortescue (2-19):

- La corriente fundamental de secuencia positiva ( $I_1^+$ ).
- La corriente fundamental de secuencia negativa ( $I_1^-$ ).
- La corriente fundamental de secuencia homopolar ( $I_1^0$ ).

$I_e$  coincide con la corriente efectiva fundamental ( $I_{e1}$ ) y puede calcularse en términos de las componentes simétricas como se definen en:

$$I_{e1} = \sqrt{(I_1^+)^2 + (I_1^-)^2 + 4(I_1^0)^2} \quad (2-21)$$

$S_e$  coincide con la potencia aparente fundamental ( $S_{e1}$ ).  $S_{e1}$  está formada por  $S_1^+$  y por la potencia aparente de desequilibrio ( $S_{U1}$ ),  $S_{U1}$  contiene todos los términos de potencia diferentes a  $S_1^+$  y que aparecen debido a la asimetría de tensiones y el desequilibrio de las corrientes:

$$(S_{e1})^2 = (S_1^+)^2 + (S_{U1})^2 \quad (2-22)$$

$$S_{U1} = S_1^- + S_1^0 \quad (2-23)$$

$S_{U1}$  está formado por la potencia aparente fundamental de secuencia negativa ( $S_1^-$ ) y la potencia aparente fundamental de secuencia homopolar ( $S_1^0$ ), sus expresiones son mostradas en (2-24) y (2-25) respectivamente:

$$(S_1^-)^2 = (P_1^-)^2 + (Q_1^-)^2 \quad (2-24)$$

$$(S_1^0)^2 = (P_1^0)^2 + (Q_1^0)^2 \quad (2-25)$$

La potencia activa fundamental de secuencia negativa ( $P_1^-$ ), y la potencia activa fundamental de secuencia homopolar ( $P_1^0$ ) son mostradas en (2-26) y (2-27) respectivamente:

$$P_1^- = 3V_1^- I_1^- \cos\theta_1^- \quad (2-26)$$

$$P_1^0 = 3V_1^0 I_1^0 \cos\theta_1^0 \quad (2-27)$$

A pesar de que  $P_1^-$  y  $P_1^0$  son potencias activas producidas por componentes de voltaje y corriente de la misma secuencia de giro, estas son consideradas ineficientes ya que producen pérdidas en las líneas y transformadores. La única potencia eficiente que demanda la carga es  $P_1^+$ .

La potencia reactiva fundamental de secuencia negativa ( $Q_1^-$ ) y la potencia reactiva de secuencia homopolar ( $Q_1^0$ ) son mostradas en (2-28) y (2-29) respectivamente:

$$Q_1^- = 3V_1^- I_1^- \sin\theta_1^- \quad (2-28)$$

$$Q_1^0 = 3V_1^0 I_1^0 \sin\theta_1^0 \quad (2-29)$$

### 2.2.3. Sistema trifásico no lineal con tensiones asimétricas y corrientes desequilibradas.

Este caso es el que comúnmente se encuentran en redes eléctricas de distribución reales, ya que incluye sistemas no lineales, con desequilibrios de corriente y asimetría de voltaje. En este caso las magnitudes de corriente fundamental son diferentes ( $I_{a1} \neq I_{b1} \neq I_{c1}$ ), también las magnitudes de corriente de cada armónico son diferentes ( $I_{ah} \neq I_{bh} \neq I_{ch}$ ).

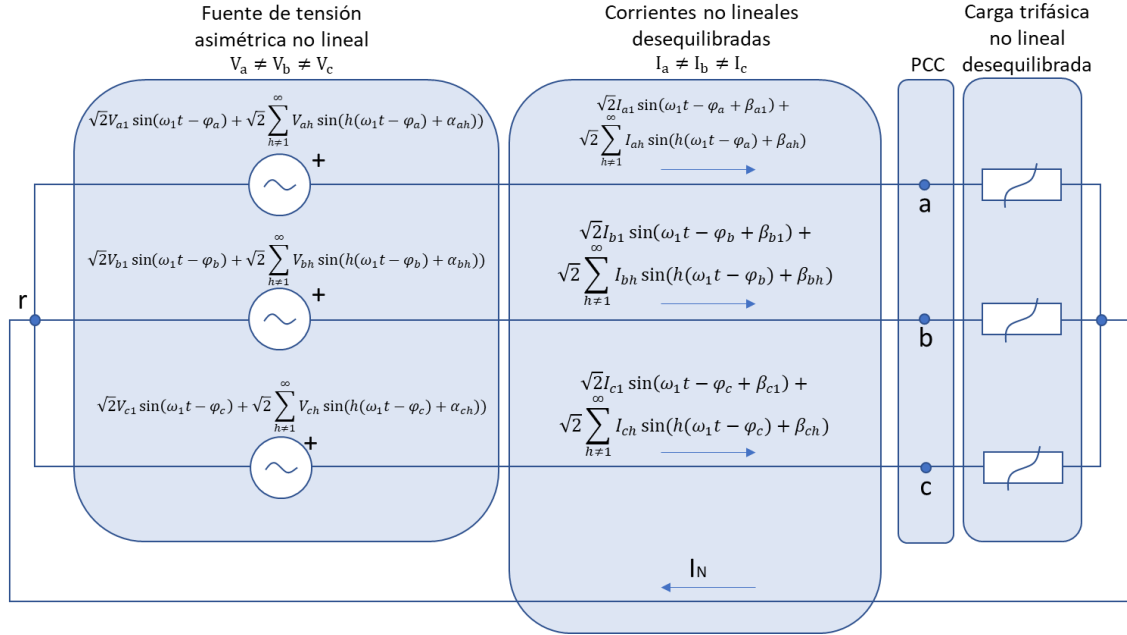


Figura 2-4 Sistema trifásico a 4 hilos no lineal y desequilibrado

Los voltajes instantáneos fase-neutro  $v_z(t)$  en el PCC de la Figura 2-4 están definidos por (2-30):

$$v_z(t) = \sqrt{2}V_{z1} \sin(\omega_1 t - \varphi_z) + \sqrt{2} \sum_{h \neq 1}^{\infty} V_{zh} \sin(h(\omega_1 t - \varphi_z) + \alpha_{zh}) \quad (2-30)$$

Donde:  $h$  es el orden de los armónicos;  $V_{zh}$  es el voltaje eficaz por fase de cada armónico y  $\alpha_{zh}$  es el desfase entre cada armónico de tensión y  $v_{a1}(t)$ . En este caso las magnitudes de tensión fundamental son diferentes ( $V_{a1} \neq V_{b1} \neq V_{c1}$ ), también las magnitudes de tensión de cada armónico son diferentes ( $V_{ah} \neq V_{bh} \neq V_{ch}$ ).

Las corrientes de línea instantánea por fase  $i_z(t)$  están definidas por (2-31):

$$i_z(t) = \sqrt{2}I_{z1} \sin(\omega_1 t - \varphi_z + \beta_{z1}) + \sqrt{2} \sum_{h \neq 1}^{\infty} I_{zh} \sin(h(\omega_1 t - \varphi_z) + \beta_{zh}) \quad (2-31)$$

Donde:  $I_{zh}$  es la corriente eficaz por fase de cada armónico,  $\beta_{z1}$  es el desfase entre la corriente fundamental de línea por fase y el voltaje fase-neutro y  $\beta_{zh}$  es el desfase entre cada armónico de corriente y  $v_{a1}$ .

El voltaje efectivo no fundamental ( $V_{eH}$ ) está formado por todas las componentes armónicas de tensión y puede calcularse a partir de (2-4) como se muestra en (2-32):

$$V_{eH} = \sqrt{\frac{1}{18} [3(V_{aH}^2 + V_{bH}^2 + V_{cH}^2) + (V_{abH}^2 + V_{bcH}^2 + V_{caH}^2)]} \quad (2-32)$$

Donde  $V_{aH}$ ,  $V_{bH}$  y  $V_{cH}$  son los voltajes eficaces armónicos fase-neutro medidos en el PCC,  $V_{abH}$ ,  $V_{bcH}$  y  $V_{caH}$  son las tensiones eficaces armónicas de línea en el PCC.  $V_e$  está formada por  $V_{e1}$  y por  $V_{eH}$  como se muestra a continuación:

$$V_e = \sqrt{V_{e1}^2 + V_{eH}^2} \quad (2-33)$$

La corriente efectiva no fundamental  $I_{eH}$  está formada por todas las componentes armónicas de corriente y puede calcularse a partir de (2-8) como se define en (2-34).

$$I_{eH} = \sqrt{\frac{1}{3} (I_{aH}^2 + I_{bH}^2 + I_{cH}^2 + I_{nH}^2)} \quad (2-34)$$

Donde  $I_{aH}$ ,  $I_{bH}$  y  $I_{cH}$  son las corrientes eficaces armónicas por fase e  $I_{nH}$  es la corriente eficaz armónica del neutro.  $I_e$  está formada por  $I_{e1}$  y por  $I_{eH}$  como se define en (2-35).

$$I_e = \sqrt{I_{e1}^2 + I_{eH}^2} \quad (2-35)$$

Cabe destacar que debido a que las tensiones son asimétricas y las corrientes son desequilibradas,  $V_{e1}$ ,  $V_{eH}$ ,  $I_{e1}$ , e  $I_{eH}$ , pueden expresarse en términos de sus componentes simétricas. Esta afirmación es útil para aclarar la naturaleza de la potencia en análisis posteriores.[31]

En este caso  $S_e$ , puede obtenerse si (2-33) y (2-35) son reemplazadas en (2-9).

$$S_e^2 = 9(V_{e1}^2 + V_{eH}^2) + (I_{e1}^2 + I_{eH}^2) \quad (2-36)$$

Expandiendo (2-36) se obtiene:

$$S_e^2 = (3V_{e1}I_{e1})^2 + (3V_{e1}I_{eH})^2 + (3V_{eH}I_{e1})^2 + (3V_{eH}I_{eH})^2 \quad (2-37)$$

Donde el primer término corresponde a la potencia aparente efectiva fundamental ( $S_{e1}$ ) que se define en (2-37), mientras que los otros tres términos, donde intervienen corrientes o

tensiones armónicas, constituyen la potencia aparente efectiva no fundamental ( $S_{eN}$ ). Por lo tanto la potencia aparente efectiva puede escribirse como en (2-38).

$$S_{e1}^2 = (3V_{e1}I_{e1})^2 \quad (2-38)$$

$$S_{eN} = \sqrt{9V_{e1}^2 I_{eH}^2 + 9V_{eH}^2 I_{e1}^2 + 9V_{eH}^2 I_{eH}^2} \quad (2-39)$$

$$S_e^2 = S_{e1}^2 + S_{eN}^2 \quad (2-40)$$

Utilizando la transformación de Stokvis-Fortescue el IEEE Std. 1459 propone mediante (2-41) la descomposición de  $S_{e1}$  en su componente de secuencia positiva ( $S_1^+$ ) y en la potencia de desequilibrio ( $S_{U1}$ ). En [30]  $S_{U1}$  se expresa como (2-42) en donde el primer término es la potencia de corriente desequilibrada producida por la corriente demandada por cargas desequilibradas. El segundo término es la potencia de voltaje asimétrico. El tercer término es la potencia aparente desequilibrada debido a los desequilibrios de corriente y asimetrías de voltaje juntas.

$$S_{e1}^2 = (S_1^+)^2 + S_{U1}^2 \quad (2-41)$$

$$S_{U1}^2 = 9V_1^{+2} I_{U1}^2 + 9V_{U1}^2 I_1^{+2} + 9V_{U1}^2 I_{U1}^2 \quad (2-42)$$

La potencia aparente fundamental de secuencia positiva se divide a su vez en sus componentes en fase y en cuadratura, dando lugar a la potencia activa fundamental de secuencia positiva ( $P_1^+$ ) y a la potencia reactiva fundamental de secuencia positiva ( $Q_1^+$ ).

$$S_1^+ = \sqrt{(P_1^+)^2 + (Q_1^+)^2} \quad (2-43)$$

$P_1^+$  representa el fenómeno de transferencia de energía útil, mientras que  $Q_1^+$  representa el flujo de energía bidireccional causado por el fenómeno de desfase.  $P_1^+$  y  $Q_1^+$  se calculan mediante (2-44) y (2-45) respectivamente, donde  $\theta_1^+$  es el ángulo de desfase entre las componentes fundamentales de secuencia positiva de tensión y corriente.

$$P_1^+ = 3V_1^+ I_1^+ \cos\theta_1^+ \quad (2-44)$$

$$Q_1^+ = 3V_1^+ I_1^+ \sin\theta_1^+ \quad (2-45)$$

La potencia aparente efectiva no fundamental ( $S_{eN}$ ) de (2-39) se compone de tres términos. El primer término se define como la potencia efectiva de distorsión de corriente ( $D_{e1}$ ), el

segundo es la potencia efectiva de distorsión de tensión ( $D_{eV}$ ), y el tercero es la potencia aparente efectiva armónica ( $S_{eH}$ ). Los tres términos se definen en (2-46) - (2-47) y (2-48).

$$D_{e1} = 3V_{e1}I_{eH} \quad (2-46)$$

$$D_{eV} = 3V_{eH}I_{e1} \quad (2-47)$$

$$S_{eH} = 3V_{eH}I_{eH} \quad (2-48)$$

Se define la distorsión armónica total equivalente de corriente  $TDH_{e1}$  como la relación entre  $I_{eH}$  e  $I_{e1}$ , definida en (2-50).

$$D_{e1} = 3V_{e1}I_{eH} = S_{e1} \frac{I_{eH}}{I_{e1}} = S_{e1} TDH_{e1} \quad (2-49)$$

$$TDH_{e1} = \frac{I_{eH}}{I_{e1}} \quad (2-50)$$

Se define la distorsión armónica total equivalente de tensión  $TDH_{eV}$  como la relación entre  $V_{eH}$  y  $V_{e1}$ , definida en (2-52).

$$D_{eV} = 3V_{eH}I_{e1} = S_{e1} \frac{V_{eH}}{V_{e1}} = S_{e1} TDH_{eV} \quad (2-51)$$

$$TDH_{eV} = \frac{V_{eH}}{V_{e1}} \quad (2-52)$$

En función de los THD anteriores,  $S_{eH}$  de (2-48) podría escribirse tal y como se expresa en (2-53).

$$S_{eH} = 3V_{eH}I_{eH} = S_{e1} \frac{V_{eH}}{V_{e1}} \frac{I_{eH}}{I_{e1}} = S_{e1} TDH_{eV} TDH_{e1} \quad (2-53)$$

Igualmente  $S_{eN}$  se escribiría como se expresa en (2-54) extrayendo  $S_{eH}$  de (2-53),  $TDH_{eV}$  de (2-52) y  $TDH_{e1}$  de (2-50):

$$S_{eN} = S_{e1} \sqrt{(TDH_{e1})^2 + (TDH_{eV})^2 + (TDH_{eV} \cdot TDH_{e1})^2} \quad (2-54)$$



Cabe destacar que estos THD son diferentes a los habitualmente computados por los equipos de medida puesto que se definen a partir de las corrientes y tensiones efectivas que se han establecido previamente.

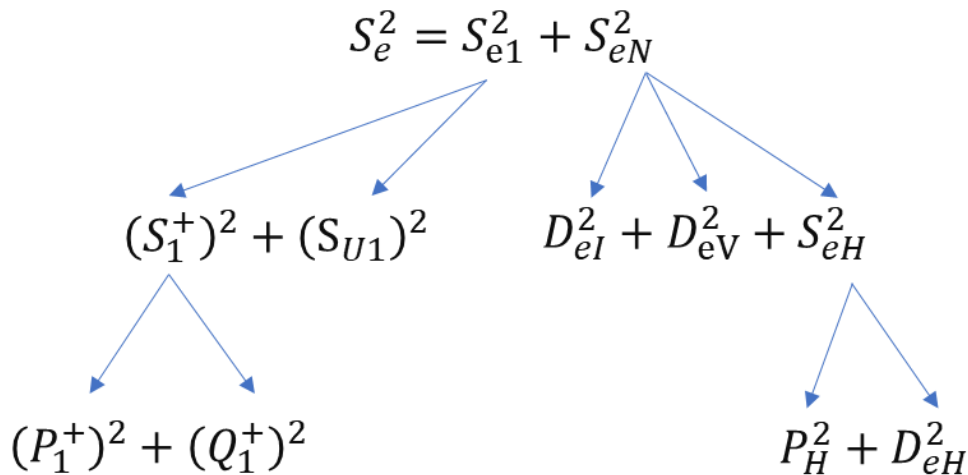
$S_{eH}$  puede ser a su vez descompuesta en su parte activa, correspondiente a la potencia activa armónica ( $P_H$ ) y su parte de distorsión armónica ( $D_{eH}$ ). Estos dos términos se calculan mediante (2-56) y respectivamente (2-57).

$$S_{eH}^2 = P_H^2 + D_{eH}^2 \quad (2-55)$$

$$P_H = P - P_1 = \sum_{\substack{h \neq 1 \\ i=A,B,C}} V_{ih} I_{ih} \cos \theta_{ih} \quad (2-56)$$

$$D_{eH} = \sqrt{S_{eH}^2 - P_H^2} \quad (2-57)$$

La Figura 2-5 muestra un esquema resumen de la descomposición de potencias propuesta por la IEEE Std. 1459 en este tipo de sistemas.



**Figura 2-5 Esquema de potencia propuesta por la IEEE Std.1459-2000**

Se extrae de este esquema que cada componente de  $S_e$  contribuye a la pérdida total de energía en la red eléctrica. Es decir las potencias de distorsión de corriente y de voltaje, la potencia aparente armónica no solo causan pérdidas, si no también la potencia activa armónica y reactiva fundamental. Teniendo la siguiente expresión:

$$S_e^2 = (P_1^+)^2 + (Q_1^+)^2 + S_{U1}^2 + S_{eN}^2 \quad (2-58)$$

Teniendo en cuenta todos los desarrollos realizados anteriormente se definen los siguientes factores de potencia:

El factor de potencia efectivo relaciona la potencia activa con la potencia aparente efectiva (2-59). Este valor es usualmente utilizado para indicar la calidad de la carga eléctrica y este valor determina cuan cerca o lejos está un sistema eléctrico de comportarse en condiciones ideales.

(2-59)

$$P_{Fe} = \frac{P}{S_e}$$

El factor de potencia fundamental de secuencia positiva relaciona la potencia activa fundamental de secuencia positiva con la potencia aparente fundamental de secuencia positiva (2-60).

(2-60)

$$P_{F1} = \frac{P_1^+}{S_1^+}$$

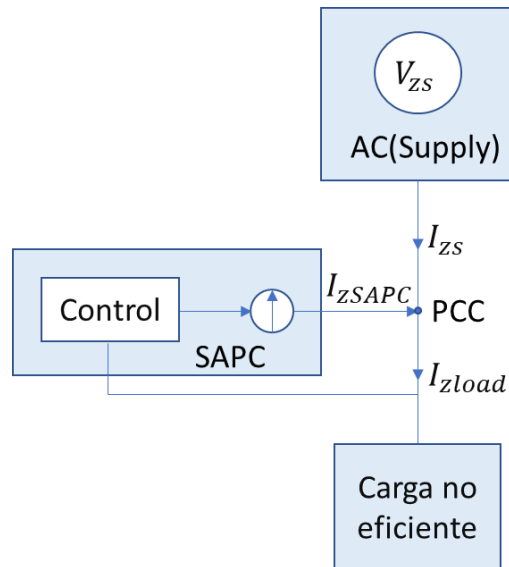
En conclusión, el Std. 1459 de la IEEE [1] indica que la potencia aparente ( $S_e$ ) se puede resumir en 2 componentes una es la potencia activa fundamental de secuencia positiva  $P_1^+$  que es la potencia eficiente aprovechada por la carga y el resto de términos de la potencia activa ( $P_1^-$ ,  $P_1^0$  y  $P_H$ ) junto con los términos de la potencia reactiva ( $Q_1^+$ ,  $Q_1^-$ ,  $Q_1^0$  y  $Q_H$ ), junto con los términos de potencia relacionados con el desequilibrio de corrientes y/o asimetría de tensión ( $S_1^+$ ,  $S_1^-$  y  $S_1^0$ ), junto con los términos de potencia relacionados a la distorsión de corriente y/o tensión ( $S_{eN}$ ,  $D_{eI}$ ,  $D_{eV}$  y  $S_{eH}$ ) sería la potencia no eficiente generada por ciertos fenómenos del sistema eléctrico.

### 2.3. Convertidores de potencia DC/AC en sistemas trifásicos a cuatro hilos.

En los sistemas trifásicos, un convertidor DC/AC conectado en paralelo a la red, sería utilizado para la inyección de potencia eficiente cuando se conecta a un sistema de generación distribuida y utilizado para la compensación de potencia no eficiente, determinando así su operación en modo híbrido de generación – compensación aprovechando sus características de bidireccionalidad.

Los Shunt Active Power Compensator (SAPC) son equipos electrónicos basados en convertidores de potencia conmutados y son utilizados para eliminar o reducir los efectos de la potencia reactiva, armónicos y desequilibrio que son generados por las cargas y retornan a la red, para que visto desde el punto de conexión del compensador el sistema formado por el propio compensador y la instalación se comporten como un sistema eficiente.

En la *Figura 2-6* el SAPC se conecta en el PCC, actuando como fuente de corriente controlada, suministrando así a la carga las componentes de corriente que requiera. Este compensador debe de colocarse lo más cerca posible a la carga. Se consideran los flujos de corriente según:



**Figura 2-6 SAPC y flujo de corrientes**

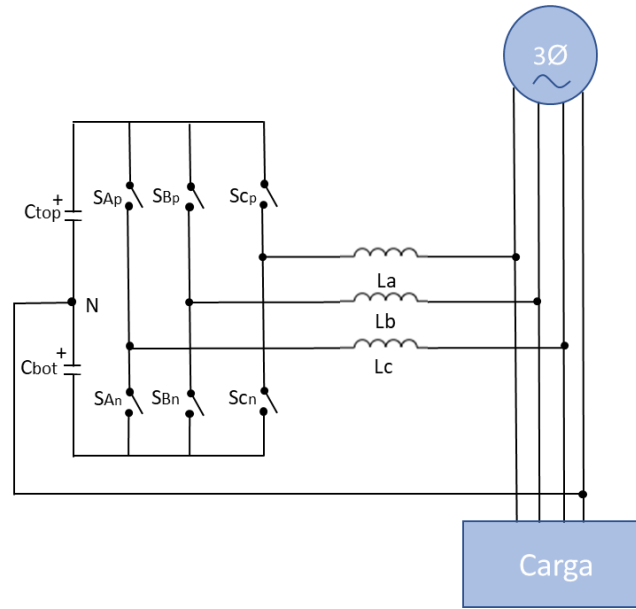
En donde  $I_{zs}$  es la corriente consumida por la red de suministro (medida entre el generador y el PCC) y que dependiendo de la estrategia de compensación esta va a ser total o parcialmente sin distorsiones.  $I_{zload}$  es la corriente consumida aguas arriba del PCC.  $I_{zSAPC}$  es la corriente suministrada por el compensador, alcanzando un valor inferior a la corriente cuando el convertidor alcanza su potencia máxima. El diseño de un compensador activo teniendo en cuenta las definiciones incluidas en IEEE Std. 1459 deberá utilizar la tensión de secuencia positiva  $V_1^+$  en el punto de conexión como referencia para el cálculo de las corrientes de compensación del Sistema *Figura 2-4*.

El SAPC está formado por 5 bloques funcionales [28]:

- El convertidor de potencia (inversor): Equipo compuesto generalmente por interruptores tales como IGBT's (Insular Gate Bipolar Transistor) conectados en antiparalelo a diodos que permiten el flujo de corriente en ambas direcciones y el establecimiento de tensión en una dirección.

Existen dos topologías de convertidores: CSI (Current Source Inverter) y VSI (Voltage Source Inverter), las cuales han sido ampliamente estudiadas, para el desarrollo de filtros activos, siendo la más utilizada la configuración en VSI, debido a su eficiencia y costos de fabricación [27]. Estos convertidores presentan diferentes topologías, pudiendo ser convertidores de dos niveles o convertidores multinivel. Los convertidores de dos niveles han sido difundidos ampliamente en aplicaciones de baja tensión y para el control de motores de inducción, mientras que los convertidores multinivel son utilizados principalmente en aplicaciones que requieren alta tensión y están empezando a utilizarse en otros convertidores de potencias altas (inversores fotovoltaicos, variadores de velocidad, etc.).[22]

Para el presente trabajo se considera un convertidor de dos niveles con tres ramas y cuatro hilos como se muestra en la *Figura 2-7* conectado al PCC. Donde se tiene los interruptores  $S_{Ap}$  y  $S_{An}$  en la rama de la fase a, los interruptores  $S_{Bp}$  y  $S_{Bn}$  en la rama de la fase b y los interruptores  $S_{Cp}$  y  $S_{Cn}$  en la rama de la fase c.



**Figura 2-7 Convertidor de potencia de dos niveles**

El convertidor de potencia es encargado de:

- Mantener la tensión del bus DC estable a través del control de la tensión de referencia con ayuda de un regulador PI, inyectando o absorbiendo corriente activa en el PCC.
- Inyectar potencia activa en el PCC cuando en el lado del bus de continua se conecte una fuente generadora de energía y mientras no se alcance la totalidad de la capacidad del convertidor de conexión a red.
- Inyectar corrientes de compensación de ineficiencias. Este compensador, aprovechando la potencia aparente disponible del convertidor deberá permitir la compensación en forma independiente o en cualquier combinación, de los fenómenos de desequilibrio, desfase y distorsión, dependiendo del grado de afectación sobre la red.

b. El enlace de corriente entre el convertidor y el punto de conexión con la red.

En los convertidores con la estructura de inversor en fuente de tensión, es necesario conectar una inductancia de acoplamiento  $L_a$ ,  $L_b$  y  $L_c$  entre la red eléctrica y el convertidor, para que el conjunto se comporte como una fuente de corriente, ya que el convertidor y su condensador, situado en el lado de DC, actúan como una fuente de tensión, por lo que su conexión directa a la red de potencia sería inadecuada.

c. El dispositivo de almacenamiento de energía conformado por los condensadores  $C_{top}$  y  $C_{bot}$  conectados en serie hacen el bus de continua, donde el punto medio de estos es conectado con el neutro de la carga y la red eléctrica. Como se había indicado anteriormente, esta etapa presenta un regulador PI para controlar la tensión del bus DC. Los parámetros del regulador han sido seleccionados de las pruebas experimentales realizadas en la tesis de Martínez [2]. Su acción de control es la corriente para mantener el bus DC cargado y se adiciona a la corriente de

compensación de ineficiencias de la carga. En el caso de que el sistema funcione en modo generador la tensión del bus varía en función del balance entre la corriente de entrada y la de salida del bus de continua [5].

En la topología a cuatro hilos al estar el neutro de la carga conectado con el punto medio del bus DC, las tres ramas del convertidor trabajan de manera independiente; es decir, la tensión de salida de cada rama depende únicamente del estado de conmutación de sus dos interruptores. Facilitando el control de la tensión de salida que es la ventaja principal de este tipo de convertidor.

- d. Los dispositivos de acondicionamiento de señales provenientes del sistema de potencia.
- e. El controlador puede ser un procesador digital de señal o DSP que a partir de las medidas de voltaje y corriente de la carga que se procesan mediante algoritmos apropiados.

El sistema de control del SAPC determina en tiempo real las corrientes de referencia que el SAPC debe inyectar en el PCC para compensar todo o una parte de las ineficiencias, mantener el bus DC cargado y/o inyectar potencia activa como se detalla más adelante, a través del accionamiento on-off de los semiconductores de la etapa de potencia hacemos un control por banda de histéresis. El control por banda de histéresis de amplitud fija hace que la corriente instantánea siga al valor de referencia calculado con la teoría de potencia instantánea añadiéndole o restándole el valor de tolerancia de la histéresis. Cuando la corriente instantánea llega al límite superior de la banda hace que haya un accionamiento inverso entre los semiconductores de la parte superior e inferior de la rama, independientemente por cada fase ( ver *Figura 2-7*). Cuando el semiconductor pasa a off hace que descienda el valor de la corriente instantánea y cuando llega al límite inferior de la banda hace que el semiconductor pase a on incrementado nuevamente el valor de la corriente instantánea.

Una desventaja de este tipo de control por banda de histéresis es que no se puede controlar la frecuencia de conmutación de los semiconductores, muy por el contrario es fácil de implementar.

El modelo matemático del control de corriente por banda de histéresis fija es:

$$BH_+ = i + \Delta i \quad (2-61)$$

$$BH_- = i - \Delta i$$

Donde:

$BH_+$ : valor del límite superior de la banda

$BH_-$ : valor del límite inferior de la banda

$i$ : valor de corriente instantánea

$\Delta i$ : valor de tolerancia de la histéresis

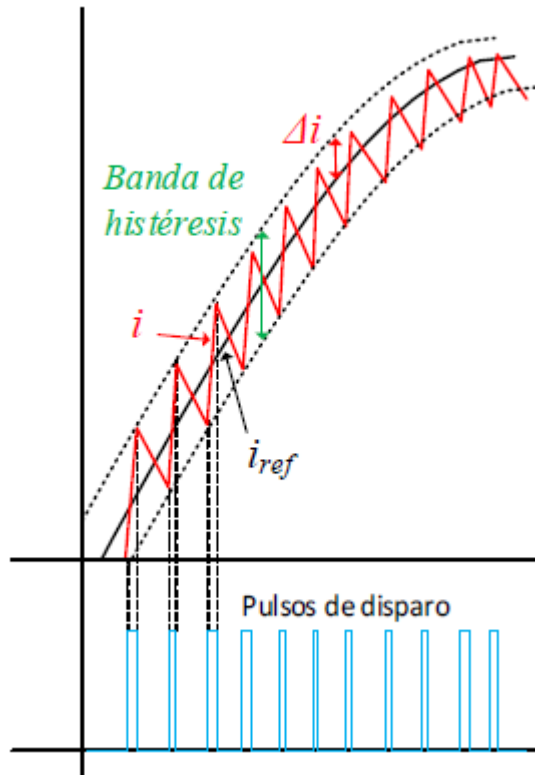


Figura 2-8 Forma de onda del control por banda de histéresis con banda fija [2]

En la Figura 2-8 muestra como la corriente de control del convertidor que sigue a la corriente de referencia y cuando la corriente de control llega a uno de los límites inferior o superior de la banda, genera una secuencia de pulsos de disparo de los semiconductores de Figura 2-7.

Según [26] aplicar una teoría de potencia instantánea consiste en calcular las diferentes componentes de la potencia instantánea solicitada por la carga y entonces aislar aquellas componentes que deberán ser aportadas por el SAPC.

#### 2.4. Estrategias para la compensación de potencia no eficiente por el SAPC

En la actualidad, se utilizan diversas estrategias para la compensación de potencia ineficiente mediante SAPC's, entre las cuales se encuentran:

- a. La estrategia de compensación global: es la estrategia en la que el SAPC es capaz de suministrar el total de las corrientes no eficientes que demanda la carga.

Luego de la compensación, el conjunto formado por la carga y el SAPC alcanzan máxima eficiencia solo cuando se consume de la red eléctrica la corriente activa fundamental de secuencia positiva  $I_1^{+a}$  que está en fase con el voltaje fundamental de secuencia positiva  $V_1^+$  de la red, es decir cuando de la red eléctrica solo inyecte corriente senoidal, dando lugar a la compensación global de ineficiencias.[2]

Cuando se cumplan (2-62) y (2-64) es posible aplicar el método de compensación global. Donde la potencia aparente  $S_{SAPC}$  generada por el SAPC es mayor que la potencia generada por los fenómenos ineficientes y es menor que la corriente máxima del inversor  $i_{inv\_max}$ :

$$S_{SAPC} > \sqrt{(Q_1^+)^2 + (S_{U1})^2 + (S_{eN})^2} \quad (2-62)$$

$$I_{zSAPC} < i_{inv\_max} \quad (2-63)$$

Bajo esta condición, la corriente generada por el SAPC ( $I_{zSAPC}$ ) tiene que suministrar toda la corriente que requiere la carga ( $I_{zload}$ ) excepto la componente de corriente activa fundamental de secuencia positiva ( $I_{zload1}^{+a}$ ), debido a que esta componente es suministrada por la red eléctrica resultando un sistema eficiente.

Como está representado en la *Figura 2-6*, tenemos en el PCC la corriente de compensación generada por el SAPC :

$$I_{zSAPC} = I_{zload} - I_{zload1}^{+a} \quad (2-64)$$

El subíndice z representa las fases del sistema eléctrico (z=a,b,c). Si se cumple dicha igualdad en las 3 fases se genera una compensación global de las ineficiencias. Definiendo la corriente activa fundamental de secuencia positiva requerida por la carga según [2], como:

$$I_{zload1}^{+a} = \sqrt{2} I_{zload1}^+ \cos \theta_1^+ \cdot \sin(\omega_1 t + \alpha_{z1}^+ + \varphi_{z1}^+) \quad (2-65)$$

- b. La estrategia de compensación selectiva: con esta estrategia se identifica cada corriente no eficiente de la carga y el SAPC las inyecta dependiendo lo que el algoritmo de control determine.

Como ya se ha visto los convertidores electrónicos no tienen la capacidad de suministrar potencia de manera ilimitada estableciendo el límite de la potencia a compensar, presentándose un problema al querer una estrategia de compensación global en sistemas de potencia. Siendo de gran utilidad la estrategia de compensación selectiva, donde el compensador consigue la mitigación de cada fenómeno de manera independiente o combinada de acuerdo con criterios de selectividad.

Cuando se da la condición (2-66) donde la potencia aparente  $S_{SAPC}$  suministrada por el SAPC es inferior a la potencia generada por los fenómenos ineficientes es útil aplicar la compensación selectiva.

$$S_{SAPC} < \sqrt{(Q_1^+)^2 + (S_{U1})^2 + (S_{eN})^2} \quad (2-66)$$

El SAPC es el encargado de inyectar a la carga de acuerdo a su capacidad parte de la corriente debido a los fenómenos ineficientes, haciendo necesario que la red eléctrica suministra una corriente  $I_{zS}$  compuesta de otros términos diferentes a  $I_{zload1}^{+a}$  generados por los fenómenos ineficientes.

Bajo esta condición es necesario estudiar de que manera se puede optimizar el uso de la potencia aparente disponible del SPAC para compensar los fenómenos ineficientes que causan mayor impacto en la calidad de la red y disminuirlos.

#### 2.4.1. Flujo de potencias e identificación de corrientes de referencia para la compensación de fenómenos no eficientes

Bajo la filosofía seguida por el grupo de trabajo de la IEEE se separa la potencia aparente en términos de la potencia activa fundamental de secuencia positiva  $P_1^+$ , siendo esta la única que se transforma en energía útil para la carga. Las potencias activas debidas a la distorsión armónica y a las componentes fundamentales de secuencia inversa y homopolar se consideran contaminantes y se engloban junto con el resto de las potencias ineficientes como  $Q_1^+$ ,  $S_{eN}$  y  $S_{U1}$ , puesto que no transportan energía útil a la carga y se transforman en pérdidas en el sistema eléctrico. El diseño de un compensador activo teniendo en cuenta las definiciones incluidas en la IEEE Std. 1459 deberá utilizar la medición de corrientes de la carga  $I_{zload}$  y las tensiones en el PCC para realizar el cálculo de las corrientes que compensarán las ineficiencias aguas arriba del PCC. [16]-[29].

Por todo ello descomponemos la corriente de la carga  $I_{zload}$  en corriente fundamental  $I_{zload1}$  y corriente armónica  $I_{zloadH}$ , teniendo:

$$I_{zload} = I_{zload1} + I_{zloadH} \quad (2-67)$$

Despejando (2-67) (2-64) y según [22] obtenemos la corriente instantánea de compensación debido a la distorsión armónica que debe ser suministrada por el SAPC :

$$I_{zSAPC} = I_{zload} - I_{zload1} \quad (2-68)$$

$$I_{zSAPC} = I_{zload} - \sqrt{2} \cdot I_{zload1} \sin(\omega_1 t + \phi_{I_{z1}}) \quad (2-69)$$

Donde  $\phi_{I_{z1}}$  es el desfase de la corriente fundamental en cada fase respecto del voltaje.

Por lo tanto, la corriente  $I_{zSAPC}$  va a ser utilizada para compensar los efectos de las corrientes armónicas de la carga, ocasionando una reducción en la potencia efectiva no fundamental aparente  $S_{eN}$ . Mientras que los otros términos de potencia de (2-58) la potencia reactiva fundamental de secuencia positiva  $Q_1^+$ , la potencia aparente desbalanceada  $S_{U1}$  y la potencia activa fundamental de secuencia positiva  $P_1^+$  permanecen sin verse afectados por la compensación.



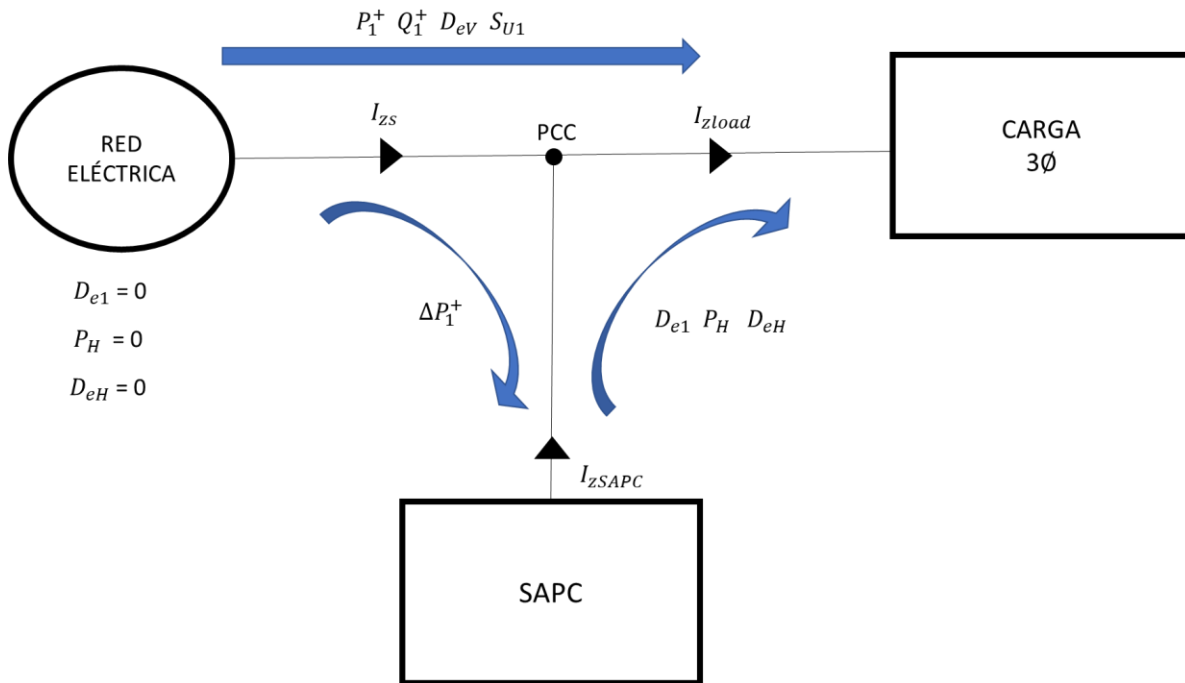


Figura 2-9 Corrientes y potencias en el sistema eléctrico con un SAPC compensando  $D_{eI}$

De la descomposición de potencias propuesta por la IEEE en el Std. 1459, se tiene que  $S_{eN}$  representa la potencia aparente no fundamental debido a componentes no fundamentales de tensiones y corrientes expresada por la sumatoria de la potencia efectiva de distorsión de corriente  $D_{eI}$ , la potencia efectiva de distorsión de voltaje  $D_{eV}$  y la potencia aparente armónica  $S_{eH}$ . Así mismo la  $S_{eH}$ , se descompone en potencia activa armónica  $P_H$  y potencia de distorsión armónica  $D_{eH}$ .

La  $D_{eI}$  y  $P_H$  dependen de la corriente armónica eliminada, por eso estas potencias son cancelada totalmente del suministro de la red eléctrica. Por ello,  $S_{eN}$  suministrada por el SAPC se reducirá a un valor igual a la sumatoria de  $D_{eI}$ ,  $P_H$  y  $D_{eH}$ .

$P_1^-$  y  $P_1^0$  componentes debido a los desequilibrios de corriente y asimetría de tensiones en la red, son las componentes de  $S_{U1}$ .

Por otro lado,  $P_H$  es una componente de la potencia activa total  $P$  al igual que  $P_1^+$ ,  $P_1^-$  y  $P_1^0$ .

Como el SAPC suministra el termino de potencia activa no útil  $P_H$  demandado por la carga es necesaria la utilización de un regulador de tensión que obtendrá las corrientes de compensación.

Es por esto que el SAPC toma de la red eléctrica un valor  $\Delta P_1^+$  correspondiente a la potencia activa para el mantenimiento del bus DC, suministro de  $P_H$  demandado por la carga y pérdidas de potencia internas.

Si analizamos la descomposición de la corriente fundamental  $I_{zload1}$  requerida por la carga, tenemos:

$$I_{zload1} = I_{zload1}^+ + I_{zload1}^- + I_{zload1}^0 \quad (2-70)$$

Descomponiendo aún más la  $I_{zload1}^+$  en componentes ortogonales de activa y reactiva, tenemos la corriente activa fundamental de secuencia positiva  $I_{zload1}^{+a}$  en fase con el voltaje fundamental de secuencia positiva  $V_{z1}^+$  y la corriente reactiva fundamental de secuencia positiva  $I_{zload1}^{+r}$  con desplazamiento de  $90^\circ$  respecto de  $V_{z1}^+$ .

$$I_{zload1}^+ = I_{zload1}^{+a} + I_{zload1}^{+r} \quad (2-71)$$

$$I_{zload1} = I_{zload1}^{+a} + I_{zload1}^{+r} + I_{zload1}^- + I_{zload1}^0 \quad (2-72)$$

Teniendo en consideración que  $P_1^+$  y  $Q_1^+$  están asociadas a las corrientes y tensiones de secuencia directa y utilizando la transformación de Stokvis-Fortescue para descomponer la corriente fundamental de carga  $I_{zload1}^{+a}$  en sus componentes simétricas, se calcula:

$$P_1^+ = 3V_1^+ I_1^+ \cos\theta_1^+ \quad (2-73)$$

$$Q_1^+ = 3V_1^+ I_1^+ \sin\theta_1^+ \quad (2-74)$$

$$\theta_1^+ = \phi_{V_1^+} - \phi_{I_1^+} \quad (2-75)$$

Según la IEEE Std.1459 a  $I_{zload1}^{+r}$  se identifica como causante del fenómeno de desfase entre la corriente y el voltaje suministrada a la carga. Por lo tanto el SAPC debe ser el encargado de suministrar la corriente  $I_{zload1}^{+r}$ , suprimiendo la potencia reactiva fundamental  $Q_1^+$  suministrada en el PCC por la red eléctrica. Mientras que los otros términos de potencia de (2-58) la potencia activa fundamental de secuencia positiva  $P_1^+$ , la potencia aparente desbalanceada  $S_{U1}$  y la potencia efectiva no fundamental aparente  $S_{eN}$ . permanecen sin verse afectados por la compensación. El SAPC toma de la red eléctrica un valor  $\Delta P_1^+$  correspondiente a la potencia activa para el mantenimiento del bus DC. La expresión de  $I_{zload1}^{+r}$  instantánea puede obtenerse de [22]:

$$I_{zSAPC} = I_{zload1}^{+r} \quad (2-76)$$

$$I_{zSAPC} = \sqrt{2}[I_1^+ \cdot \sin(\theta_1^+)] \cdot \sin\left(\omega_1 t + \varphi_{z1}^+ - \frac{\pi}{2}\right) \quad (2-77)$$

Donde  $\varphi_{z1}^+$  es el desfase de secuencia positiva correspondiente a las tensiones de cada fase ( $0^\circ, 120^\circ, -120^\circ$ )

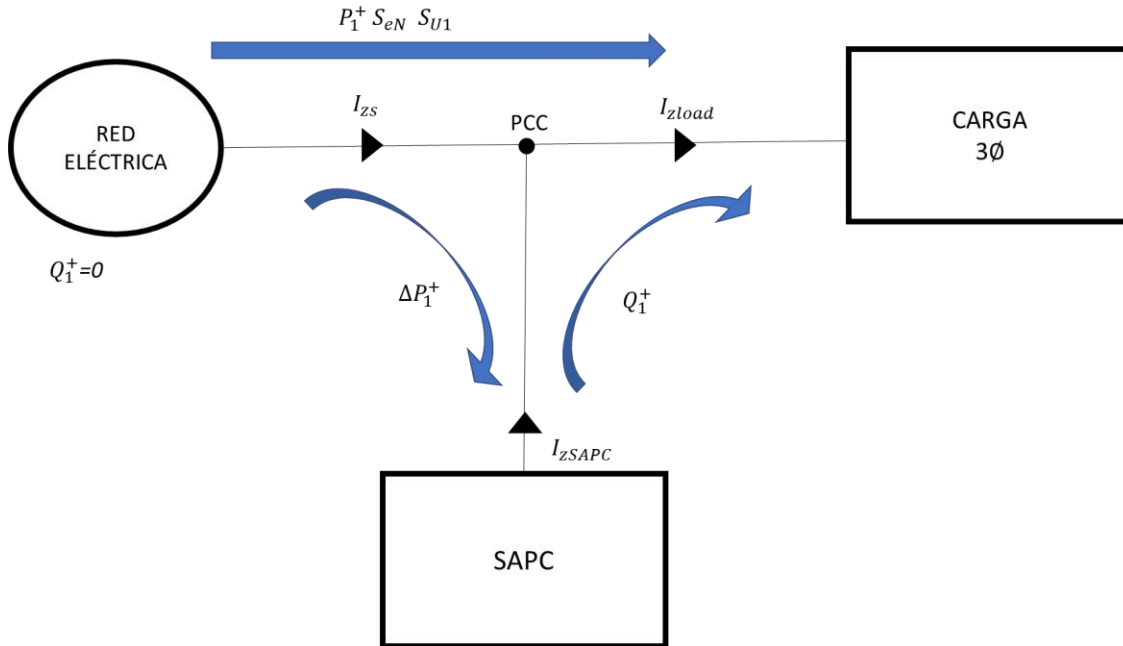


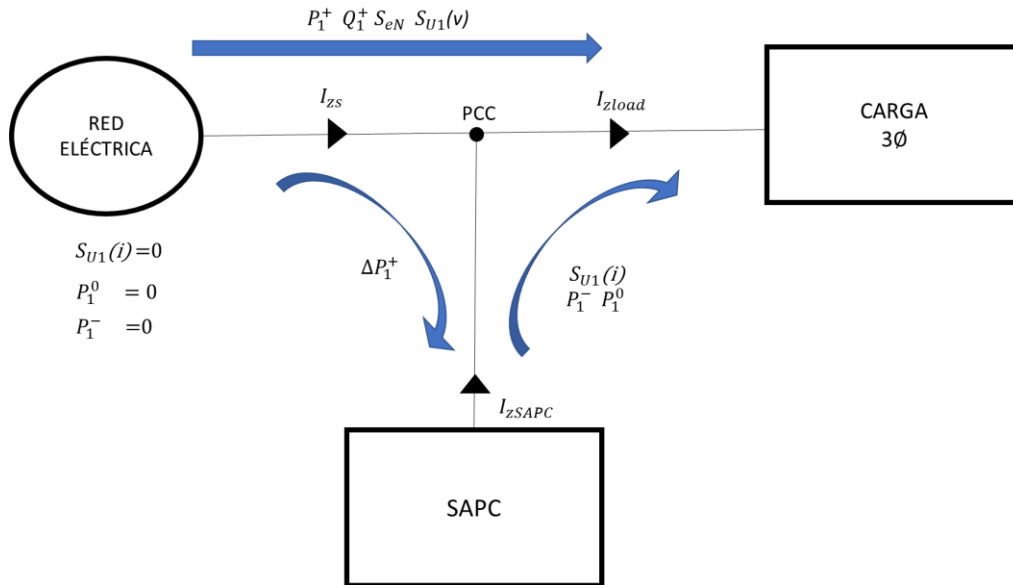
Figura 2-10 Flujos de corriente y potencias en el sistema con un SAPC compensando  $Q_1^+$

De la descomposición de potencias propuesta por la IEEE en el Std. 1459, el suministro de la corriente reactiva fundamental de secuencia positiva por el SAPC hace que la red eléctrica ya no la suministre, sin embargo la red eléctrica continúa suministrando  $P_1^+$ ,  $S_{eN}$  y  $S_{U1}$ .

De la descomposición de corrientes requerida por la carga (2-70)(2-72) se analiza el efecto de las corrientes fundamentales de secuencia inversa y homopolar, que son los indicadores de los desequilibrios de corriente en la carga. Por lo tanto el SAPC debe ser el encargado de suministrar la corriente de (2-79)(2-77) asociada a la potencia  $S_{U1}$  suprimiendo esta potencia de la red eléctrica. Mientras que los otros términos de potencia de (2-58) la potencia activa fundamental de secuencia positiva  $P_1^+$ , la potencia aparente desbalanceada  $S_{U1}$  y la potencia efectiva no fundamental aparente  $S_{eN}$  permanecen sin verse afectados por la compensación. La expresión de la corriente instantánea de compensación debido a desequilibrios puede obtenerse de [22]:

$$I_{zSAPC} = I_{zload1}^- + I_{zload1}^0 \quad (2-78)$$

$$I_{zSAPC} = \sqrt{2}[I_{zload1} \sin(\omega_1 t + \phi_{I_{z1}}) - I_1^+ \sin(\omega_1 t + \theta_1^+ + \phi_{z1}^+)] \quad (2-79)$$



**Figura 2-11** Flujos de corriente y potencias en el sistema con un SAPC compensando  $S_{U1}$  debido al desequilibrio de corrientes

De la descomposición de potencias propuesta por la IEEE en el Std. 1459 y [30], se indica que la potencia  $S_{U1}$  está compuesta por las potencias producidas por el desequilibrio de corrientes demandado por la carga y/o las producidas por el desequilibrio de voltajes debido al voltaje asimétrico de la red y/o por la combinación de ambos fenómenos.

Entonces si se presentasen ineficiencias a causa de los asimetrías de tensión de la red eléctrica estos no podrán ser compensados ya que dependen única y exclusivamente a la red. Mientras que, si se presentaran ineficiencias a causa de los desequilibrios de corriente, esta ineficiencia podrá ser compensada en su totalidad por el SAPC. Cuando esto ocurre  $S_{U1}$  se ve reducido un valor equivalente a la sumatoria de las potencias activas residuales ( $P_1^-$  y  $P_1^0$ ) por las corrientes desequilibradas.

Como se mencionó,  $P_H$  es una componente de la potencia activa total  $P$ , además de la potencia activa fundamental de secuencia positiva  $P_1^+$ , inversa  $P_1^-$  y homopolar  $P_1^0$ . El hecho de que sea el SAPC quien entregue parte de potencia activa  $P_1^-$  y  $P_1^0$  a la carga, hará necesaria la utilización de un regulador de tensión que obtendrá las corrientes de compensación [2] Es por esto que el SAPC toma de la red eléctrica un valor  $\Delta P_1^+$  para mantener el bus DC cargado y además suministrar  $P_1^-$  y  $P_1^0$  a la carga.

Por otro lado la red eléctrica continúa suministrando  $P_1^+$ ,  $Q_1^+$ ,  $S_{eN}$  y  $S_{U1}(v)$ , siendo  $S_{U1}(v)$  un valor equivalente a la potencia generada por las tensiones desequilibradas si es que las hubieran.

Las corrientes de compensación de acuerdo a cada fenómeno ineficiente calculadas en este apartado en términos de sus valores instantáneos se renombran y se resumen en :

Fenómeno	Corriente de compensación
Distorsión (2-69)	$i_{zH\_SAPC} = I_{zload}(t) - \sqrt{2} \cdot I_{zload1} \sin(\omega_1 t + \phi_{I_{z1}})$
Desfase (2-77)	$i_{zQ1\_SAPC} = \sqrt{2}[I_1^+ \cdot \sin(\theta_1^+)] \cdot \sin\left(\omega_1 t + \varphi_{z1}^+ - \frac{\pi}{2}\right)$
Desequilibrio (2-79)	$i_{zU1\_SAPC} = \sqrt{2}[I_{zload1} \sin(\omega_1 t + \phi_{I_{z1}}) - I_1^+ \sin(\omega_1 t + \theta_1^+ + \varphi_{z1}^+)]$

**Tabla 2-1 Corrientes de compensación basadas en IEEE Std. 1459-2010**

Una vez identificados los términos de corriente correspondientes a cada una de las potencias expresadas en el IEEE Std. 1459-2010 se puede tener una expresión que contenga los fenómenos no eficientes de manera global como:

$$i_{z\_SAPC} = i_{zQ1\_SAPC} + i_{zU1\_SAPC} + i_{zH\_SAPC} \quad (2-80)$$

$i_{z\_SAPC}$  es la corriente instantánea por fase que debe inyectar el SAPC para corregir los fenómenos no eficientes que genere la carga conectada al PCC y de esta manera eliminar su efecto aguas arriba del PCC.

$i_{zH\_SAPC}$  es la corriente instantánea no fundamental por fase demandada por la carga para compensar  $S_{eN}$ .

$i_{zQ1\_SAPC}$  es la corriente reactiva instantánea fundamental de secuencia positiva por fase demandada por la carga para compensar  $Q_1^+$ .

$i_{zU1\_SAPC}$  es la corriente instantánea fundamental de desequilibrio por fase demandada por la carga para compensar  $S_{U1}$ .

#### **2.4.2. Corriente de compensación para SAPC con estrategia de compensación selectiva y generación de potencia activa**

Teniendo en cuenta que los compensadores activos no disponen de una potencia infinita, cuando la magnitud de las potencias no eficientes a compensar supere a la máxima potencia aparente disponible en el compensador, puede resultar más beneficioso utilizar la potencia aparente disponible en corregir uno u otro fenómeno no eficiente, ya sea por separado o alguna combinación de los mismos.

La capacidad de elegir uno u otro fenómeno no eficiente para compensar por el SAPC, se denominará compensación selectiva.

Para lograr este funcionamiento selectivo en la compensación es necesaria la correcta identificación de los fenómenos no eficientes y la determinación de las corrientes de compensación independientes para cada fenómeno no eficiente, basándose en la descomposición de potencias definida en la IEEE Std. 1459.

Según el IEEE Std. 1459-2010, la potencia aparente del convertidor se desglosa en :

$$S_e = \sqrt{(P_1^+)^2 + (Q_1^+)^2 + (S_{U1})^2 + (S_{eN})^2} \quad (2-81)$$

La potencia activa fundamental  $P_1^+$  indica la potencia utilizada por el convertidor para mantenimiento del bus DC y si el convertidor está trabajando en modo híbrido además indica la potencia activa absorbida por la red eléctrica y/o carga desde el convertidor. El optimizar la capacidad del convertidor significa el aprovechar el uso de la potencia aparente disponible del convertidor, añadiendo a la potencia activa fundamental  $P_1^+$  el valor total o parcial de la magnitud de potencias ineficientes medidas en el PCC de acuerdo a (2-82).

En el ítem anterior se identificó las corrientes asociadas a cada potencia ineficiente. De (2-80) tomando en cuenta que existe un límite en la compensación de corriente ineficiente por el inversor se determina un factor para cada una de las corrientes que componen la corriente de compensación de ineficiencias entregada por el SAPC:

$$i_{z\_SAPC} = K_Q \cdot i_{zQ1\_SAPC} + K_U \cdot i_{zU1\_SAPC} + K_H \cdot i_{zH\_SAPC} \quad (2-82)$$

Donde  $K_Q$ ,  $K_U$  y  $K_H$  son los coeficientes que varían de 0 a 1 y escalan los valores de la corriente de compensación de potencia reactiva fundamental de secuencia positiva debido al desfase, potencia aparente de desequilibrio y potencia aparente no fundamental debido a armónicos de corriente respectivamente. El algoritmo para el cálculo de estos coeficientes será materia de trabajo en el capítulo siguiente, desarrollado bajo el criterio de selectividad basado en el equilibrado de potencias con la finalidad de lograr la máxima reducción de la potencia aparente efectiva aguas arriba del PCC. Si el coeficiente toma valor de 0 significa que su corriente de compensación asociada se elimina. Si el coeficiente toma el valor de 1 significa que su corriente de compensación asociada será inyectada totalmente a la carga. Los coeficientes de escalado para cada una de las corrientes ineficientes que se aplica por igual a cada fase son:

$K_Q$  : Coeficiente para el escalado de  $i_{zQ1\_SAPC}$  donde puede ser  $0 \leq K_Q \leq 1$

$K_U$  : Coeficiente para el escalado de  $i_{zU1\_SAPC}$  donde puede ser  $0 \leq K_U \leq 1$

$K_H$  : Coeficiente para el escalado de  $i_{zH\_SAPC}$  donde puede ser  $0 \leq K_H \leq 1$

Sabiendo que el convertidor al trabajar en modo híbrido de generación – compensación puede inyectar corriente activa fundamental de secuencia positiva y además la corriente de compensación de ineficiencias determinada por el algoritmo, se tiene la expresión de corriente que debe de generar el convertidor de conexión a red:

$$i_{z\_inv} = I_{z1}^{+a} + i_{z\_SAPC} \quad (2-83)$$

Aplicando las corrientes de compensación con sus coeficientes de escalamiento se tiene la corriente de referencia  $i_{z\_ref}$ :

$$i_{z\_ref} = i_{z\_inv} = K_Q \cdot i_{zQ1\_SAPC} + K_U \cdot i_{zU1\_SAPC} + K_H \cdot i_{zH\_SAPC} + I_{z1}^{+a} \quad (2-84)$$

Esta expresión es válida siempre y cuando se cumpla que  $i_{z\_ref} < i_{z\_inv\_max}$ .

# CAPÍTULO 3

## 3. Sistema propuesto

Se debe tener presente sobre qué sistema se implementa el algoritmo de selectividad para compensar ineficiencias. El sistema es un convertidor DC/AC conectado en paralelo a una red eléctrica trifásica a 4 hilos con una carga que puede variar. Para decir que el convertidor DC/AC funciona en un sistema híbrido de generación/ compensación, se debe considerar en el esquema del SAPC descrito en el capítulo anterior que los dispositivos de almacenamiento del bus DC se conectan en paralelo a un sistema generador de energía capaz de transferir energía generada a la red eléctrica, funcionando como una fuente de corriente conectado al bus DC del convertidor.

La fuente generadora de energía puede ser un sistema de generación de energía renovable como un campo fotovoltaico o un sistema de generación eólica.

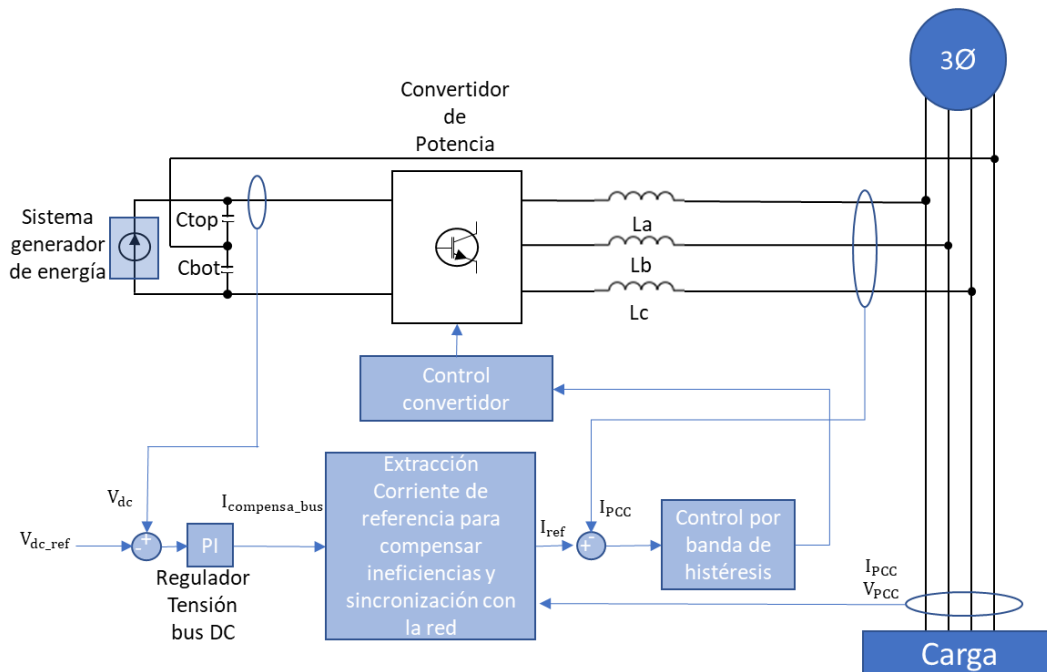
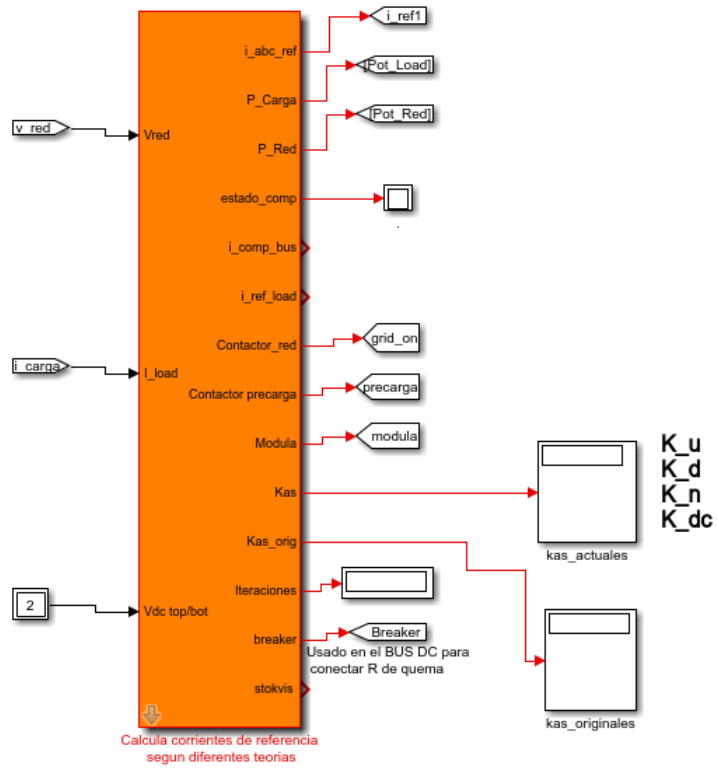
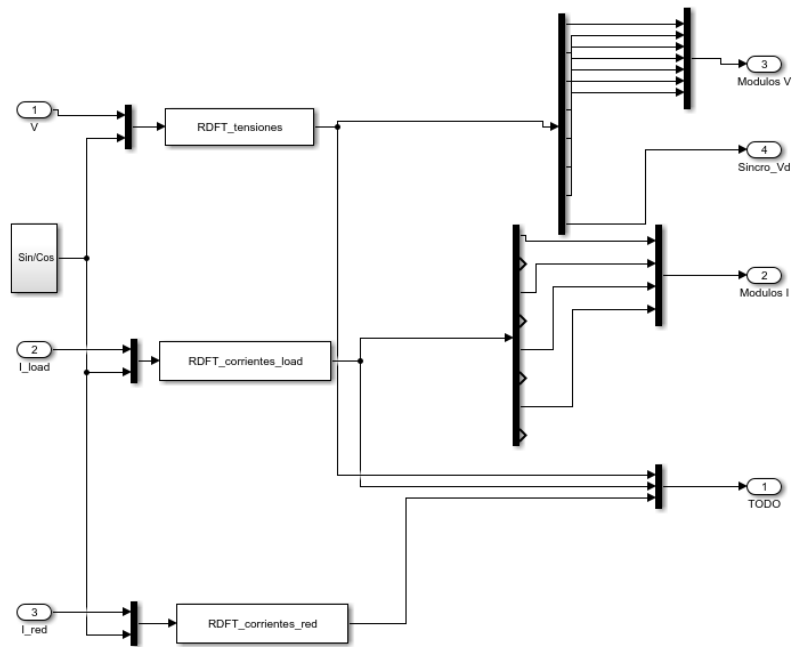


Figura 3-1 Arquitectura del modelo de simulación simplificada

Es así como se definen los modelos para implementarlos bajo la plataforma de simulación Matlab/Simulink. Utilizando la librería Simscape / Power Systems que sirve para simular y analizar sistemas de potencia. El cálculo de las corrientes de referencia, potencias, coeficientes de escalamiento y control de corriente por banda de histéresis se realiza a través de funciones programadas de Matlab, que se detallan más adelante.



(a)



(b)



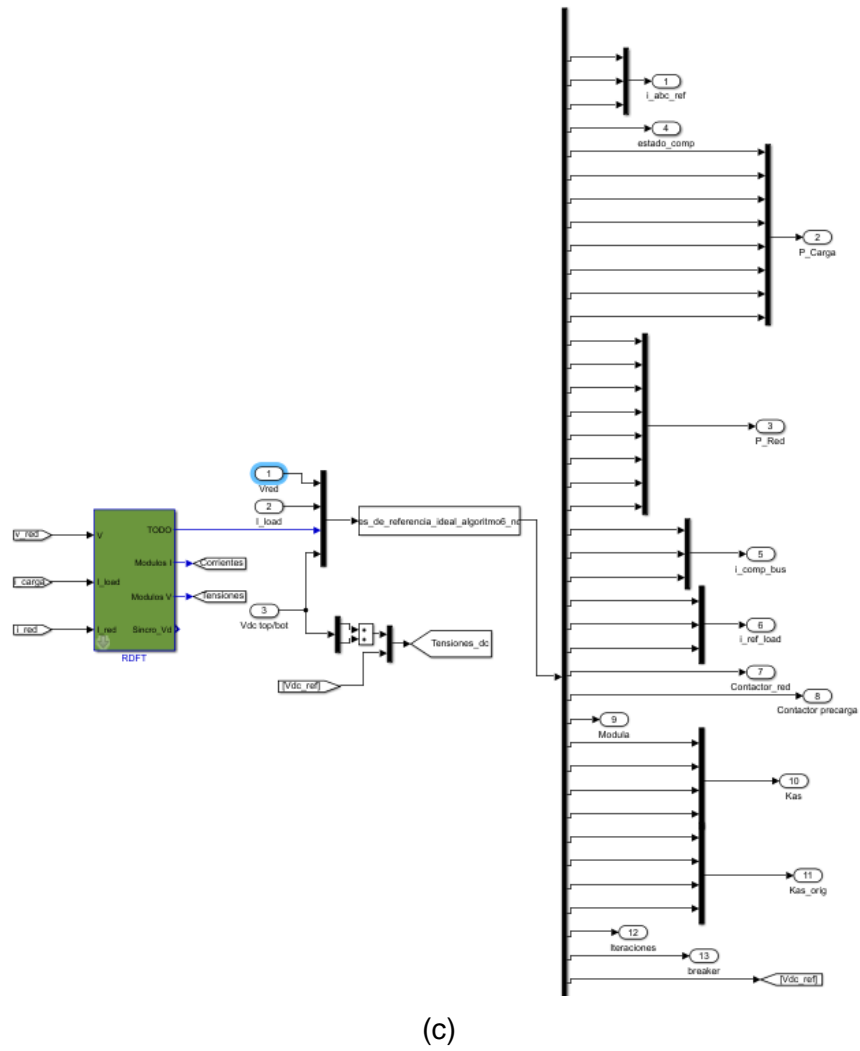
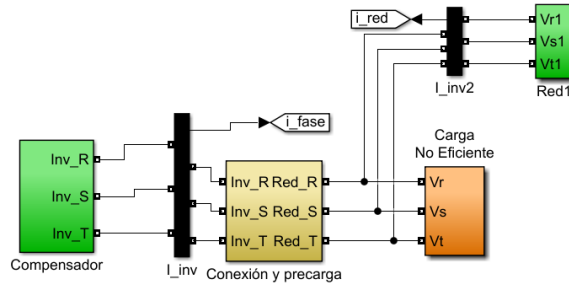


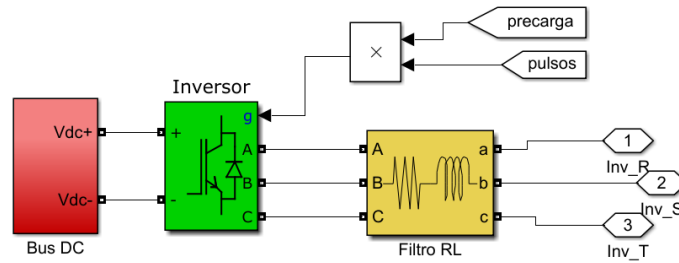
Figura 3-2 Modelo de simulación para la validación del sistema híbrido de generación- compensación propuesto. (a) Bloque de cálculo de corrientes de referencia. (b) Cálculo RFFT. (b) Cálculo de corrientes de referencia



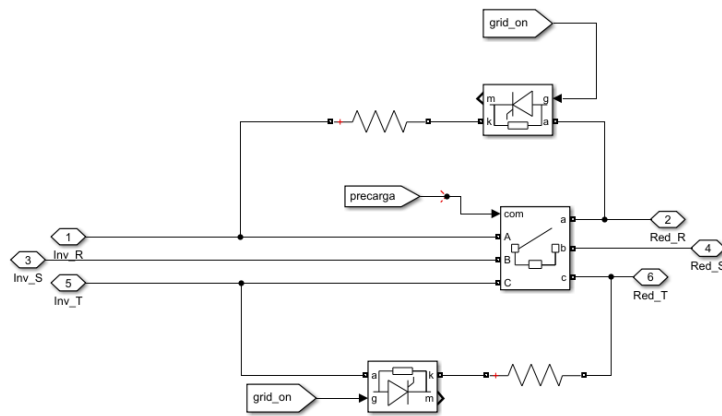
Figura 3-3 Bloque de control de corriente del convertidor



(a)



(b)



(c)

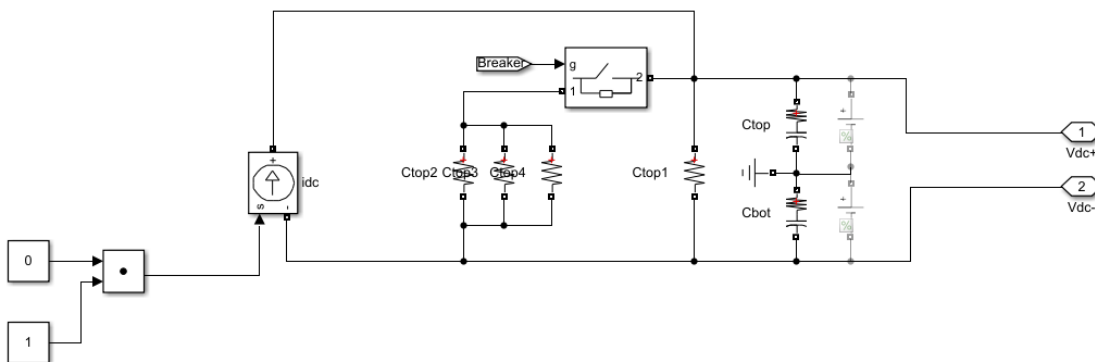
**Figura 3-4 (a) Modelo de conexión del SAPC en el PCC (b) Modelo compensador  
(c) Modelo conexión y precarga**

El modelo del SAPC propuesto es un inversor trifásico de dos niveles a cuatro ramas con hilo neutro, bus DC con toma media y conexión a red mediante filtro inductivo. Ya que con esta configuración se pueden simular tensiones y corrientes que contengan secuencia homopolar. El bus DC según valores experimentales de [22] está formado por un banco de condensadores en serie de capacidad total igual a 7mF siendo la capacidad de la parte baja (Cbot) y alta (Ctop) del bus DC de 14.1 mF, con una tensión máxima del bus DC de 500Vdc, repartidos entre el condensador de la parte alta y el condensador de la parte baja del bus. De la parte experimental de [22] se tiene que un valor mayor de tensión del bus DC obtiene un mayor rizado de corriente en el filtro a la salida del SAPC. Si fuese un sistema

real convendría representar el inversor con la menor cantidad de semiconductores de potencia ocasionando menos pérdidas por conmutación que otro tipo de convertidor. Para minimizar las pérdidas por conmutación se elige un valor de tensión del bus DC bajo.

De la parte experimental de [5] se extraen los valores de las ganancias del regulador PI utilizado para el control del bus DC.

La carga del bus DC se hace por etapas, accionando unos contactores que se conectan a la red eléctrica en una secuencia de acuerdo con los niveles de tensión del bus DC. Teniendo los contactores de red (grid\_on) que se conectan a través de resistencias a las líneas a y c del convertidor y contactos de línea (precarga) que conecta las 3 líneas a, b y c, este último activado cuando el bus DC alcanza un valor de 254 Vdc, estos niveles de tensión se detallarán más adelante.



**Figura 3-5 Modelo del bus DC y conexión con fuente de generación de energía**

El filtro inductivo está formado por 3 bobinas de inductancia  $L_a = L_b = L_c = 6mH$ . La corriente máxima que puede soportar el inversor es 27 A. [22]

El modelo de la carga está formado por diferentes tipos de cargas que serán activadas (a través del control del braker) individualmente o combinadas dependiendo del tipo de fenómeno ineficiente que se quiera simular:

- Desfase: generado por la conexión en estrella con conexión del neutro en el sistema trifásico a 4 hilos con cargas inductivas en cada una de sus fases  $L_{load\_a}$ ,  $L_{load\_b}$  y  $L_{load\_c}$ . Además de la conexión de los rectificadores monofásicos y trifásico con cargas inductivas.
- Distorsión armónica : principalmente generado por la conexión de cargas no lineales en este caso 3 rectificadores monofásicos con cargas  $R_{load\_dca}$ ,  $R_{load\_dcb}$ ,  $R_{load\_dcc}$ ,  $L_{load\_dca}$ ,  $L_{load\_dcb}$  y  $L_{load\_dcc}$  conectados uno en cada fase y/o un rectificador trifásico con carga  $R_{load\_dcd}$  y  $L_{load\_dcd}$ .
- Desequilibrio: principalmente generado por la conexión de cargas desbalanceadas en la conexión estrella. Al conectar una parte de los rectificadores monofásicos también se aporta un efecto al desequilibrio.

Adicionalmente se tiene la conexión en estrella de carga resistiva- inductiva como modelo de la parte lineal del sistema. Para simular las ineficiencias o sus combinaciones se debe conectar y desconectar las cargas mediante los brakers.

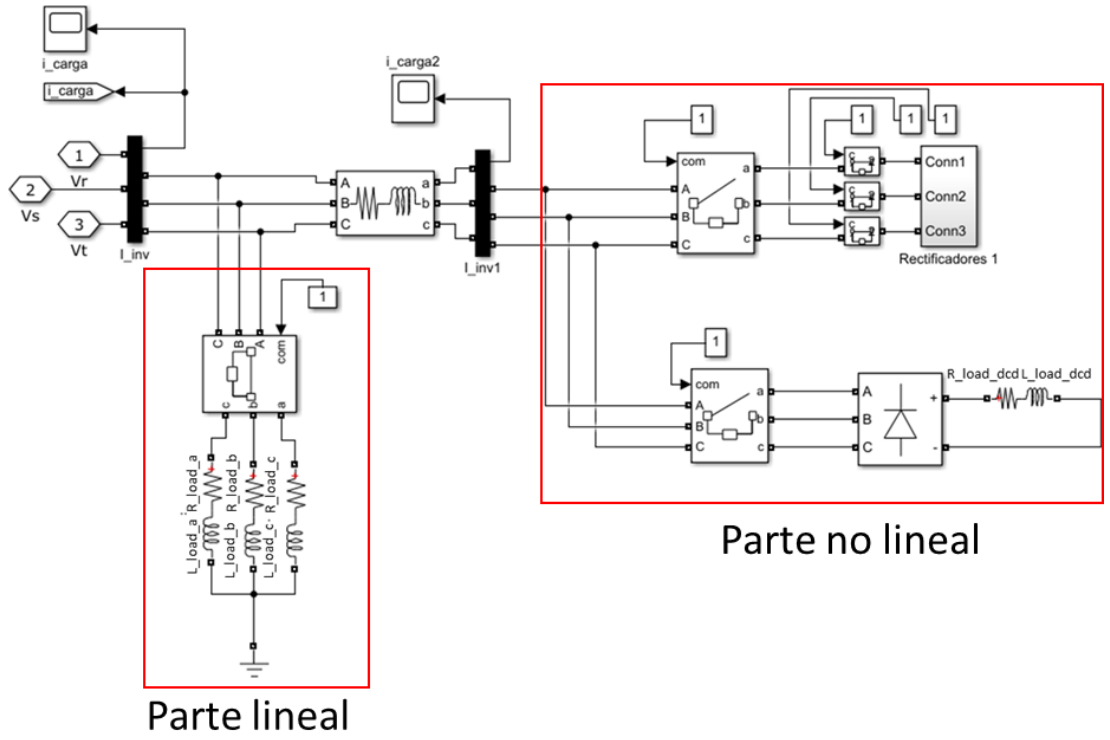


Figura 3-6 Modelo para la simulación de las cargas

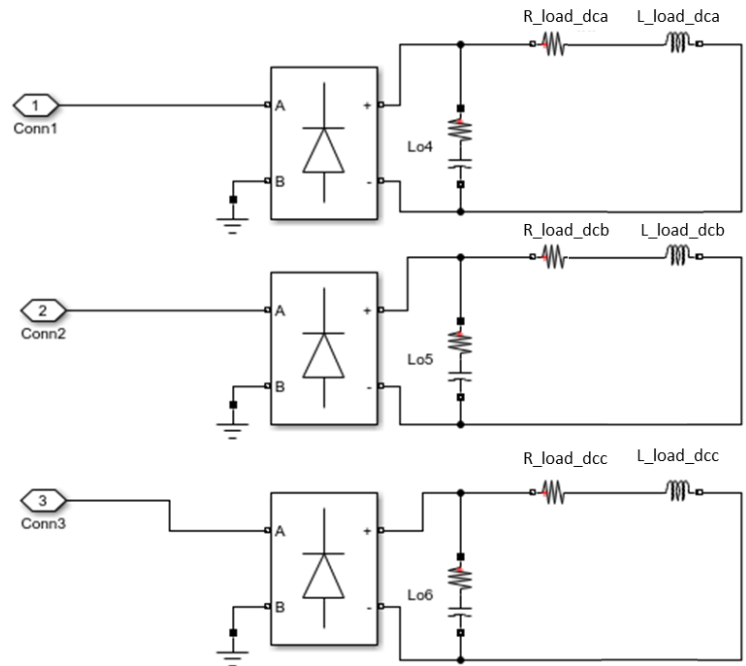


Figura 3-7 Detalle modelo para simulación de carga no lineal inductiva

Para la simulación del modelo de la red eléctrica se han tomado tensiones equilibradas. El voltaje eficaz línea-neutro es 120 V de frecuencia fundamental 50Hz Con fase  $\varphi_a = 0, \varphi_b = 2\pi/3$  y  $\varphi_c = 4\pi/3$  cuya representación en cada instante de tiempo es :

$$v_z(t) = \sqrt{2} \cdot 120 \text{sen}(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot t - \varphi_z) \quad (3-1)$$

Donde  $z = a, b, c$  haciendo referencia a cada fase.

Principalmente se ha tomado valores para los dispositivos de potencia que han sido utilizados como valor experimental en [5],[22].

En este capítulo se desarrollará el algoritmo de control para el funcionamiento de un convertidor DC/AC que funcione en modo híbrido de generador-compensador selectivo de potencias ineficientes de cargas conectadas a una red trifásica a 4 hilos.

Dicho algoritmo permitirá la inyección de potencia activa en el PCC generada a partir de un sistema de energías renovables, siendo esto su prioridad a la hora de utilizar la potencia nominal del convertidor, y el aprovechamiento de potencia aparente con la finalidad de mejorar la estabilidad y calidad de las redes eléctricas. Debido a la naturaleza de variabilidad en el tiempo de cualquier fuente de generación de energía renovable, los sistemas de generación distribuida basados en dichas fuentes no utilizan la potencia nominal del convertidor en su totalidad, inyectando solo una parte de potencia activa al PCC y el resto de capacidad de generación de potencia del convertidor puede ser utilizado para la generación de potencia aparente, necesaria para compensar los fenómenos ineficientes de la carga.

El SAPC tiene un límite de corriente que puede circular a través de él, establecido por el convertidor de potencia. Por eso si se cumple (2-81), las corrientes de compensación generadas por el SAPC deben ser escaladas para optimizar la capacidad del convertidor DC/AC. Por comodidad se vuelve a escribir las corrientes con sus respectivos coeficientes de escalamiento:

$$i_{z\_ref} = K_Q \cdot i_{zQ1SAPC} + K_U \cdot i_{zU1SAPC} + K_H \cdot i_{zHSAPC} + I_{z1}^{+a} \quad (3-2)$$

Se debe tener en consideración que la transferencia de potencia del SAPC a la carga debe ser la máxima posible aprovechando toda la corriente máxima del inversor.

La mayoría de trabajos publicados sobre compensación de ineficiencias realiza una compensación global de las ineficiencias [2], [22] en donde la corriente ineficiente se calcula restando la corriente activa fundamental de secuencia positiva de la corriente de carga. En algunos casos se presenta una compensación selectiva como en [23], donde el criterio adoptado por los autores para la compensación selectiva de potencias ineficientes de la carga es el compensar primero las corrientes armónicas y luego las corrientes desequilibradas y finalmente las corrientes.

En el presente trabajo debido a que en un inicio no se conoce que ineficiencia es la más perjudicial para la red de suministro o para la carga, se propone un algoritmo cuyo objetivo es reducir las potencias ineficientes de mayor valor y establece 4 criterios de compensación y se dividen en 2 grandes grupos:

- Estado 50: Si la corriente de referencia para compensar  $i_{z\_ref}$  (que contiene la corriente requerida por los fenómenos ineficientes más la corriente de

compensación del bus DC) no es mayor que el 98% de la corriente máxima del inversor  $i_{inv\_max}$ , los coeficientes de (3-2) toman valor de la unidad y se genera COMPENSACIÓN GLOBAL de ineficiencias de la carga.

- Estado 10 – Estado 30: Cuando la corriente de referencia  $i_{z\_ref}$  es mayor que  $i_{inv\_max}$  entonces se tiene que aplicar criterios para generar una COMPENSACIÓN SELECTIVA de las ineficiencias de la carga. Los estados 10 al estado 30 se evalúan de manera secuencial siempre que se cumpla que los coeficientes de compensación calculados están en valores entre 0 y 1 y que el valor de la corriente de compensación del bus DC  $i_{z\_compensa\_bus}$  es menor que el 98% de la corriente máxima del inversor  $i_{inv\_max}$ , lo que significa que el convertidor puede compensar el bus DC y aún puede compensar ineficiencias. Caso contrario los coeficientes de compensación tomarían valor nulo, no realizando ningún tipo de compensación.

A continuación, se describen los estados de compensación selectiva:

Estado 10: Se evalúa la posibilidad de que las tres potencias puedan ser reducidas e igualadas, por tanto, a un nivel inferior a la menor potencia. Se hallan los valores de los coeficientes. Si los coeficientes de escalamiento están entre 0 y 1 se calcula la corriente de referencia escalada y esta debe ser menor que  $i_{inv\_max}$ , de lo contrario se vuelve a evaluar la corriente máxima del buffer y se reescala obteniendo nuevos coeficientes hasta que se cumpla que  $i_{z\_ref} < i_{inv\_max}$ . Con la inyección de las corrientes ineficientes desde el SAPC las potencias ineficientes de red responden de acuerdo con la Figura 3-8

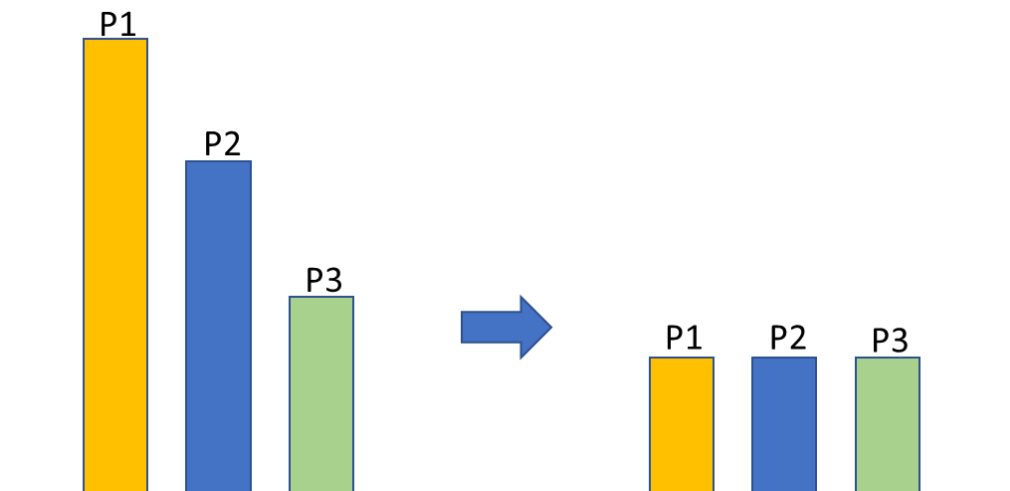


Figura 3-8 Estrategia de compensación parcial de todas las potencias ineficientes

Estado 20: Si el resultado de la evaluación anterior devuelve al menos un coeficiente de escalamiento fuera de rango, indica que no se puede reducir las 3 potencias a un valor inferior a la mínima y hay que evaluar un caso menos restrictivo. Reducir las dos mayores potencias e igualarlas en un valor inferior a la media, valor que necesariamente será superior a la menor potencia. Se hallan los valores de los coeficientes. Si los coeficientes de escalamiento están entre 0 y 1 se calcula la corriente de referencia escalada y el máximo valor de  $i_{z\_ref}$  debe ser menor que  $i_{inv\_max}$ , de lo contrario se vuelve a evaluar la corriente máxima del buffer y se reescala obteniendo nuevos coeficientes hasta que se cumpla que  $i_{z\_ref} < i_{inv\_max}$ . Con la inyección de las corrientes ineficientes desde el SAPC las potencias ineficientes de red responden de acuerdo con la Figura 3-9.

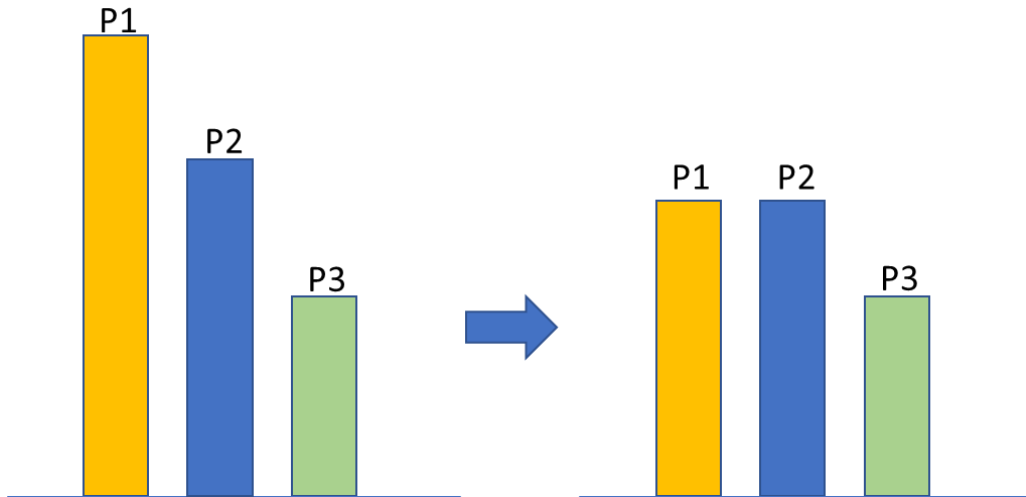


Figura 3-9 Estrategia de compensación parcial de las 2 potencias mayores

Estado 30 : Si el resultado de la evaluación anterior devuelve al menos un coeficiente de escalamiento fuera de rango , indica que no se puede reducir las 2 potencias mayores a un valor inferior a la media y hay que evaluar un caso menos restrictivo. Reducir la potencia mayor sin lograr llegar al nivel de la media. Se hallan los valores de los coeficientes. Si los coeficientes de escalamiento están entre 0 y 1 se calcula la corriente de referencia escalada y el máximo valor de  $i_{z\_ref}$  debe ser menor que  $i_{inv\_max}$ , de lo contrario se vuelve a evaluar la corriente máxima del buffer y se reescala obteniendo nuevos coeficientes hasta que se cumpla dicha condición. Con la inyección de las corrientes ineficientes desde el SAPC las potencias ineficientes de red responden de acuerdo con la Figura 3-10.

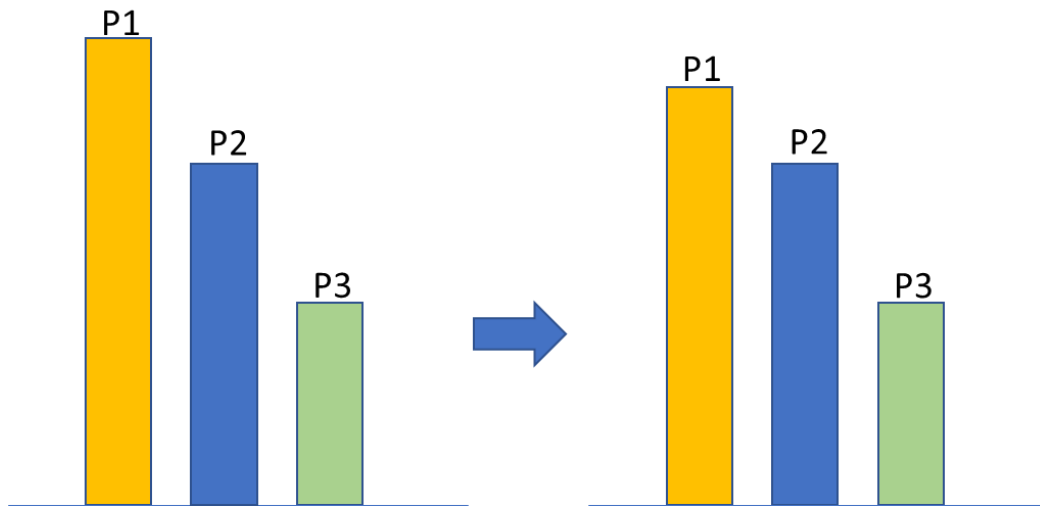


Figura 3-10 Estrategia de compensación parcial de la potencia mayor

### 3.1. Algoritmo para realizar el escalado de las corrientes de compensación usando la estrategia de equilibrado de potencias

En cada prueba realizada se modificarán los valores de los dispositivos de potencia de los modelos para ver de que manera responde el algoritmo implementado, tales como la

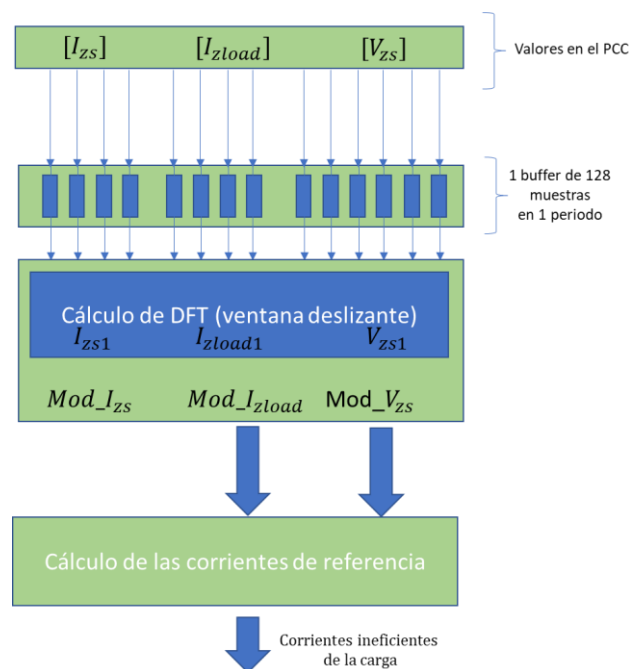
corriente máxima que soporta el inversor y la corriente inyectada por el sistema de generación de energía renovable.

La frecuencia de muestreo es configurable y en este caso se ha elegido muestrear a 20 kHz, ya que en Matlab no se tiene una limitación de tamaño de buffers, el buffer resulta de un longitud de 400 muestras. Y además se logrará una mayor precisión en las magnitudes calculadas. Con esta frecuencia se almacenan las muestras en el buffer utilizando el método de la ventana deslizante [2]-[22]. Utilizando un buffer tipo FIFO en donde el puntero de almacenamiento va recorriendo todo el buffer almacenando una a una las muestras. Una vez que llega a completar la capacidad del buffer, el puntero inicia nuevamente el recorrido del buffer desde la primera posición de almacenamiento sobre escribiendo los datos antiguos con nuevas muestras.

Los coeficientes de escalamiento de las corrientes ineficientes (3-2) son variables en el tiempo y únicos para las tres fases, calculados en cada periodo completo de 0,02 s de las señales que presentan una frecuencia fundamental de 50 Hz, cumpliendo de esta manera con el teorema de Shannon- Nyquist. Por lo tanto la corriente de compensación se calcula una vez por ciclo.

Los buffers para almacenar la corriente consumida por la carga se utilizan 4 buffers para almacenar corrientes en cada fase incluyendo el neutro, para almacenar la corriente medida aguas arriba del PCC se utilizan 4 buffers para almacenar corrientes en cada fase incluyendo el neutro y para almacenar las tensiones en el PCC se utilizan 6 buffers almacenando tensiones de fase y de línea.

La *Figura 3-11* muestra el diagrama de la metodología seguida para la obtención de la corriente de referencia:

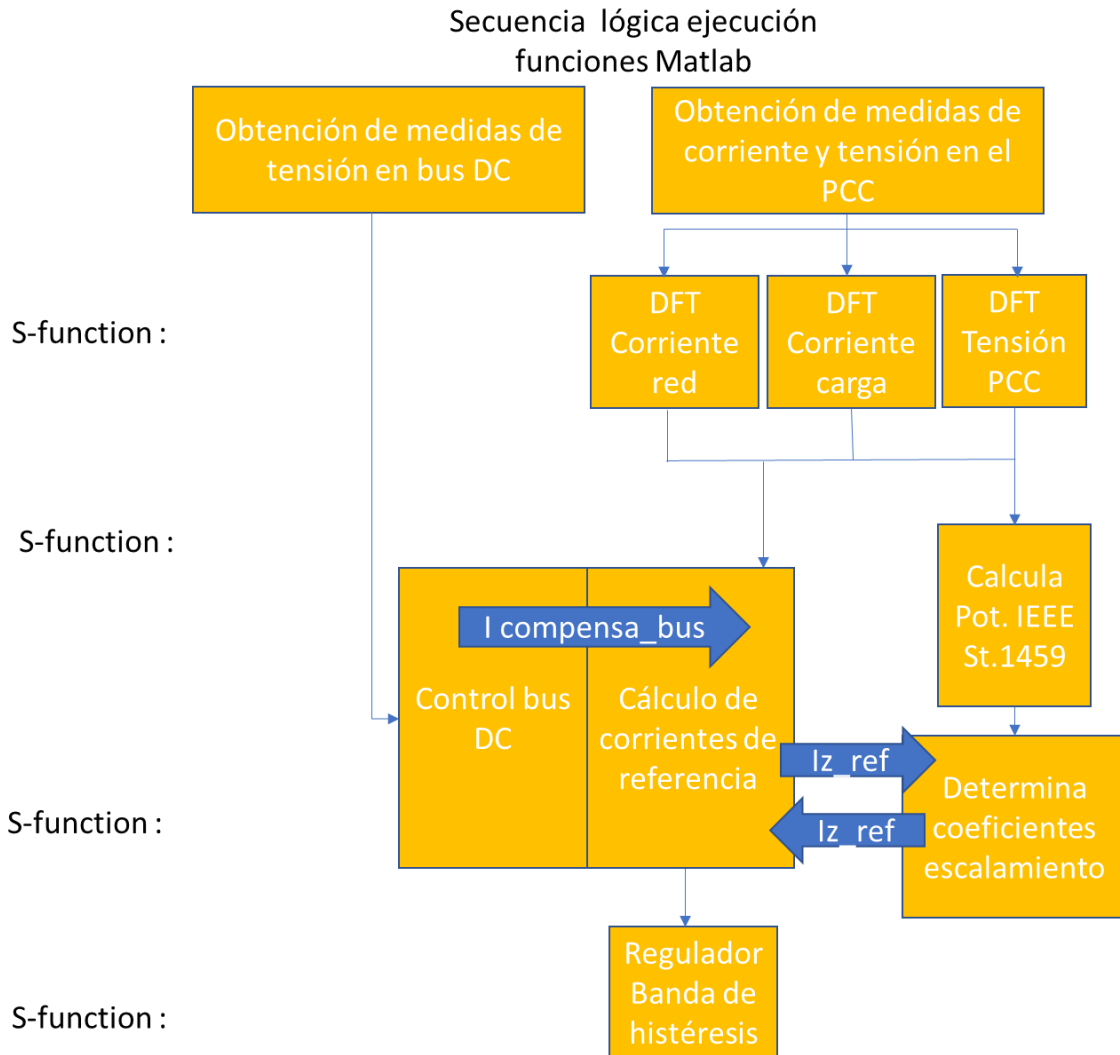


**Figura 3-11 Diagrama del método de ventana deslizante obtención de las corrientes de referencia**

El algoritmo se ha implementado con las funciones S-function del entorno Simulink de Matlab con las que se calculan los coeficientes de escalamiento para la corriente de



compensación de ineficiencias y es descrito a continuación en el flujograma general de la *Figura 3-12*, considerando régimen estacionario:

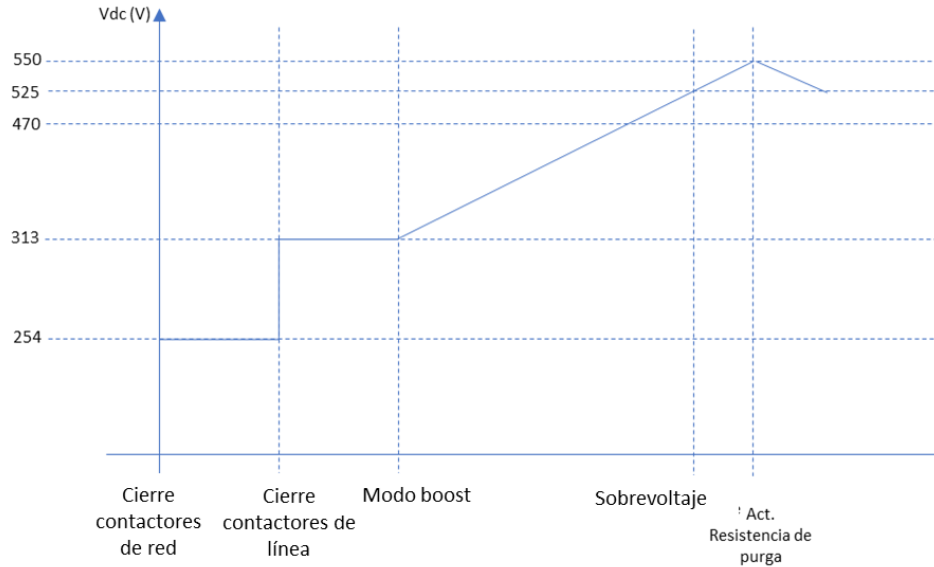


**Figura 3-12** Flujograma general secuencia lógica ejecución funciones Matlab

1. Se miden las magnitudes de corriente de la carga  $I_{zload}$ , corriente de la red  $I_{zs}$  y tensión en el PCC  $V_{zs}$  por fase y se almacenan cada una en un buffer circular (FIFO) un periodo completo de las señales. Cabe resaltar que en el buffer antes de tomar una nueva muestra es necesario descartar el valor actual del buffer, para continuar con la adquisición de la nueva muestra.
2. Se calcula la DFT de las señales  $I_{zload}$ ,  $I_{zs}$  y  $V_{zs}$  con cada nueva muestra obtenida, resultando las magnitudes de módulo y fase para las componentes fundamentales  $I_{zload1}$ ,  $I_{zs1}$  y  $V_{zs1}$  y sus correspondientes componentes simétricas, para un periodo completo de las señales.
3. Además con cada muestra adquirida se calcula en módulo y fase de la corriente activa fundamental de secuencia positiva  $I_{zload1}^+$  de la carga, la corriente activa fundamental de secuencia positiva  $I_{zs1}^+$  de la red, la corriente activa fundamental

de secuencia positiva de la carga  $I_{zload1}^+$ , la tensión de fundamental de secuencia positiva  $V_{zs1}^+$  en el PCC, la tensión fundamental de secuencia negativa  $V_{zs1}^-$  en el PCC y la tensión fundamental de secuencia homopolar  $V_{zs1}^0$  en el PCC.  $V_{zs1}^+$ ,  $V_{zs1}^-$  y  $V_{zs1}^0$  son iguales en cada fase ya que no se están considerando desequilibrio de tensiones del sistema eléctrico.

4. Con el valor acumulado de un periodo de la tensión fundamental, se calcula la tensión fundamental de secuencia positiva  $V_1^+$ , tensión fundamental de secuencia negativa  $V_1^-$ , tensión fundamental de secuencia homopolar  $V_1^0$  en módulo y fase. También se calculan los valores RMS para la tensión por fase en el PCC, la corriente de red y la corriente de carga.
5. Una vez que el S-function "Cálculo de corrientes de referencia" termina de procesar la configuración de las variables de entrada, evalúan el nivel de tensión en el bus DC según la Figura 3-13. Teniendo como resultado el estado de operación del inversor, entre los que pueden ser: precarga del bus DC con conexión inicial de los contactores de red, carga del bus DC con conexión de contactos de línea, modo Boost o modo sobretensión.



**Figura 3-13 Estado de carga del bus DC del inversor y estado de activación del convertidor (bajo condiciones de operación normal del convertidor)**

6. Con los valores de corrientes de red y de carga, tensiones de fase y tensiones de línea se calculan las potencias de la red y de la carga utilizando la descomposición de potencia descritas en el IEEE Std. 1459-2010 mostrada en la Figura 2-5.
7. De estas potencias calculadas se toman en consideración el valor de la Potencia aparente no fundamental  $S_{eN}$ , potencia fundamental de desequilibrio  $S_{U1}$  y potencia reactiva fundamental de secuencia directa  $Q_1^+$ .
8. Del módulo y fase de las corrientes de carga se calculan las corrientes asociadas a las ineficiencias causadas por la asimetría de carga siguiendo (2-79), por el desfase causada por las bobinas y/o condensadores en la carga siguiendo (2-77) y la distorsión armónica ocasionada por las cargas no lineales siguiendo (2-69).
9. Si el inversor está operando en modo boost mencionado en el punto 5, se inicia la regulación de la rampa de carga hasta la tensión de referencia del bus DC

incrementado de a pocos su valor. Obteniendo el valor de compensación del bus DC con la finalidad de mantener el bus DC cargado y/o inyectar potencia activa a la carga.

10. Finalmente se tienen las magnitudes de la corriente instantánea de compensación de ineficiencia de la carga para cada fase  $i_{zQ1\_SAPC}$   $i_{zU1\_SAPC}$   $i_{zH\_SAPC}$   $i_{z\_compensa\_bus}$ . Sea  $i_{z\_compensa\_bus}$  corriente activa fundamental de secuencia positiva para mantener el bus de continua del inversor. Para obtener una compensación selectiva es necesario calcular los coeficientes de compensación  $K_Q$ ,  $K_U$  y  $K_H$  que afectarán a cada corriente respectivamente.
11. Mientras esté operando el inversor en modo boost solo se dará la compensación a  $i_{z\_compensa\_bus}$ . Una vez que los niveles de tensión del bus DC hayan alcanzado un valor óptimo entre 470 – 525 Vdc se puede continuar con el cálculo de los coeficientes de escalamiento.
12. Del ítem 10, se tiene la corriente instantánea total inicial por fase ( $i_{z\_ref}$ ) que se requiere compensar, con coeficientes igual a 1, generada con la expresión (2-84).  $i_{z\_ref}$  se almacena en un buffer (vector de corrientes instantáneas) de donde se obtiene la fase, el valor de la muestra y su puntero del buffer del máximo valor de la corriente a compensar. Si se cumple que el máximo valor de  $i_{z\_ref}$  es menor que el  $98\%i_{inv\_max}$  los coeficientes de compensación toman valor de la unidad, dándose una COMPENSACIÓN GLOBAL. Si  $i_{z\_ref}$  es mayor que el  $98\%i_{inv\_max}$ , no se puede compensar el total de las ineficiencias y se da una COMPENSACIÓN SELECTIVA, identificando la fase que tiene mayor  $i_{z\_ref}$  (fase a=1, fase b=2 y fase c=3) y por consiguiente el valor de cada ineficiencia.
13. Continuando con la compensación selectiva se determinan los coeficientes de escalamiento, es aquí donde se hace la evaluación de las potencias ineficientes calculadas bajo la IEEE Std. 1459-2010 y se indica cual genera mayor, medio o menor grado de ineficiencia. El vector de corrientes instantáneas se afecta en el mismo grado que sus potencias, quedando indicada que corriente instantánea genera mayor, media o menor grado de ineficiencia. Se inicia por el estado de compensación 10 (ver Figura 3-8), si los valores de los coeficientes calculados no cumplen con estar entre 0-1, se recalculan bajo el estado de compensación 20 (ver Figura 3-9),. Si los valores de los coeficientes calculados no cumplen con estar entre 0-1, se recalculan bajo el estado de compensación 30 (ver Figura 3-10/Figura 3-8). Obteniendo finalmente el valor de  $i_{z\_inv}$  expresado en (2-84).
14. Si luego de los cálculos, el máximo valor de  $i_{z\_inv}$  resulta mayor que  $i_{inv\_max}$  es necesario reevaluar la corriente máxima del buffer después de escalarlo y se vuelve a reescalar calculando nuevos valores de coeficientes de escalamiento. Obteniendo un nuevo valor de  $i_{z\_ref}$ , que será utilizado en el algoritmo de control y modulación por banda de histéresis para la activación del inversor.
15. Se debe tener en consideración que las mediciones correctas deben fijarse en régimen estacionario, considerando un ciclo completo de la componente fundamental de 50Hz por eso hay que esperar 20ms hasta después de haber realizado alguna perturbación. Así como en [13] se calculan las corrientes de compensación luego de un ciclo completo, como estrategia de control.

Ante variaciones de la corriente de carga, el sistema deshabilita la compensación a la espera de un nuevo régimen estacionario. Cuando las se estabilizan se vuelve a calcular

las corrientes de compensación y se vuelve a compensar. En ningún caso debe dejar de inyectarse la potencia activa proveniente del bus DC.

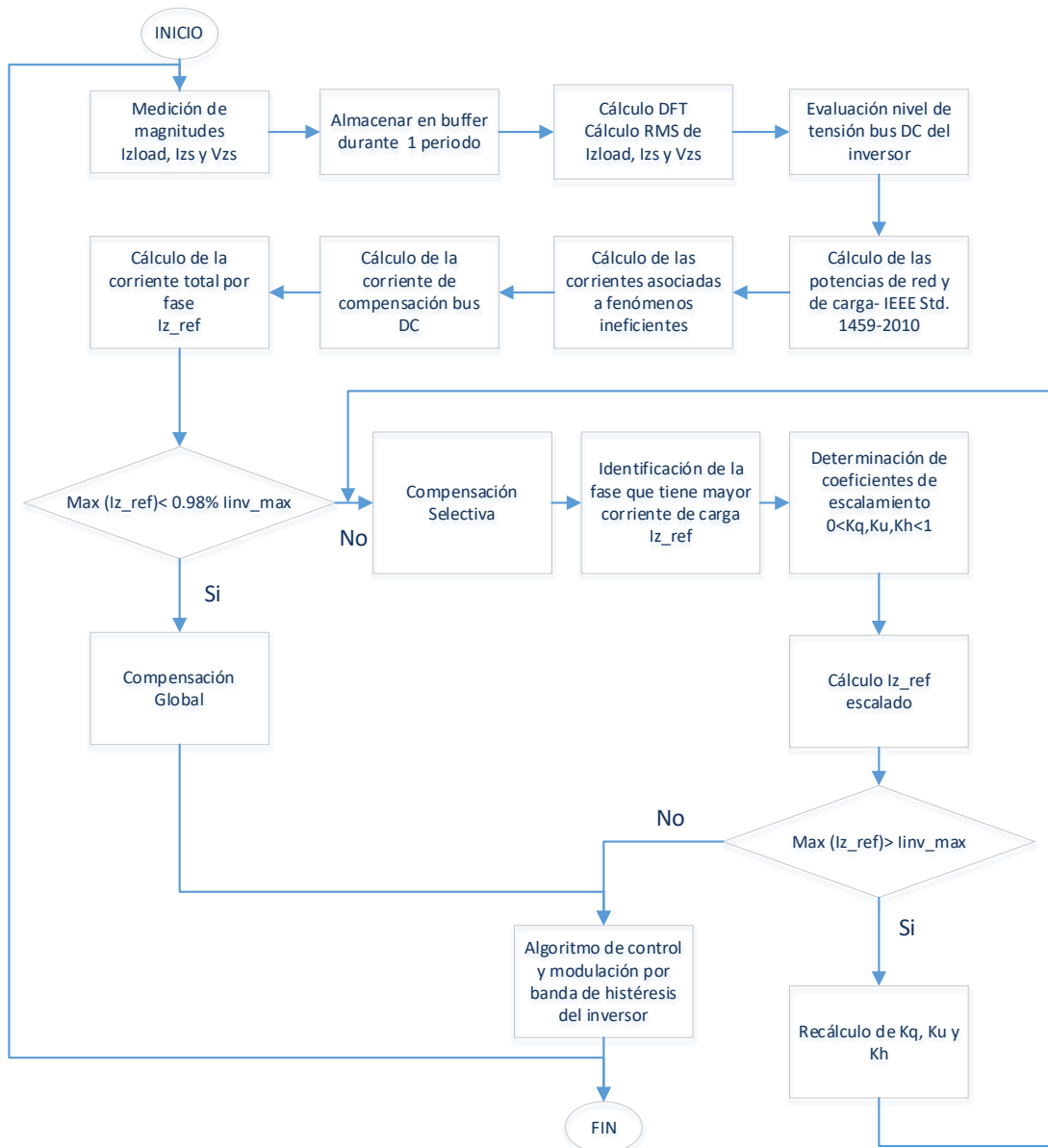


Figura 3-14 Diagrama de flujo lógica de control

Con todo ello, queda definido el algoritmo a implementar para el aprovechamiento del convertidor DC/AC como elemento que transfiere de potencia activa fundamental de secuencia positiva a la carga y/o a la red de suministro y compensa de manera selectiva las ineficiencias de la carga de acuerdo a las capacidades del inversor. En el siguiente capítulo se presentarán los resultados de la simulación del modelo del SAPC.

# CAPÍTULO 4

## 4. Resultados de simulación

En este apartado se explica la simulación del sistema eléctrico para comprobar el funcionamiento del algoritmo propuesto de control del convertidor DC/AC para que el SAPC opere en modo híbrido de generación- compensación.

Los objetivos de las simulaciones presentes en este capítulo son los siguientes:

- Comprobar el método de obtención de las corrientes de referencia para el SAPC basados en la IEEE Std. 1459.
- Validar la compensación de ineficiencias producidas por cargas trifásicas lineal desequilibrada, carga trifásica lineal desequilibrada con desfase y carga trifásica no lineal con desequilibrio y desfase; ya sea de manera global o selectiva.
- Comprobar el funcionamiento del método de la ventana deslizante para la obtención de muestras y cálculo de la DFT aplicado a la obtención de las corrientes de referencia del SAPC.
- Validar la inyección de potencia activa en el PCC generada a partir de la inyección de potencia desde un supuesto sistema de energías renovables, dependiendo de la potencia aparente disponible en el convertidor.

### 4.1. Condiciones de alimentación

El sistema trifásico de tensiones de alimentación es senoidal y equilibrado como se muestra en la *Figura 4-1*, no puede ser simulado de otra manera ya que este sería el voltaje de red suministrado por la empresa eléctrica.



**Figura 4-1 Tensiones de alimentación senoidal y equilibradas**

La Tabla 4-1 presenta un resumen de los parámetros de tensión de red utilizados en la simulación:

	$V_a$	$V_b$	$V_c$
Tensión	120.0 V	120.0 V	120.0 V
Desfase	0°	-120.00°	-240.00°
Frecuencia	50 Hz	50 Hz	50 Hz
THDv	0.00%	0.00%	0.00%

**Tabla 4-1 Valores de tensiones de red**

El valor de THDv se considera 0% durante toda la prueba debido a que no se está considerando distorsión armónica de tensión en la red de suministro.

A continuación se presenta la respuesta de corrientes y tensiones ante cada tipo de carga bajo estas condiciones de alimentación, considerando además variaciones en la  $i_{inv,max}$ .

#### 4.1.1. Simulación del modelo del SAPC con carga trifásica no lineal, desequilibrada y reactiva, efectuando compensación global sin aporte de energía en el bus DC del convertidor

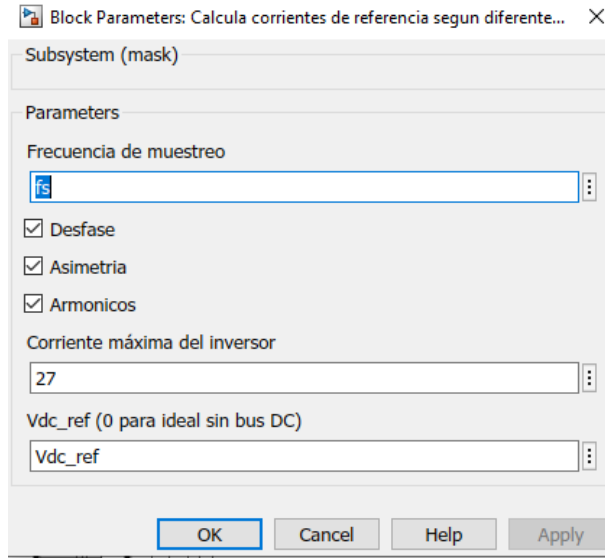
En primer lugar se debe extraer de la simulación la corriente que consumen el total de las cargas y la compensación del bus DC, considerando un sistema trifásico de cuatro hilos con cargas en serie resistiva-inductiva conectadas en estrella y neutro a tierra, con inversores monofásicos y trifásico, los modelos de las cargas se ven en la *Figura 3-6* y *Figura 3-7*, se tiene:

Carga lineal	R_load_a = 22Ω R_load_b = 100Ω R_load_c = 66Ω
	L_load_a = 18mH L_load_b = 6mH L_load_c = 12mH
	R_load_dca = 50Ω R_load_dcb = 44Ω R_load_dcc = 32Ω
Carga rectificador monofásico	L_load_dca = 6mH L_load_dcb = 6mH L_load_dcc = 3mH
	R_load_dcd = 32
	L_load_a = 15mH

Tabla 4-2 Valores de los modelos de carga

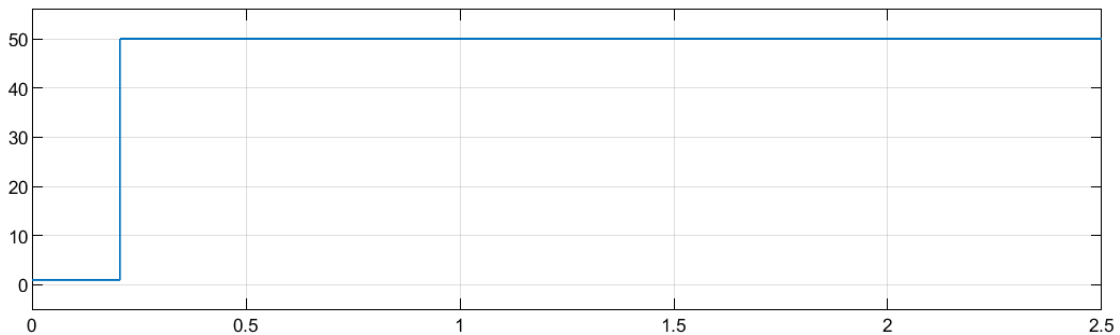
Para forzar y poder comprobar los diferentes estados de compensación posibles se establecerá el valor adecuado para la máxima corriente del inversor. Según simulación del modelo, las ineficiencias de la carga generan 10.46 A, por lo tanto la corriente máxima del inversor ( $i_{inv,max}$ ) se configurará en 27A, siendo esta suficiente para este tipo de carga. Dimensionando así un inversor de conexión a red que cuando el SAPC esté operando en modo generación sea capaz de manejar suficiente corriente suministrada por la fuente de generación de energías renovables.

El bloque de cálculo de Simulink tiene opción para seleccionar que tipo de ineficiencia es la que compensaría el inversor luego que se ejecute la lógica, como se ve en la *Figura 4-2*. En este caso se deja preseleccionado para que se compensen los 3 tipos de fenómenos presentes en esta simulación: desfase, asimetría de cargas y distorsión armónica.



**Figura 4-2 Configuración de bloque de parámetros en Simulink**

De acuerdo con la Figura 4-9 y la Figura 4-6 , la corriente que pasa por el SAPC para compensar los fenómenos ineficientes de la carga y mantener el bus DC cargado es menor a la corriente máxima del inversor ( $i_{inv\_max}$ ), por lo tanto el SAPC es capaz de realizar una compensación global (estado de compensación 50) como se muestra en la Figura 4-3 asignando los valores de  $K_Q=1$ ,  $K_U=1$  y  $K_H=1$  a los coeficientes de escalado de la ecuación (2-84).



**Figura 4-3 Indicador de compensación global del SAPC (estado 50)**

De acuerdo con los valores de los coeficientes , todos reducen en 100% el valor de las potencias ineficiente.

La carga trifásica no lineal desequilibrada demanda las corrientes no senoidales que se muestran en

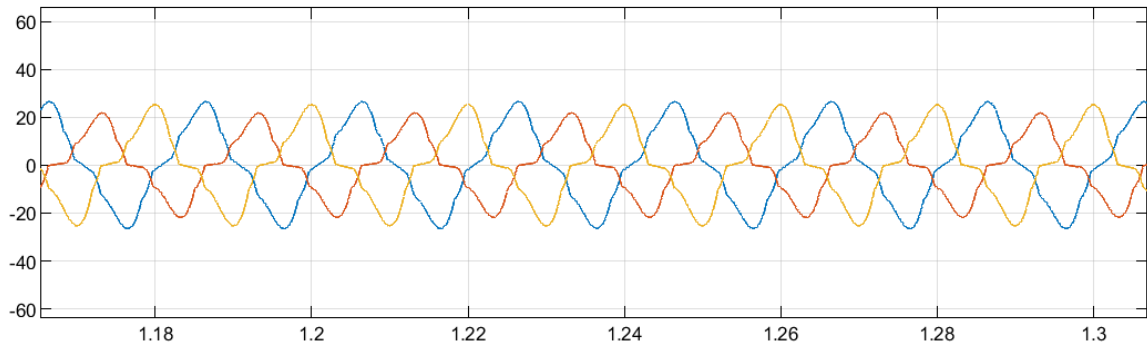
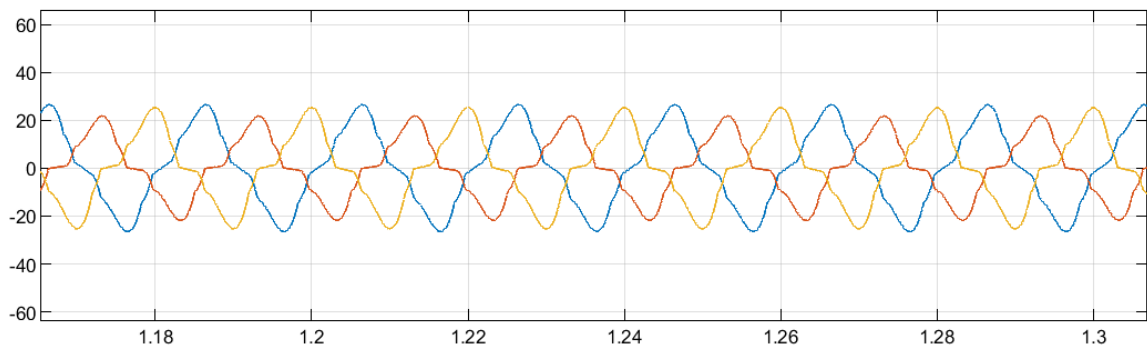
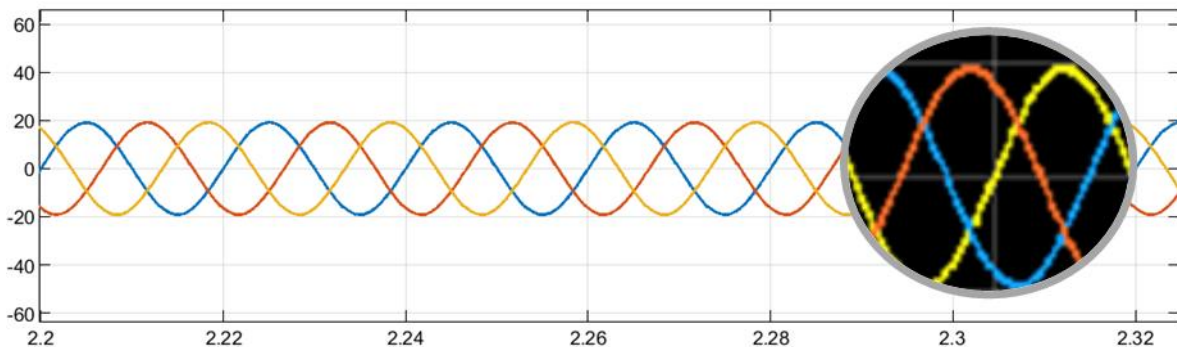


Figura 4-4 , debido a las ineficiencias.



**Figura 4-4 Corrientes demandadas por la carga por fase durante la compensación global ejecutada por el SAPC**

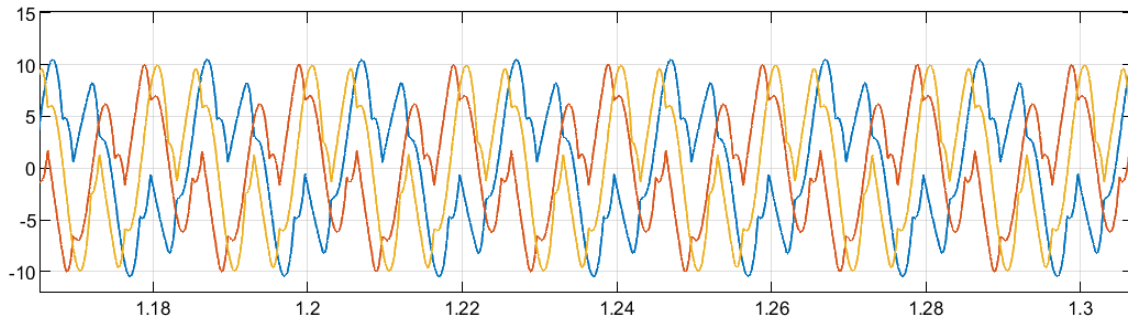
Al darse una compensación global de ineficiencias la corriente en la red es puramente activa fundamental de secuencia positiva , mostrando una onda senoidal como se muestra en la Figura 4-5. El rizado de corriente en esta señal es muy bajo por haber fijado una banda de histéresis muy baja iguala 0 en el control de corriente de referencia , con el fin de que el rizado de conmutación no impida ver claramente el efecto de la compensación global.



**Figura 4-5 Corrientes inyectada por la red eléctrica por fase durante la compensación global ejecutada por el SAPC**

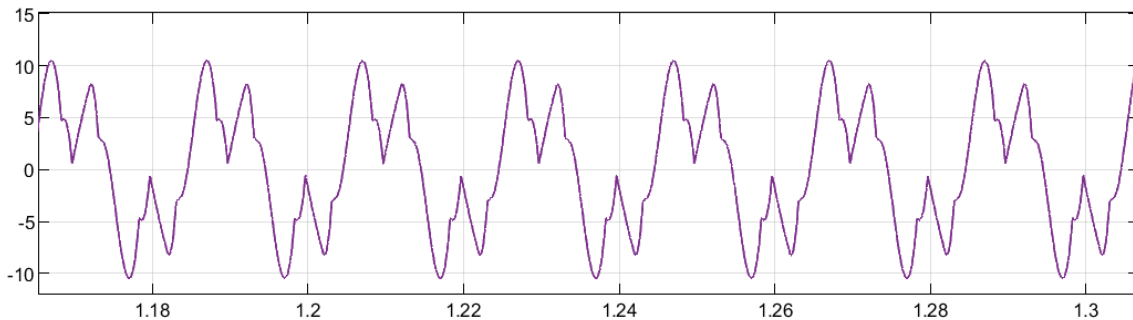


A partir del algoritmo del cálculo de la DFT de las corrientes de carga y tensiones de línea se obtienen las corrientes ineficientes en el PCC. Estas corrientes juntamente con la corriente de compensación del bus DC deberán ser inyectadas por el SAPC para compensar globalmente las ineficiencias. En la Figura 4-6 se muestran las corrientes de referencia inyectadas por el SAPC, donde la corriente máxima de referencia es 10.46 A . Estas corrientes que son la suma aritmética de las corrientes ineficientes y la corriente de mantenimiento del bus DC, sirven como referencia para el control de corriente por banda de histéresis del convertidor.



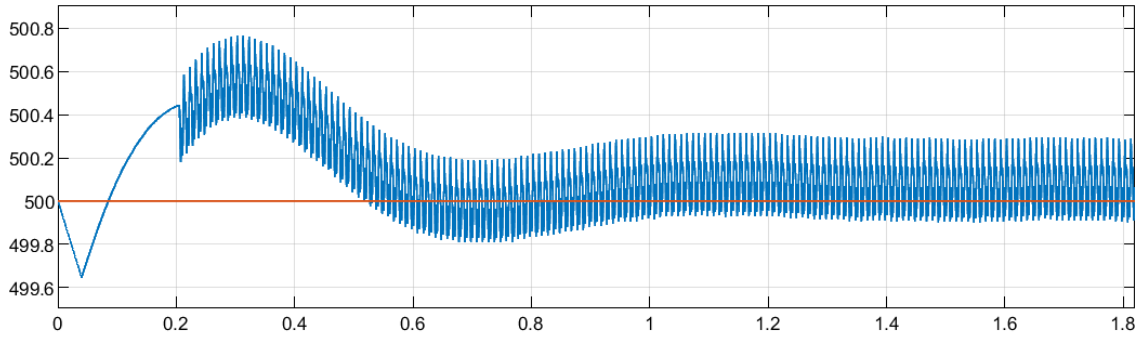
**Figura 4-6 Corriente de referencia inyectadas por el SAPC**

Debido a que se da una compensación global los coeficientes de escalamiento son unitarios, por lo tanto, las corrientes de referencia antes y después de realizar el escalamiento son idénticas como se ve en la Figura 4-7.



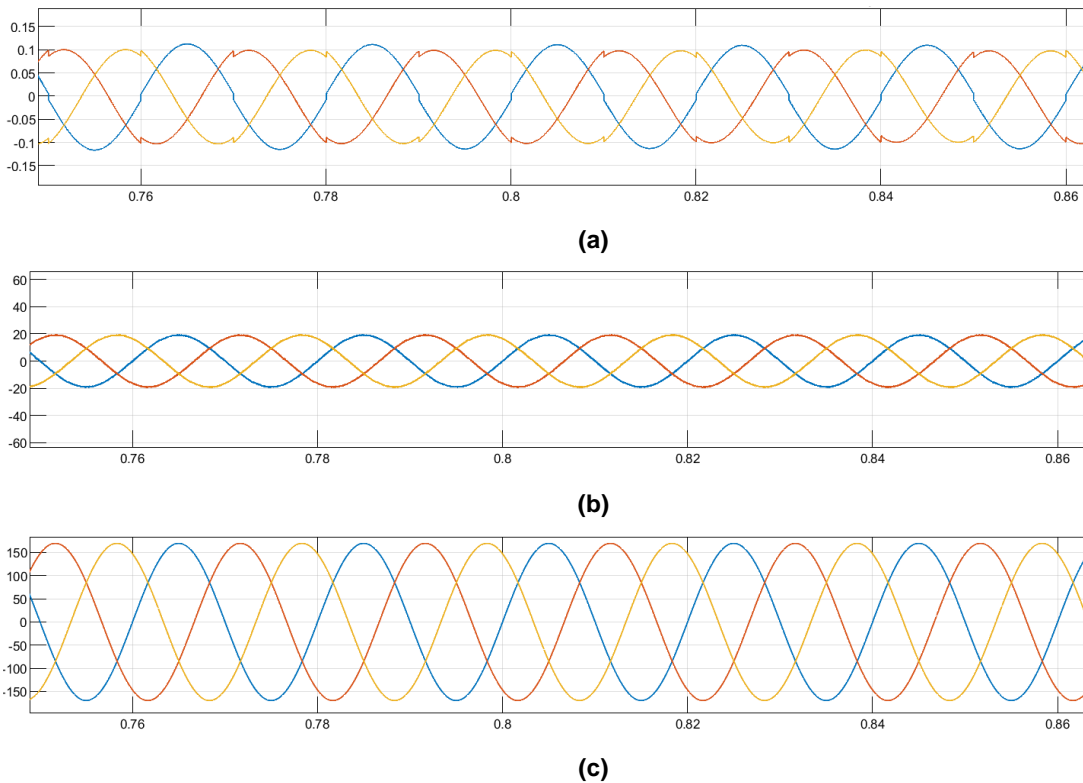
**Figura 4-7 Corriente de referencia fase a inyectada por el SAPC**

El regulador PI mantiene la tensión del bus DC en un valor de 500 V con mínimo rizado, representado en la Figura 4-8, este se mantiene estable mediante la inyección de corriente desde la red eléctrica a través del convertidor de potencia



**Figura 4-8 Control de la tensión del bus DC**

En la Figura 4-9 se muestra la corriente necesaria para mantener el bus DC cargado en fase con la tensión de red y además en fase con la corriente de red, debido a que la red eléctrica inyecta solo corriente activa fundamental de secuencia positiva a la carga. En el algoritmo, el control del bus DC se ejecuta cada 10 ms.



**Figura 4-9 (a) Corriente de compensación del bus DC y (b) corriente de red vs (c) tensión de red**

Con las definiciones de potencia del IEEE Std. 1459, se determinan las magnitudes de potencias de la carga (*Tabla 4-3*) y de la red (*Tabla 4-4*) y (*Tabla 4-5*) a partir de los valores de tensiones en el PCC y las corrientes inyectadas por la red eléctrica. Estas se comparan con la potencia suministrada por la red como se evidencia en las siguientes figuras, con el objetivo de verificar si la red eléctrica suministra el total de potencias activas y no activas a la carga. En el caso que la potencia ineficiente requerida por la carga sea mayor a la de la

red y/o la potencia ineficiente de la red sea aproximadamente 0, validaríamos la operación del convertidor como elemento compensador de fenómenos ineficientes.

$S_e=5649$ va				
$S_{e1}=5123$ va			$S_{eN}=2379$ va	
$P_1^+=4783$ W	$Q_1^+=1608$ var	$S_{U1}=884.8$ va	$D_{e1}=2379$ va	$D_{eV}=0$ va
			$THD_{e1}=46.43$ %	$THD_{eV}=0$ %

**Tabla 4-3 Potencias de carga según la IEEE Std. 1459**

$S_e=4784$ va				
$S_{e1}=4784$ va			$S_{eN}=0$ va	
$P_1^+=4784$ W	$Q_1^+=1.59 \cdot 10^{-10}$ var	$S_{U1}=25.91$ va	$D_{e1}=0$ va	$D_{eV}=0$ va
			$THD_{e1}=0$ %	$THD_{eV}=0$ %

**Tabla 4-4 Potencias de red ideales según la IEEE Std. 1459**

De los valores de las potencias de carga de la *Tabla 4-3* se verifica que dentro de las 3 potencias ineficientes identificadas la potencia más ineficiente es  $S_{eN\_load}=D_{e1\_load}=2379$  va, la de valor intermedio es  $Q_{1\_load}^+=1608$  var y la menos ineficiente es  $S_{U1\_load}=884.8$  va. Estos valores van a permanecer constantes durante todas las pruebas de funcionamiento del algoritmo.

La *Tabla 4-4* muestra los valores ideales obtenidos con un modelo de Simulink ideal donde el convertidor DC/AC se sustituye por fuentes de corriente controladas y se elimina el efecto de la conmutación. Y se realiza la resta aritmética de las corrientes ineficientes de la carga respecto de las corrientes totales de la carga obteniendo la corriente suministrada por la red eléctrica para calcular sus potencias según la IEEE Std. 1459. Debido a que se da una compensación global de ineficiencias, las potencias ineficientes  $Q_1^+$ ,  $S_{U1}$  y  $S_{eN}$  son casi nulos y  $S_{e1\_red}=P_{1\_load}^+$ . Con este modelo se verificará que el diseño de la simulación con el algoritmo de compensación es confiable.

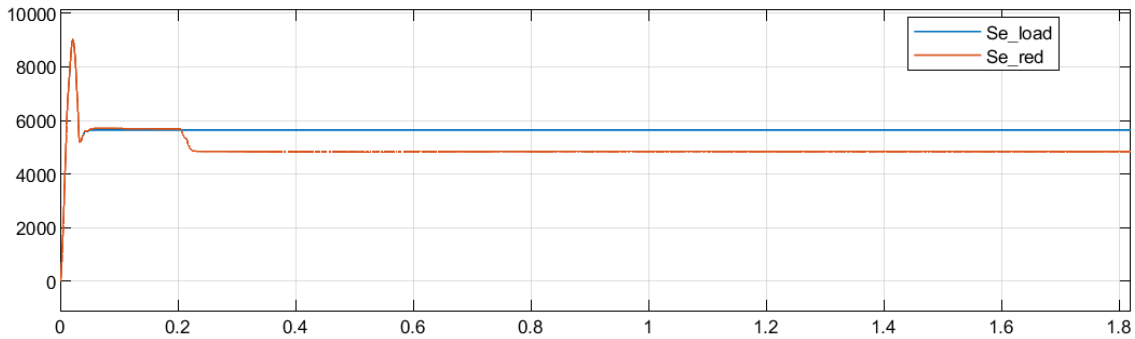
$S_e=4839$ va				
$S_{e1}=4836$ va			$S_{eN}=180.5$ va	
$P_1^+=4836$ W	$Q_1^+=3.219$ var	$S_{U1}=31.57$ va	$D_{e1}=180.5$ va	$D_{eV}=0$ va
			$THD_{e1}=3.73$ %	$THD_{eV}=0$ %

**Tabla 4-5 Potencias de red según la IEEE Std. 1459**

La *Tabla 4-5* muestra los valores de las potencias con el modelo de Simulink presentado anteriormente que sí incluye el control de corriente y convertidor de potencia conectado al PCC y el 'Estado 50' de compensación selectiva. En este caso la potencia de distorsión de corriente en la red  $D_{e1\_red}$  difiere de la potencia reactiva fundamental de secuencia positiva en la red  $Q_{1\_red}^+$  y de la potencia fundamental de desequilibrio en la red  $S_{U1\_red}$ , debido al rizado de corriente generado por el modulador por banda histéresis para el control

del SAPC que incrementa el valor compensado de  $D_{e1\_red}$ . Ya que al ser  $S_{eN\_red}$  un termino cuadrático se ven grandemente afectado en su cálculo por la tensión eficaz de la red eléctrica.

A pesar de ello estos valores son muy similares a los del modelo ideal demostrando el correcto funcionamiento del algoritmo aplicado al SAPC.



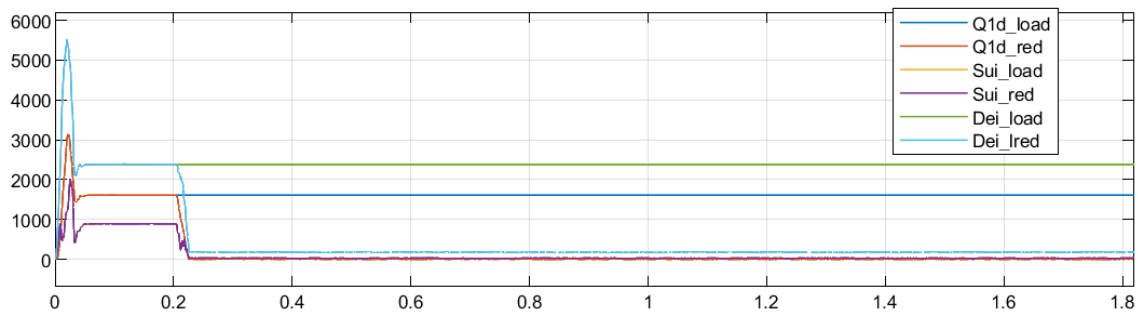
**Figura 4-10 Potencia aparente efectiva  $S_e$  de carga y de red**

La potencia aparente efectiva de red  $S_{e\_red}$  en lugar de ser de valor igual a la  $S_{e\_load}$ , se ve disminuida en un valor igual a la potencia inyectada por el SAPC.

Se puede calcular de:

$$S_{e\_SAPC} = \sqrt{S_{e\_load}^2 - S_{e\_red}^2} = 2.914 \text{ Kva} \quad (4-1)$$

Mientras la carga requiere  $D_{e1\_load}$ ,  $Q_{1\_load}^+$  y  $S_{U1\_load}$  la red eléctrica suministra  $D_{e1\_red}$ ,  $Q_{1\_red}^+$  y  $S_{U1\_red}$ . Cumpliendo con la compensación global de ineficiencias,  $D_{e1\_red} = Q_{1\_red}^+ = S_{U1\_red} = 0$ , la red eléctrica será únicamente responsable (idealmente) de inyectar potencia activa fundamental de secuencia positiva a la carga como se ve en la Figura 4-11. La potencia  $D_{e1}$  es igual a  $S_{eN}$  debido a que solo se simula distorsión de corriente, más no distorsión de tensión



**Figura 4-11 Comparativa entre potencia reactiva fundamental de secuencia directa  $Q_1^+$ , Potencia aparente fundamental de desequilibrio  $S_{U1}$  y Potencia de distorsión de corriente de carga y de red**

Además en las Figura 4-12, Figura 4-13 y Tabla 4-5 la potencia efectiva aparente de red  $S_{e\_red}$ , potencia aparente fundamental de red  $S_{e1\_red}$ , potencia activa fundamental de secuencia positiva de red  $P_{1\_red}^+$  y la potencia activa fundamental de secuencia positiva en la carga  $P_{1\_load}^+$  son iguales. Al principio de la simulación el cálculo de la compensación se

encuentra desactivado mientras que las potencias alcancen régimen estacionario. En cuanto el sistema alcanza régimen estacionario se calculan los coeficientes de escalamiento que serán aplicados a las corrientes ineficientes.

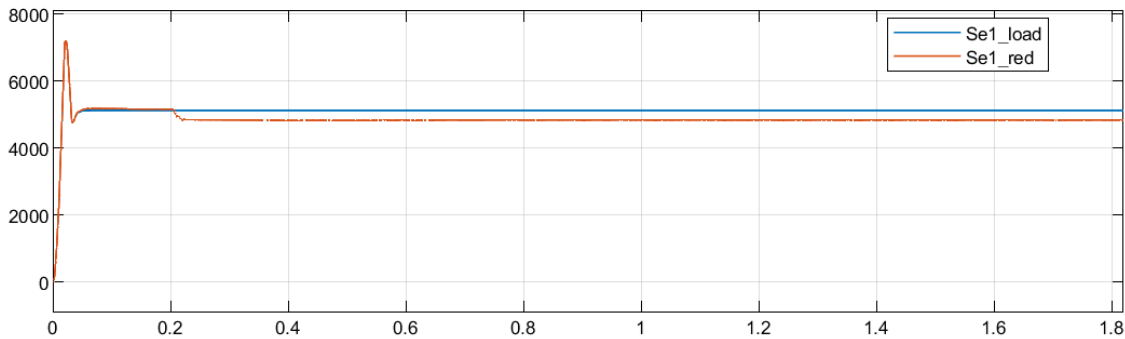


Figura 4-12 Potencia aparente efectiva fundamental  $S_{e1}$  de carga y de red

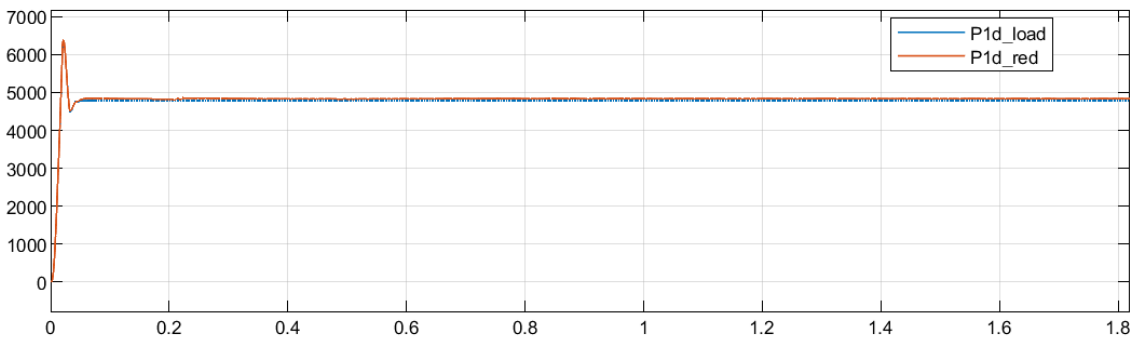


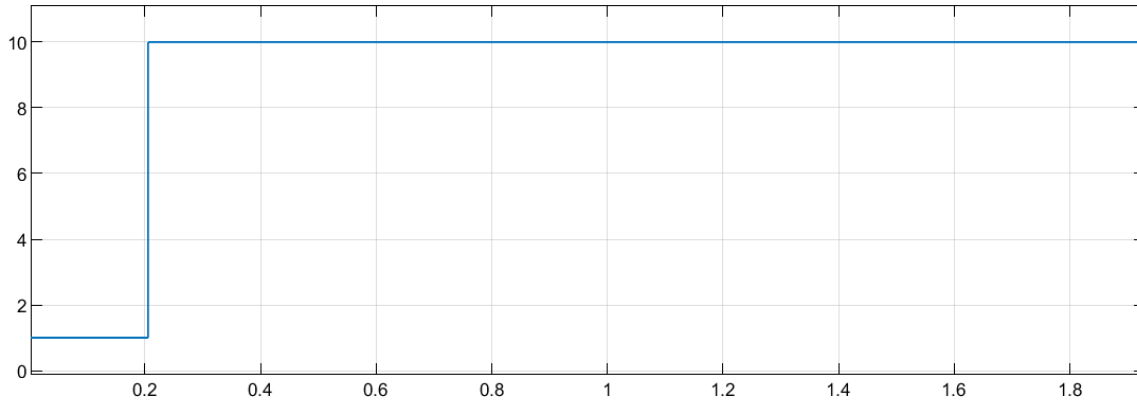
Figura 4-13 Potencia activa fundamental de secuencia positiva  $P_1^+$  de carga y de red

En conclusión, la prioridad del SAPC bajo esta configuración es la compensación de ineficiencias global de la carga resultando valores de potencias ineficientes casi nulo. Además se observa que la distorsión armónica de corriente  $THD_{e1}$  de la red es inferior a la de la carga, mejorando con esta solución la eficiencia de la red eléctrica.

#### 4.1.2. Simulación del modelo del SAPC con carga trifásica no lineal, desequilibrada y reactiva, efectuando compensación selectiva sin aporte de energía en el bus DC del convertidor : Caso 1

En este primer caso, se considera los mismos valores de carga del epígrafe anterior y para configurar la corriente máxima del inversor ( $i_{inv\_max}$ ) se toman los valores de la Figura 4-6 como referencia, por ello la corriente máxima del inversor ( $i_{inv\_max}$ ) se deberá configurar en un valor inferior tal que el SAPC no sea capaz de compensar el total de potencias no eficientes para realizar las pruebas. Por lo tanto  $i_{inv\_max}$  será igual a 9 A .

Siendo estas las condiciones de operación del sistema el SAPC no es capaz de realizar una compensación global por lo que realiza una compensación selectiva como se muestra en la Figura 4-14. Con esta limitación de la corriente del inversor el algoritmo propuesto obtiene las siguientes constantes para la compensación  $K_U=0.73$ ,  $K_Q=0.85$  y  $K_H=0.89$  para utilizarlos en la ecuación (2-84).

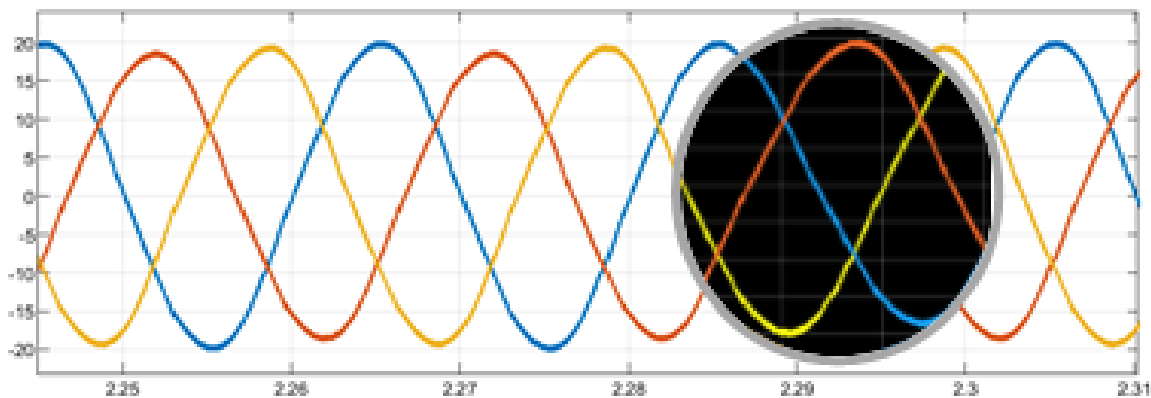


**Figura 4-14 Indicador de compensación global del SAPC (estado 10)**

De acuerdo a los valores de los coeficientes, el que tiene mayor valor aplica al de mayor potencia ineficiente reduciendo dicha potencia en un 89%, este coeficiente se relaciona con la potencia aparente efectiva no fundamental; el coeficiente de valor intermedio aplica a la potencia ineficiente intermedia reduciendo dicha potencia en un 85%, este coeficiente se relaciona con la potencia reactiva fundamental de secuencia directa. Mientras que el coeficiente de menor valor aplica a la potencia ineficiente de menor valor reduciendo dicha potencia en 73%, este coeficiente se relaciona con la potencia fundamental de desequilibrio; con el objetivo de reducir las 3 potencias hasta que alcancen un valor inferior a la potencia ineficiente de menor valor registrada.

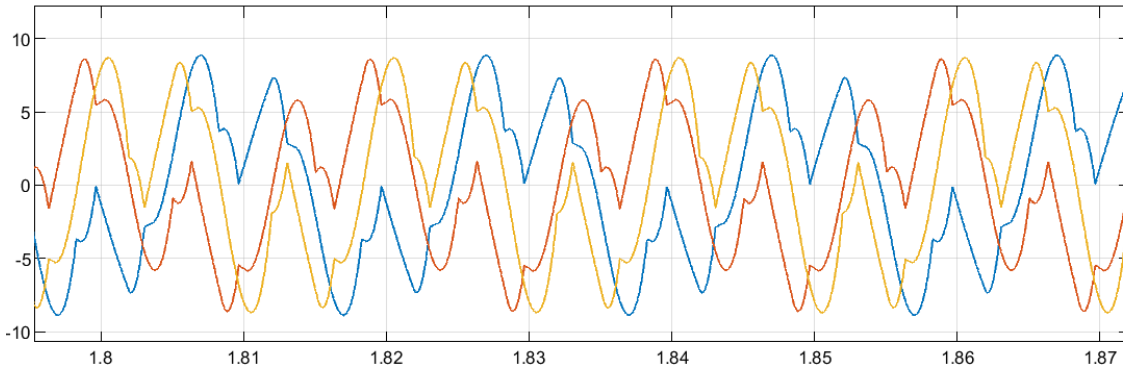
Las corrientes demandadas por la carga por fase permanecen constantes, debido a que se conserva los mismos valores carga para todo el estudio y se presentan como no senoidales, debido a la parte de fenómenos de distorsión, desfase y desequilibrios que no son compensados.

Al darse una compensación selectiva de ineficiencias la corriente en la red no es puramente activa, obteniendo unas ondas no senoidales con desbalance de corrientes entre fases como se muestra en la Figura 4-15. Igual esta presenta rizado producto del regulador de corriente.



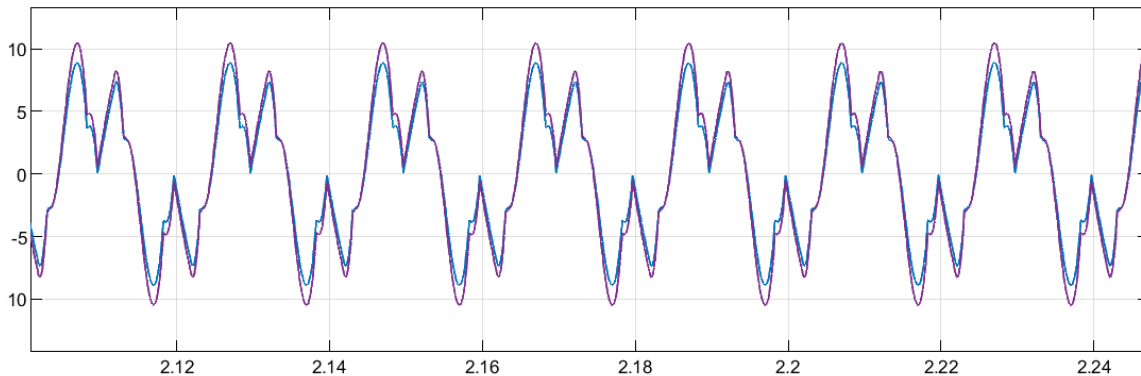
**Figura 4-15 Corrientes inyectada por la red eléctrica por fase durante la compensación global ejecutada por el SAPC**

Una vez aplicados los coeficientes de escalamiento las corrientes de referencia de compensación son las mostradas en la Figura 4-16. El valor máximo de la corriente de referencia es de 8.89 A.



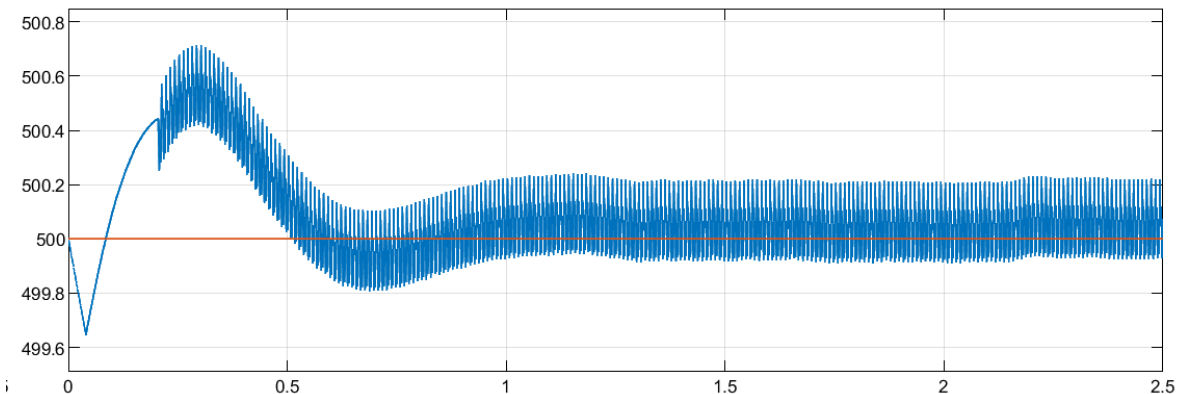
**Figura 4-16 Corrientes de referencia inyectadas por el SAPC**

En la Figura 4-17 se evidencia la diferencia entre la corriente de referencia antes de aplicar los coeficientes de escalamiento, siendo la corriente de referencia (lila) de mayor amplitud antes de la compensación y siendo la corriente de referencia (azul) de menor amplitud después de aplicar los coeficientes de escalamiento. Se comprueba que el algoritmo ajusta la máxima corriente de referencia a 9 A, que es el límite fijado al compensador.



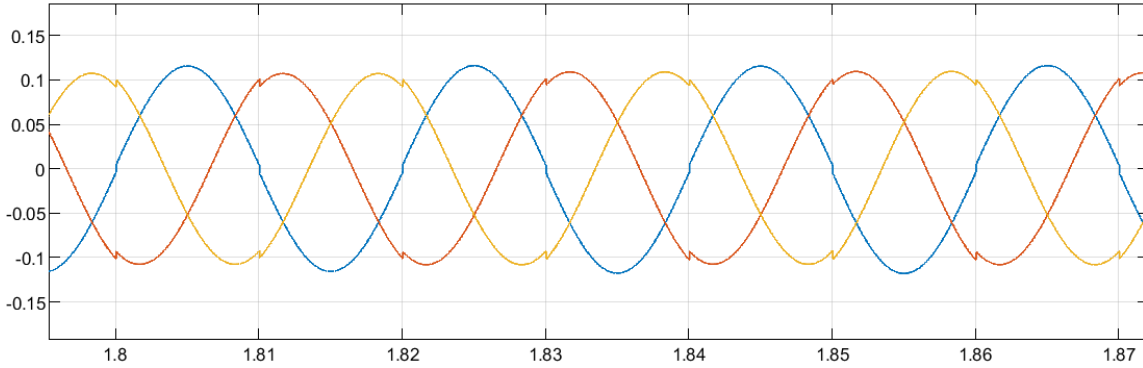
**Figura 4-17 Corriente de referencia fase a inyectada por el SAPC**

La tensión del bus DC mantiene un valor de 500 V que se representa en la Figura 4-18. Se logra el régimen estacionario luego de  $t=1.4s$  de la simulación.



**Figura 4-18 Control de la tensión del bus DC**

La corriente necesaria para mantener el bus DC cargado se muestra en la Figura 4-19



**Figura 4-19 Corriente de compensación bus DC**

Con las definiciones de potencia del IEEE Std. 1459, se determinan las magnitudes de potencias de la carga (Tabla 4-6) y de la red (Tabla 4-7) y (Tabla 4-8) a partir de los valores de tensiones en el PCC y las corrientes inyectadas por la red eléctrica. Estas se comparan con la potencia suministrada por la red como se evidencia en las siguientes figuras, con el objetivo de verificar que las 3 potencias ineficientes de la carga inyectadas por la red eléctrica se reducen como se explica en el 'Estado 10' y que la red eléctrica inyecta el total de la potencia activa fundamental de secuencia positiva requerida por la carga. Por comodidad y para comparar las potencias se repite la Tabla 4-6.

$S_e = 5649 \text{ va}$				
$S_{e1} = 5123 \text{ va}$			$S_{eN} = 2379 \text{ va}$	
$P_1^+ = 4783 \text{ W}$	$Q_1^+ = 1608 \text{ var}$	$S_{U1} = 884.8 \text{ va}$	$D_{e1} = 2379 \text{ va}$	$D_{eV} = 0 \text{ va}$
			$THD_{e1} = 46.43 \%$	$THD_{eV} = 0 \%$

**Tabla 4-6 Potencias de carga según la IEEE Std. 1459**

$S_e = 4801 \text{ va}$				
$S_{e1} = 4795 \text{ va}$			$S_{eN} = 228.8 \text{ va}$	
$P_1^+ = 4784 \text{ W}$	$Q_1^+ = 228.8 \text{ var}$	$S_{U1} = 230.1 \text{ va}$	$D_{e1} = 228.8 \text{ va}$	$D_{eV} = 0 \text{ va}$
			$THD_{e1} = 4.77 \%$	$THD_{eV} = 0 \%$

**Tabla 4-7 Potencias de red ideales según la IEEE Std. 1459**

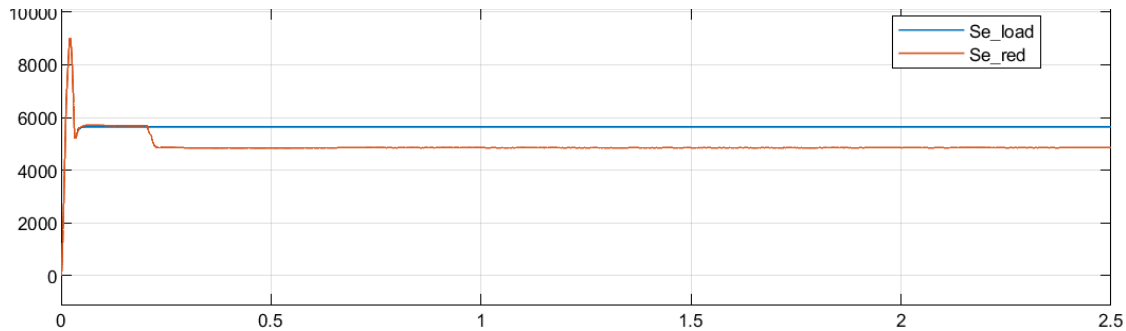
La Tabla 4-7 muestra los valores ideales obtenidos con un modelo de Simulink ideal. Se obtiene la corriente suministrada por la red eléctrica mediante la resta aritmética de las corrientes ineficientes de la carga respecto de las corrientes totales de la carga para calcular sus potencias según la IEEE Std. 1459. Debido a que se da la compensación selectiva 'Estado 10' de ineficiencias, las potencias ineficientes  $Q_{1_{red}}^+$ ,  $S_{U1_{red}}$  y  $D_{e1_{red}}$  resultan de igual valor entre si e inferiores a  $S_{U1_{load}}$ .



$S_e=4854 \text{ va}$				
$S_{e1}=4844 \text{ va}$			$S_{eN}=304.5 \text{ va}$	
$P_1^+=48.33 \text{ W}$	$Q_1^+=237.4 \text{ var}$	$S_{U1}=233.8 \text{ va}$	$D_{e1}=304.5 \text{ va}$	$D_{ev}=0 \text{ va}$
			$THD_{e1}= 6.28 \%$	$THD_{ev}=0 \%$

**Tabla 4-8 Potencias de red según la IEEE Std. 1459**

La *Tabla 4-8* muestra los valores de las potencias considerando el compensador conectado al PCC y el 'Estado 10' de compensación selectiva. En este caso  $D_{e1\_red}$  difiere de  $Q_{1\_red}^+$  y  $S_{U1\_red}$ , debido al rizado de corriente generado por el modulador por banda histéresis para el control del SAPC que incrementa el valor compensado de  $D_{e1\_red}$ .



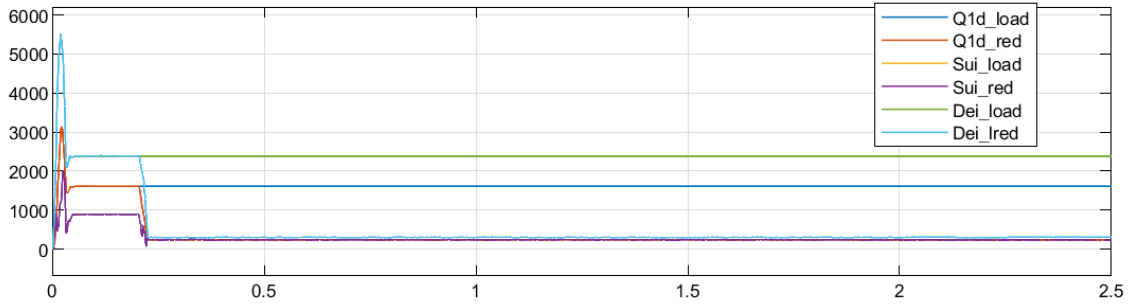
**Figura 4-20 Potencia aparente efectiva  $S_e$**

La potencia aparente efectiva de red  $S_{e\_red}$  en lugar de ser de valor igual a la  $S_{e\_load}$ , se ve disminuida en un valor igual a la potencia inyectada por el SAPC.

Se puede calcular de:

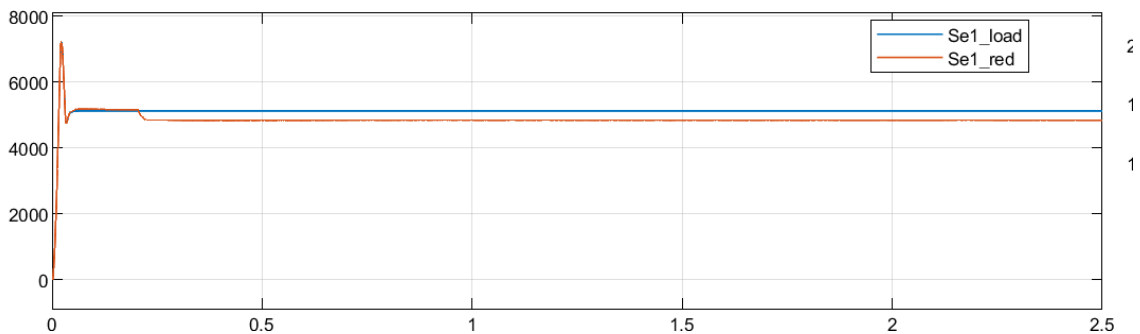
$$S_{e\_SAPC} = \sqrt{S_{e\_load}^2 - S_{e\_red}^2} = 2,97 \text{ Kva} \quad (4-2)$$

Mientras la carga requiere  $D_{e1\_load}$ ,  $Q_{1\_load}^+$  y  $S_{U1\_load}$  la red eléctrica suministra  $D_{e1\_red}$ ,  $Q_{1\_red}^+$  y  $S_{U1\_red}$ . Cumpliendo con el 'Estado 10' de compensación selectiva,  $D_{e1\_red} = Q_{1\_red}^+ = S_{U1\_red}$  y de un valor menor que  $S_{U1\_load}$ , el SAPC suministra una parte de potencia efectiva de distorsión de corriente, potencia reactiva fundamental de secuencia positiva y potencia aparente no fundamental que necesita la carga, ya que el SAPC no podría suministrar el total de corrientes ineficientes por haber alcanzado el límite máximo de corriente del inversor. La red eléctrica además suministra íntegramente  $P_{1\_load}^+$ . La potencia  $D_{e1\_load}$  es igual a  $S_{eN\_load}$  debido a que solo se simula distorsión armónica de corriente, más no distorsión armónica de tensión.



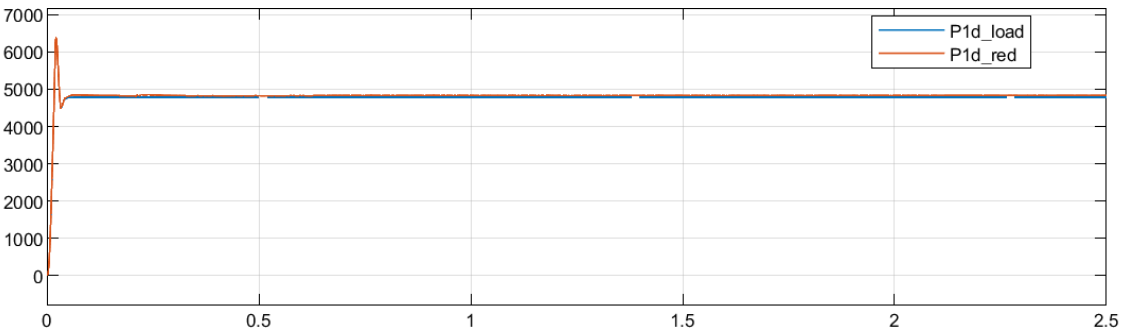
**Figura 4-21 Comparativa entre potencia reactiva fundamental de secuencia directa  $Q_1^+$ , Potencia aparente fundamental de desequilibrio  $S_{U1}$  y Potencia de distorsión de corriente de carga y de red**

La  $S_{e1\_red}$  tiene un valor menor que  $S_{e1\_load}$  debido a que su potencia ineficiente  $Q_1^+$  ha sido ligeramente compensada.



**Figura 4-22 Potencia aparente efectiva fundamental  $S_{e1}$  de carga y de red**

Como se mencionó, la potencia activa fundamental de secuencia positiva será inyectada íntegramente por la red eléctrica Figura 4-23



**Figura 4-23 Potencia activa fundamental de secuencia positiva  $P_1^+$  de carga y red**

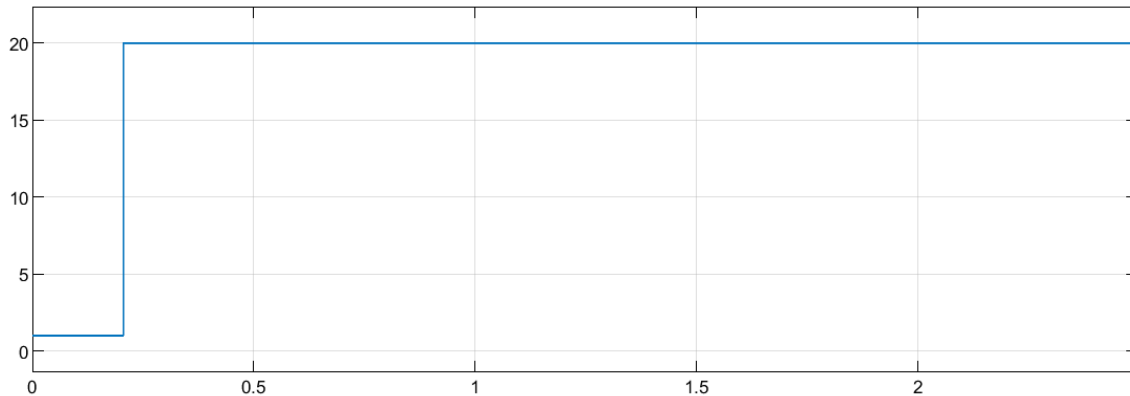
En conclusión, la prioridad del SAPC bajo esta configuración es la compensación de ineficiencias selectiva de la carga y se verifica que las 3 potencias ineficientes se reducen en el porcentaje indicado por los coeficientes de escalamiento. Además se observa que la distorsión armónica de corriente  $THD_{e1}$  de la red es inferior a la de la carga, mejorando con esta solución la eficiencia de la red eléctrica.

#### **4.1.3. Simulación del modelo del SAPC con carga trifásica no lineal, desequilibrada y reactiva efectuando, compensación selectiva sin aporte de energía en el bus DC del convertidor : Caso 2**

En este segundo caso, la  $i_{inv\_max}$  se configura en 4A, siendo estas las condiciones de operación del sistema, el SAPC no es capaz de realizar una compensación global por lo

que realiza una compensación selectiva como se muestra en la Figura 4-24. El algoritmo determina los valores de  $K_U=0$  ,  $K_Q=0.31$  y  $K_H=0.48$  a los coeficientes de escalado de la ecuación (2-84), que corresponden al caso en que no se puede llegar a reducir las 3 ineficiencias, sino solo las 2 mayores.

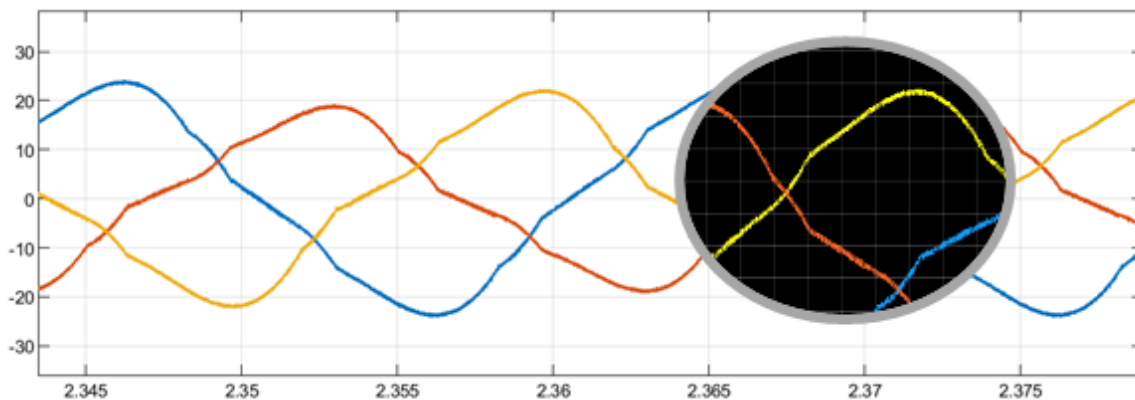
Esta vez aplican múltiples iteraciones (16) para el cálculo de los coeficientes de escalamiento hasta que el cálculo de la corriente de referencia  $i_{ref\_load\_buf}$  sea menor que la corriente máxima del inversor  $i_{inv\_max}$ .



**Figura 4-24 Indicador de compensación global del SAPC (estado 20)**

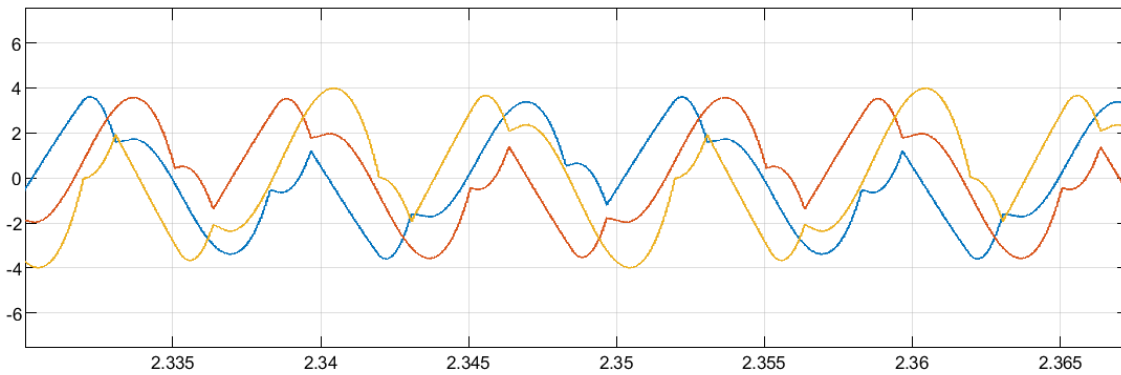
De acuerdo a los valores de los coeficientes , el que tiene mayor valor aplica al de mayor potencia ineficiente reduciendo dicha potencia en un 48% , este coeficiente se relaciona con la potencia aparente efectiva no fundamental; el coeficiente de valor intermedio aplica a la potencia ineficiente intermedia reduciendo dicha potencia en un 31% , este coeficiente se relaciona con la potencia reactiva fundamental de secuencia directa. Mientras que el coeficiente de menor valor aplica a la potencia ineficiente de menor valor reduciendo dicha potencia en 0% , este coeficiente se relaciona con la potencia fundamental de desequilibrio; con el objetivo de reducir las 2 potencias ineficientes de mayor valor hasta que alcancen un valor entre las 2 potencias ineficientes de menor valor registradas.

Al darse una compensación selectiva de ineficiencias la corriente en la red no es puramente activa fundamental de secuencia positiva, obteniendo unas ondas no senoidales con desbalance de corrientes entre fases como se muestra en la Figura 4-25. Igual esta presenta rizado producto del regulador de corriente.



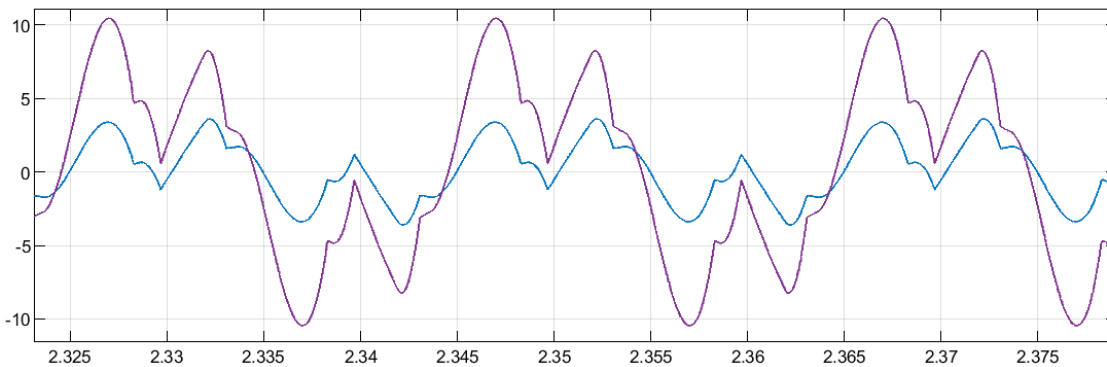
**Figura 4-25 Corrientes inyectada por la red eléctrica por fase durante la compensación global ejecutada por el SAPC**

Una vez aplicados los coeficientes de escalamiento las corrientes de referencia de compensación son las mostradas en la Figura 4-26. El valor máximo de la corriente de referencia es de 3.92A.



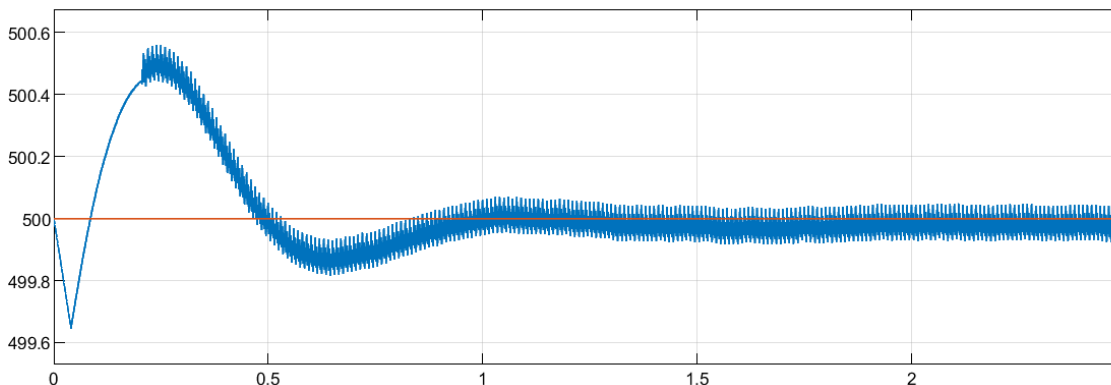
**Figura 4-26 Corrientes de referencia inyectadas por el SAPC**

En la Figura 4-27 se evidencia la diferencia entre la corriente de referencia antes y después de aplicar los coeficientes de escalamiento en una fase, siendo la corriente de referencia (lila) de mayor amplitud antes de la compensación y siendo la corriente de referencia (azul) de menor amplitud después de aplicar los coeficientes de escalamiento. Esta diferencia de corrientes de referencia se debe a que la corriente máxima del inversor limita la corriente de referencia, haciendo necesario ejecutar un nuevo cálculo de coeficientes de escalamiento, reduciendo la corriente de referencia en todas las fases.



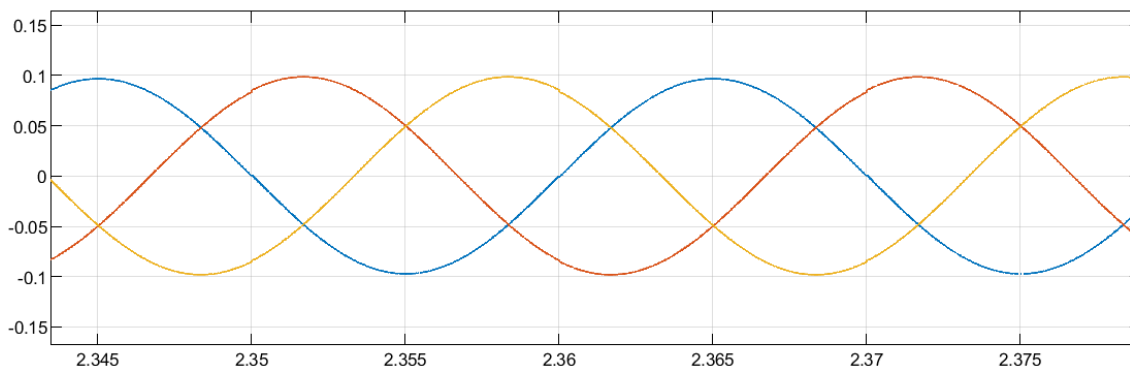
**Figura 4-27 Corriente de referencia fase a inyectada por el SAPC**

La tensión del bus DC mantiene un valor de 500 V que se representa en la Figura 4-28. Se logra el régimen estacionario luego de  $t=1.5s$  de la simulación.



**Figura 4-28 Control de la tensión del bus DC**

La corriente necesaria para mantener el bus DC cargado se muestra en la Figura 4-29



**Figura 4-29 Corriente de compensación bus DC**

Con las definiciones de potencia del IEEE Std. 1459, se determinan las magnitudes de potencias de la carga (Tabla 4-9) y de la red (Tabla 4-10) y (Tabla 4-11) a partir de los valores de tensiones en el PCC y las corrientes inyectadas por la red eléctrica. Estas se comparan con la potencia suministrada por la red como se evidencia en las siguientes figuras, con el objetivo de verificar que las 2 potencia ineficientes de mayor valor de la carga son inyectadas por la red eléctrica como se explica en el 'Estado 20' y que la red eléctrica inyecta el total de la potencia activa fundamental de secuencia positiva y la potencia ineficiente de menor valor. Por comodidad y para comparar las potencias se repite la Tabla 4-9.

$S_e=5649 \text{ va}$				
$S_{e1}=5123 \text{ va}$			$S_{eN}=2379 \text{ va}$	
$P_1^+=4783 \text{ W}$	$Q_1^+=1608 \text{ var}$	$S_{U1}=884.8 \text{ va}$	$D_{e1}=2379 \text{ va}$	$D_{eV}=0 \text{ va}$
			$THD_{e1}=46.43 \%$	$THD_{eV}=0 \%$

**Tabla 4-9 Potencias de carga según la IEEE Std. 1459**

$S_e=5137 \text{ va}$				
$S_{e1}=5003 \text{ va}$			$S_{eN}=1165 \text{ va}$	
$P_1^+=4784 \text{ W}$	$Q_1^+=1165 \text{ var}$	$S_{U1}=885.2 \text{ va}$	$D_{e1}=1165 \text{ va}$	$D_{eV}=0 \text{ va}$
			$THD_{e1}=23.28 \%$	$THD_{eV}=0 \%$

**Tabla 4-10 Potencias de red ideales según la IEEE Std. 1459**

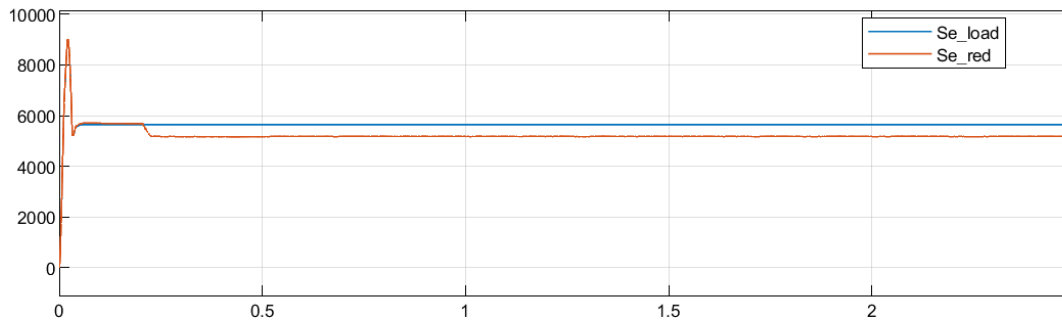
La Tabla 4-10 muestra los valores de las potencias ideales en un modelo donde no se considera al compensador conectado en el PCC y se realiza la resta aritmética de las corrientes ineficientes de la carga respecto de las corrientes totales de la carga obteniendo la corriente suministrada por la red eléctrica para calcular sus potencias según la IEEE Std. 1459. Debido a que se da la compensación selectiva 'Estado 20' de ineficiencias, las

potencias ineficientes  $Q_{1\_red}^+$  y  $D_{e1\_red}$  se reducen alcanzando un mismo valor comprendido entre  $Q_{1\_load}^+$  y  $S_{U1\_load}$ .

$S_e=5177$ va				
$S_{e1}=5026$ va			$S_{eN}=1239$ va	
$P_1^+=4822$ W	$Q_1^+=1108$ var	$S_{U1}=886.9$ va	$D_{e1}=1239$ va	$D_{ev}=0$ va
			$THD_{e1}=24.65$ %	$THD_{ev}=0$ %

**Tabla 4-11 Potencias de red según la IEEE Std. 1459**

La *Tabla 4-11* muestra los valores de las potencias considerando el compensador conectado al PCC y el 'Estado 20' de compensación selectiva. En este caso  $D_{e1\_red}$  difiere de  $Q_{1\_red}^+$ , debido al rizado de corriente generado por el modulador por banda histéresis para el control del SAPC que incrementa el valor compensado de  $D_{e1\_red}$ . A pesar de ello estos valores son muy similares demostrando el correcto funcionamiento del algoritmo aplicado al SAPC.

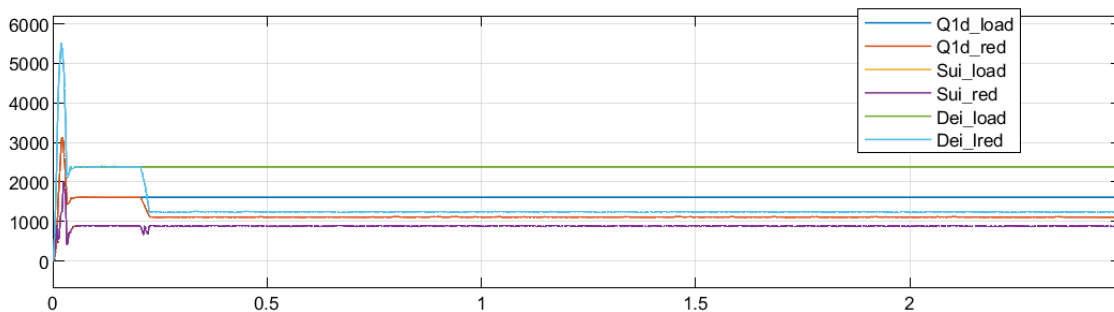


**Figura 4-30 Potencia aparente efectiva  $S_e$  de carga y red**

La potencia aparente efectiva de red  $S_{e\_red}$  en lugar de ser de valor igual a la  $S_{e\_load}$ , se ve disminuida en un valor igual a la potencia inyectada por el SAPC  $S_{e\_SAPC}$ .

Se puede calcular de:

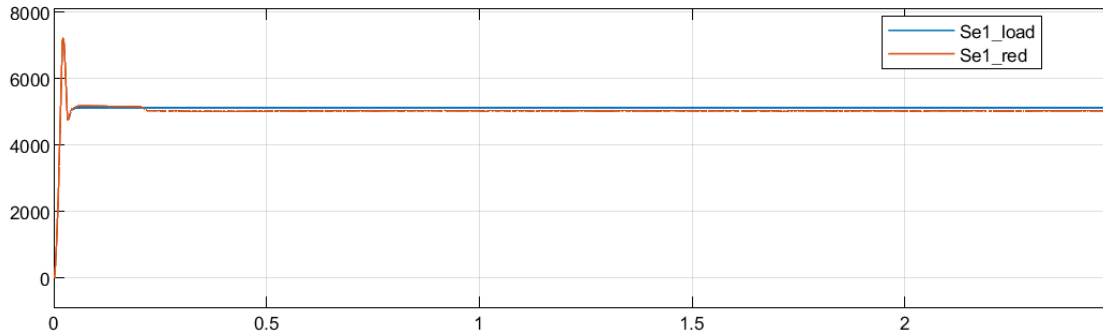
$$S_{e\_SAPC} = \sqrt{S_{e\_load}^2 - S_{e\_red}^2} = 2.26 \text{ Kva} \quad (4-3)$$



**Figura 4-31 Comparativa entre potencia reactiva fundamental de secuencia directa  $Q_1^+$ , Potencia aparente fundamental de desequilibrio  $S_{U1}$  y Potencia de distorsión de corriente  $S_{eN}$  de carga y de red**

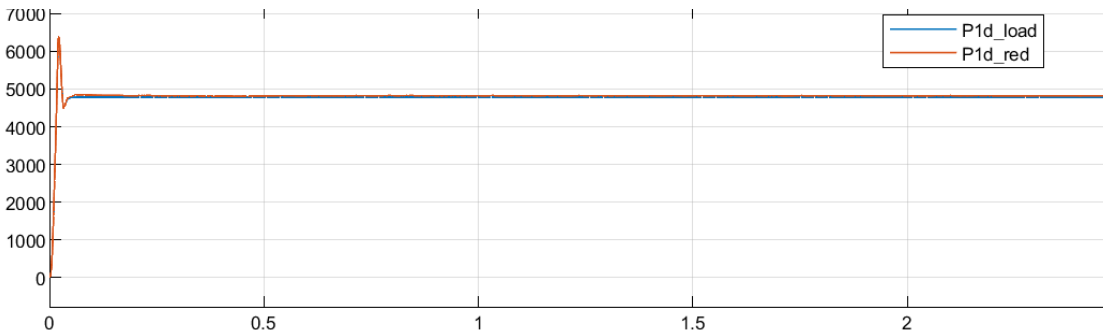
Mientras la carga requiere  $D_{e1\_load}$ ,  $Q_{1\_load}^+$  y  $S_{U1\_load}$  la red eléctrica suministra  $D_{e1\_red}$ ,  $Q_{1\_red}^+$  y  $S_{U1\_red}$ . Cumpliendo con el 'Estado 20' de compensación selectiva,  $S_{U1\_red}=S_{U1\_load}$ , el SAPC suministra una parte de potencia de distorsión armónica de corriente y potencia reactiva fundamental de secuencia positiva que necesita la carga, ya que el SAPC no podría suministrar el total de corrientes por haber alcanzado el límite máximo de corriente del inversor. La red eléctrica además de suministrar íntegramente  $S_{U1\_load}$  suministra  $P_{1\_load}^+$ . La potencia  $D_{e1\_load}$  es igual a  $S_{eN\_load}$  debido a que solo se simula distorsión armónica de corriente, más no distorsión armónica de tensión.

La  $S_{e1\_load}$  es similar a  $S_{e1\_red}$  debido a que su potencia ineficiente  $Q_1^+$  ha disminuido muy poco.



**Figura 4-32 Potencia aparente efectiva fundamental  $S_{e1}$  de carga y de red**

Como se mencionó, la potencia activa fundamental de secuencia positiva será inyectada íntegramente por la red eléctrica Figura 4-33



**Figura 4-33 Potencia activa fundamental de secuencia positiva  $P_1^+$  de carga y red**

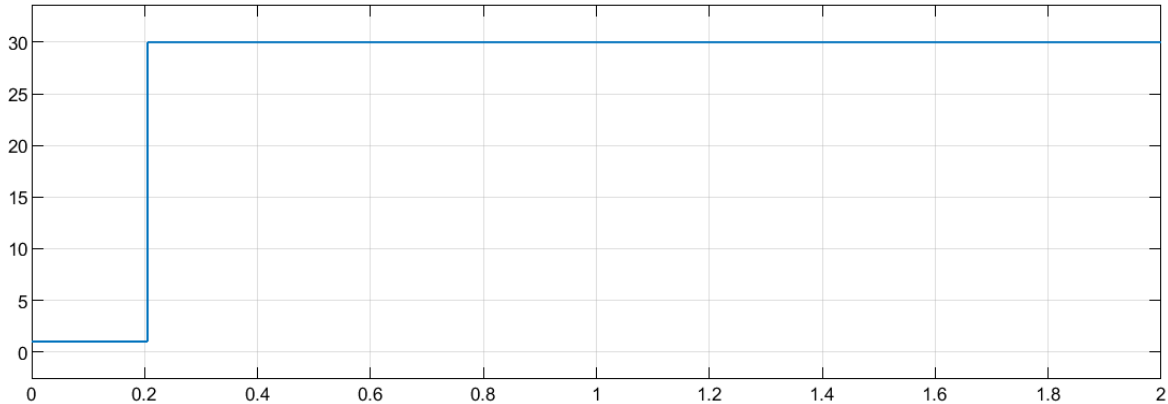
En conclusión, la prioridad del SAPC bajo esta configuración es la compensación de ineficiencias selectiva de la carga y se verifica que las 2 potencias ineficientes de mayor valor se reducen en el porcentaje indicado por los coeficientes de escalamiento. Además se observa que la distorsión armónica de corriente  $THD_{e1}$  de la red es inferior a la de la carga, mejorando con esta solución la eficiencia de la red eléctrica.

#### **4.1.4. Simulación del modelo del SAPC con carga trifásica no lineal, desequilibrada y reactiva, efectuando compensación selectiva sin aporte de energía en el bus DC del convertidor : Caso 3**

En este tercer caso, la  $i_{inv\_max}$  será igual a 1 A, siendo estas las condiciones de operación del sistema, el SAPC no es capaz de realizar una compensación global por lo que realiza una compensación selectiva como se muestra en la Figura 4-34. El algoritmo determina los valores de  $K_U=0$ ,  $K_Q=0$  y  $K_H=0.1254$  a los coeficientes de escalado de la ecuación

(2-84), que corresponden al caso en que no se puede llegar a reducir las 3 ineficiencias, sino la mayor.

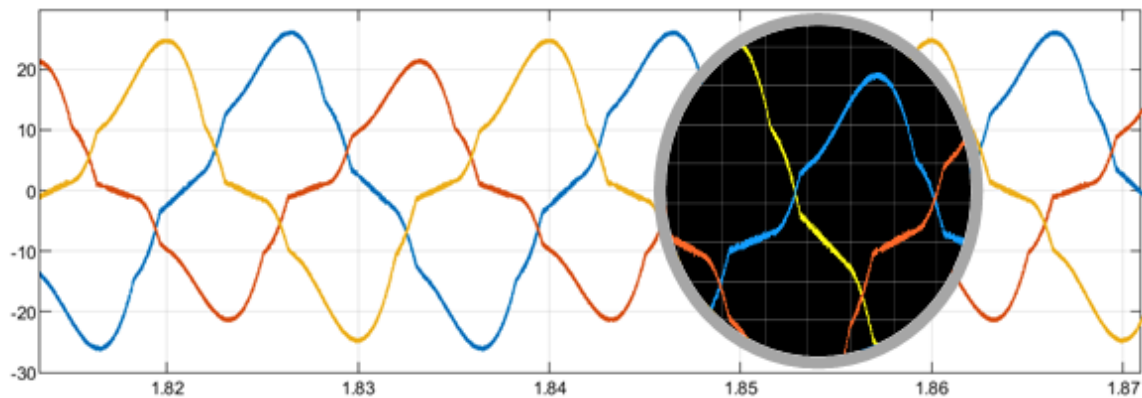
Esta vez aplican múltiples iteraciones (51) para el cálculo de los coeficientes de escalamiento hasta que el cálculo de la corriente de referencia  $i_{ref\_load\_buf}$  sea menor que la corriente máxima del inversor  $i_{inv\_max}$ .



**Figura 4-34 Indicador de compensación global del SAPC (estado 30)**

De acuerdo a los valores de los coeficientes , solo existe un coeficiente que aplica al de mayor potencia ineficiente reduciendo dicha potencia en un 12% , este coeficiente se relaciona con la potencia aparente efectiva no fundamental; con el objetivo de reducir la potencia ineficiente de mayor valor hasta que alcance un valor por encima de la segunda potencia ineficiente registrada.

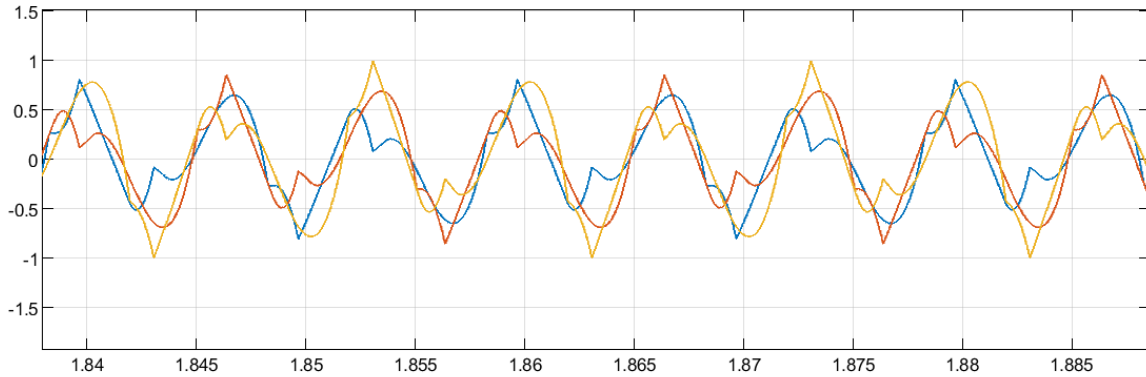
Al darse una compensación selectiva de ineficiencias la corriente en la red no es puramente activa fundamental de secuencia positiva, obteniendo unas ondas no senoidales con desbalance de corrientes entre fases como se muestra en la Figura 4-25. Igual esta presenta rizado producto del regulador de corriente.



**Figura 4-35 Corrientes inyectada por la red eléctrica por fase durante la compensación global ejecutada por el SAPC**

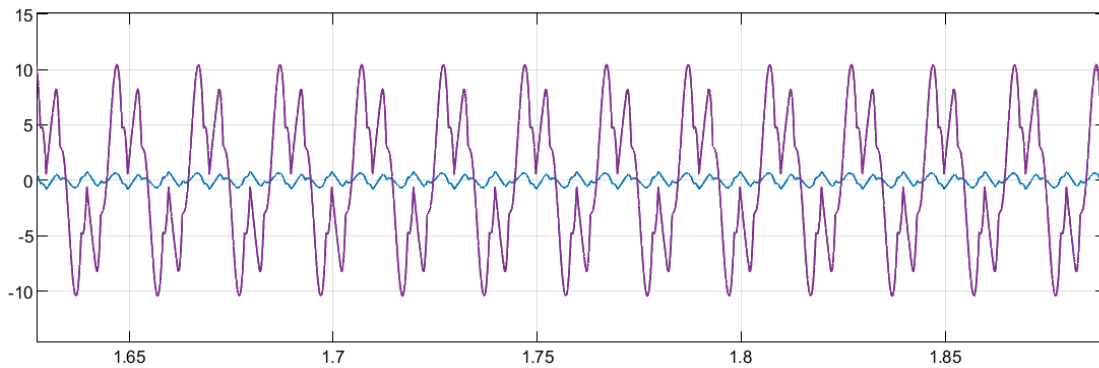
Una vez aplicados los coeficientes de escalamiento las corrientes de referencia de compensación son las mostradas en la Figura 4-36. El valor máximo de la corriente de referencia es de 0.9A.





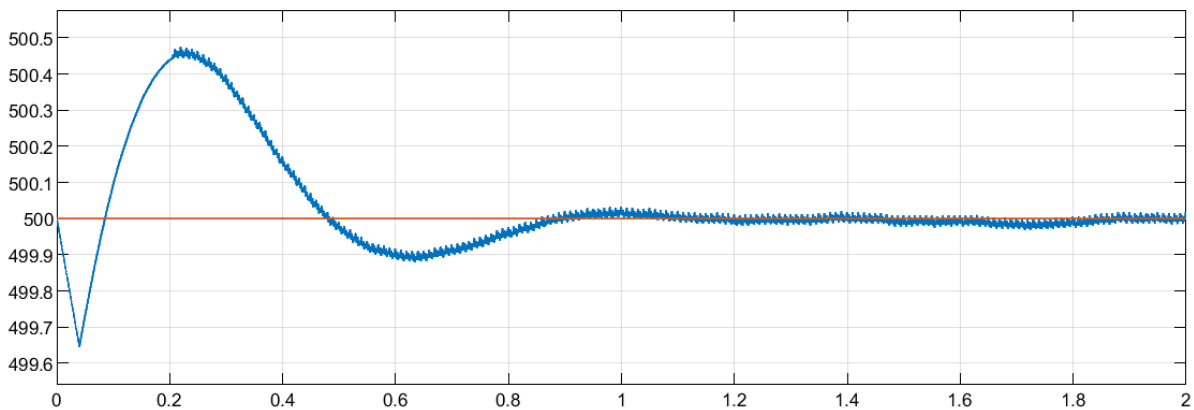
**Figura 4-36 Corrientes de referencia inyectadas por el SAPC**

En la Figura 4-37 se evidencia la diferencia entre la corriente de referencia antes y después de aplicar los coeficientes de escalamiento en una fase, siendo la corriente de referencia (lila) de mayor amplitud antes de la compensación y siendo la corriente de referencia (azul) de menor amplitud después de aplicar los coeficientes de escalamiento. Esta diferencia de corrientes de referencia se debe a que la corriente máxima del inversor limita la corriente de referencia, haciendo necesario ejecutar un nuevo cálculo de coeficientes de escalamiento, reduciendo la corriente de referencia en todas las fases.



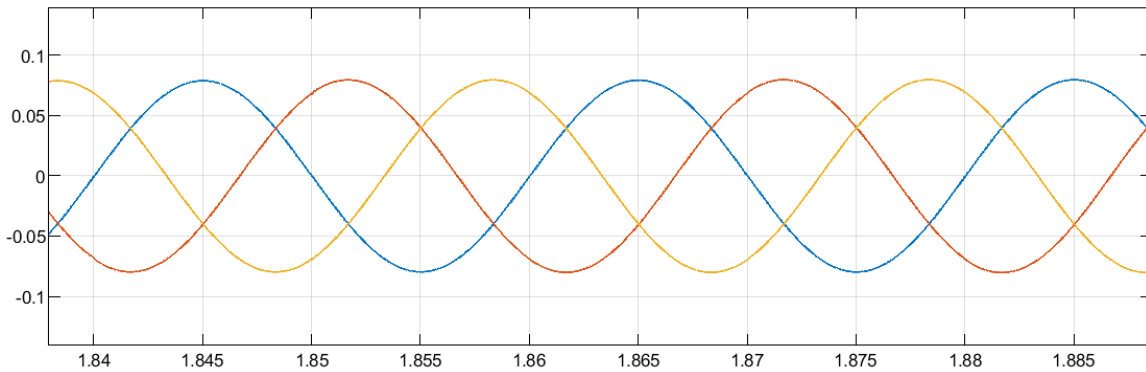
**Figura 4-37 Corriente de referencia fase a inyectada por el SAPC**

La tensión del bus DC mantiene un valor de 500 V que se representa en la Figura 4-38. Se logra el régimen estacionario luego de  $t=1.2s$  de la simulación.



**Figura 4-38 Control de la tensión del bus DC**

La corriente necesaria para mantener el bus DC cargado se muestra en la Figura 4-39.



**Figura 4-39 Corriente de compensación bus DC**

Con las definiciones de potencia del IEEE Std. 1459, se determinan las magnitudes de potencias de la carga (Tabla 4-12) y de la red (Tabla 4-13) y (Tabla 4-14) a partir de los valores de tensiones en el PCC y las corrientes inyectadas por la red eléctrica. Estas se comparan con la potencia suministrada por la red como se evidencia en las siguientes figuras, con el objetivo de verificar que la potencia ineficiente de mayor valor de la carga es inyectada por la red eléctrica como se explica en el 'Estado 30' y que la red eléctrica inyecta el total de la potencia activa fundamental de secuencia positiva y las 2 potencias ineficientes de menor valor. Por comodidad y para comparar las potencias se repite la Tabla 4-12.

$S_e=5649$ va				
$S_{e1}=5123$ va			$S_{eN}=2379$ va	
$P_1^+=4783$ W	$Q_1^+=1608$ var	$S_{U1}=884.8$ va	$D_{e1}=2379$ va	$D_{eV}=0$ va
			$THD_{e1}=46.43$ %	$THD_{eV}=0$ %

**Tabla 4-12 Potencias de carga según la IEEE Std. 1459**

$S_e=5531$ va				
$S_{e1}=5123$ va			$S_{eN}=2084$ va	
$P_1^+=4784$ W	$Q_1^+=1603$ var	$S_{U1}=885.2$ va	$D_{e1}=2084$ va	$D_{eV}=0$ va
			$THD_{e1}=40.67$ %	$THD_{eV}=0$ %

**Tabla 4-13 Potencias de red ideales según la IEEE Std. 1459**

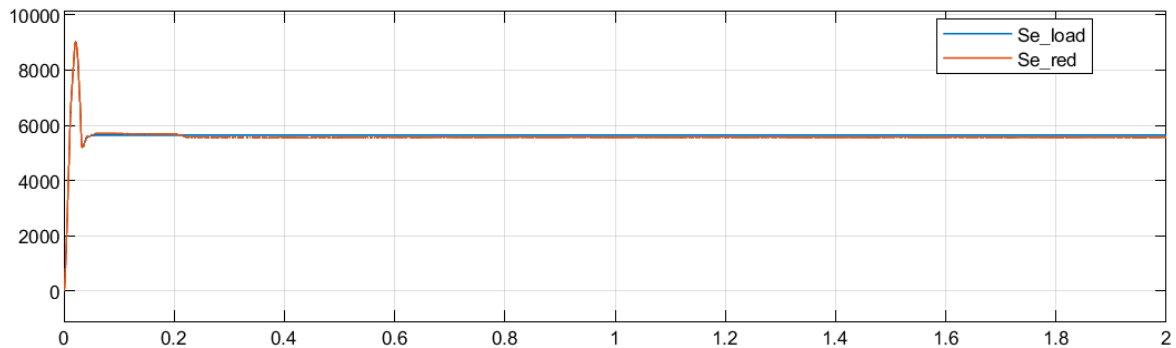
La Tabla 4-13 muestra los valores de las potencias ideales en un modelo donde no se considera al compensador conectado en el PCC y se realiza la resta aritmética de las corrientes ineficientes de la carga respecto de las corrientes totales de la carga obteniendo la corriente suministrada por la red eléctrica para calcular sus potencias según la IEEE Std.

1459. Debido a que se da la compensación selectiva 'Estado 30' de ineficiencias, la potencia ineficiente  $D_{e1\_red}$  se reduce hasta un valor mayor que  $Q_{1\_load}^+$ .

$S_e=5565$ va				
$S_{e1}=5160$ va			$S_{eN}=2085$ va	
$P_1^+=4821$ W	$Q_1^+=1609$ var	$S_{U1}=891.2$ va	$D_{e1}=2085$ va	$D_{eV}=0$ va
			$THD_{e1}=40.4\%$	$THD_{eV}=0\%$

**Tabla 4-14 Potencias de red según la IEEE Std. 1459**

La ~~Tabla 4-14~~Tabla 4-11 muestra los valores de las potencias considerando el compensador conectado al PCC y el 'Estado 30' de compensación selectiva. En este caso todos los valores de potencia del modelo ideal vs. real son casi idénticos, demostrando el correcto funcionamiento del algoritmo aplicado al SAPC.

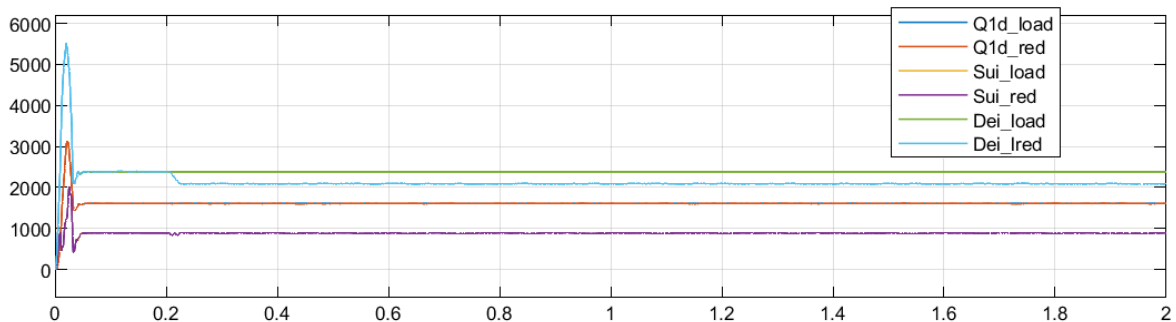


**Figura 4-40 Potencia aparente efectiva  $S_e$  de carga y red**

La potencia aparente efectiva de red  $S_{e\_red}$  tiene un valor cercano a  $S_{e\_load}$  debido a que la compensación de ineficiencias es mínimo, la potencia inyectada por el SAPC es  $S_{e\_SAPC}$ .

Se puede calcular de:

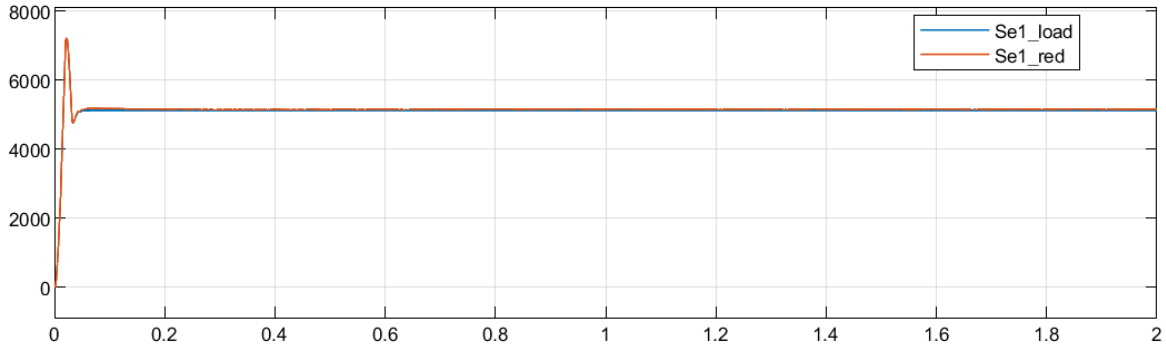
$$S_{e\_SAPC} = \sqrt{S_{e\_load}^2 - S_{e\_red}^2} = 970 \text{ va} \quad (4-4)$$



**Figura 4-41 Comparativa entre potencia reactiva fundamental de secuencia directa  $Q_1^+$ , Potencia aparente fundamental de desequilibrio  $S_{U1}$  y Potencia de distorsión de corriente  $S_{eN}$  de carga y de red**

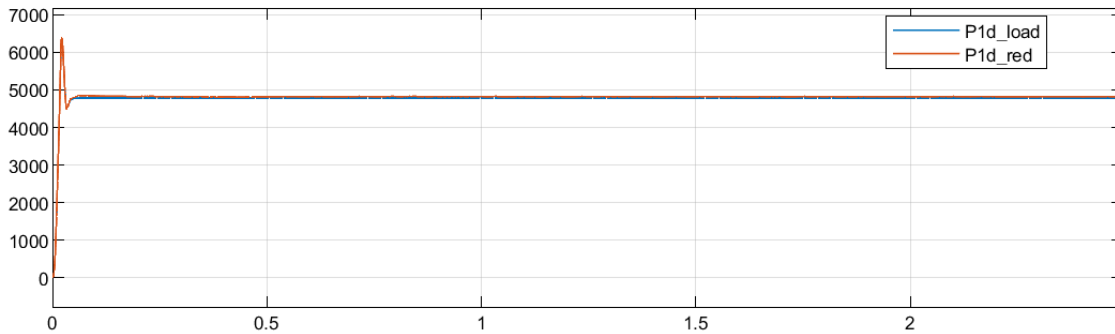
Mientras la carga requiere  $D_{e1\_load}$ ,  $Q_{1\_load}^+$  y  $S_{U1\_load}$  la red eléctrica suministra  $D_{e1\_red}$ ,  $Q_{1\_red}^+$  y  $S_{U1\_red}$ . Cumpliendo con el 'Estado 30' de compensación selectiva,  $S_{U1\_red}=S_{U1\_load}$ ,  $Q_{1\_red}^+=Q_{1\_load}^+$ , el SAPC suministra una parte de la potencia de distorsión armónica de corriente, ya que el SAPC no podría suministrar el total de la corriente por haber alcanzado el límite máximo de corriente del inversor. La red eléctrica suministra  $P_{1\_load}^+$ . La potencia  $D_{e1\_load}$  es igual a  $S_{eN\_load}$  debido a que solo se simula distorsión armónica de corriente, más no distorsión armónica de tensión.

La  $S_{e1\_load}$  es similar a  $S_{e1\_red}$  debido a que su potencia ineficiente  $Q_1^+$  ha disminuido muy poco.



**Figura 4-42 Potencia aparente efectiva fundamental  $S_{e1}$  de carga y de red**

Como se mencionó, la potencia activa fundamental de secuencia positiva será inyectada íntegramente por la red eléctrica Figura 4-43



**Figura 4-43 Potencia activa fundamental de secuencia positiva  $P_1^+$  de carga y red**

En conclusión, la prioridad del SAPC bajo esta configuración es la compensación de ineficiencias selectiva de la carga y se verifica que la potencia ineficiente de mayor valor se reducen en el porcentaje indicado por el coeficiente de escalamiento. Además se observa que la distorsión armónica de corriente  $THD_{e1}$  de la red es inferior a la de la carga, mejorando con esta solución la eficiencia de la red eléctrica.

El  $THD_{e1}$  de la red eléctrica comparado uno a uno con el caso anterior de compensación selectiva, tiene un valor creciente debido a que hay menos compensación de ineficiencias por la reducción de la corriente máxima del inversor.

Con estas 3 simulaciones se comprueba el funcionamiento de los diferentes estados de compensación selectiva de ineficiencias del SAPC logrando optimizar la potencia aparente efectiva de la red eléctrica. Es de gran importancia resaltar que el orden de compensación

de ineficiencias, depende únicamente del ordenamiento de mayor a menor de las potencias ineficientes y esto se relaciona al tipo de carga que se configura en el sistema.

#### 4.1.5. Simulación del modelo del SAPC en modo híbrido de generación y compensación con carga trifásica no lineal, desequilibrada y reactiva, con aporte de energía en el bus DC del convertidor

Hasta el momento las simulaciones realizadas eran sin inyectar corriente en el bus de continua, esto quiere decir sin simular un sistema de generación de energía renovable. De ahora en adelante se simulará el modelo de un sistema de generación de energía renovable inyectando corriente a través de una fuente de corriente conectada en paralelo al bus de continua del SAPC, según como se muestra en Figura 4-44.

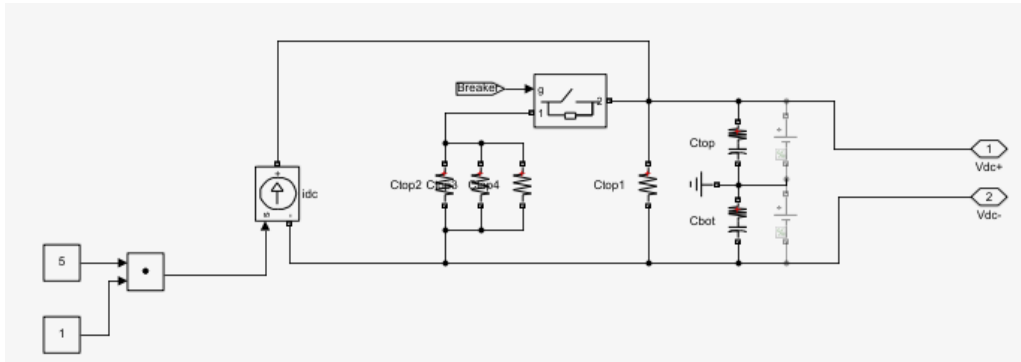


Figura 4-44 Modelo de conexión a un sistema de generación de energía renovable.

El algoritmo implementado en el SAPC tendrá como función principal inyectar potencia activa de secuencia positiva al PCC. Esta potencia será aprovechada por la carga y cuando sea mayor que la potencia activa de secuencia positiva requerida por la carga la potencia activa restante será absorbida por la red eléctrica para su distribución, creando un sistema de generación distribuida.

Mientras el SAPC esté operando en modo generación, se verifica si el inversor dispone de corriente, si es así se puede utilizar en la compensación de ineficiencias de manera global o selectiva de acuerdo a su disponibilidad.

De la potencia activa fundamental de secuencia positiva  $P_1^+$  de la carga vista en la Tabla 4-3, se puede calcular el mínimo valor de corriente que se debe inyectar al bus DC para realizar una generación total de potencia activa que requiere la carga. En este caso la corriente se calcula, como:

$$I_{bus\_DC} = \frac{P_{1\_load}^+}{V_{bus\_DC}} = 9.56 A \quad (4-5)$$

A partir de ello la corriente a inyectar en el bus DC se puede configurar menor a 9.56 A para que el sistema tenga cierta capacidad de compensación. Si es 9.56 A se generará el total de  $P_1^+$ . Si es mayor de 9.56 A se generará el total de  $P_1^+$  y la potencia activa restante será absorbida por la red eléctrica.

##### 4.1.5.1. Simulación del modelo del SAPC en modo híbrido de generación y compensación: Prueba 1

Se tiene la siguiente configuración del modelo,  $i_{inv\_max} = 27 A$  y corriente inyectada al bus DC de  $I_{bus\_DC} = 5 A$ , lo que representa una potencia de generación de 2500W y una

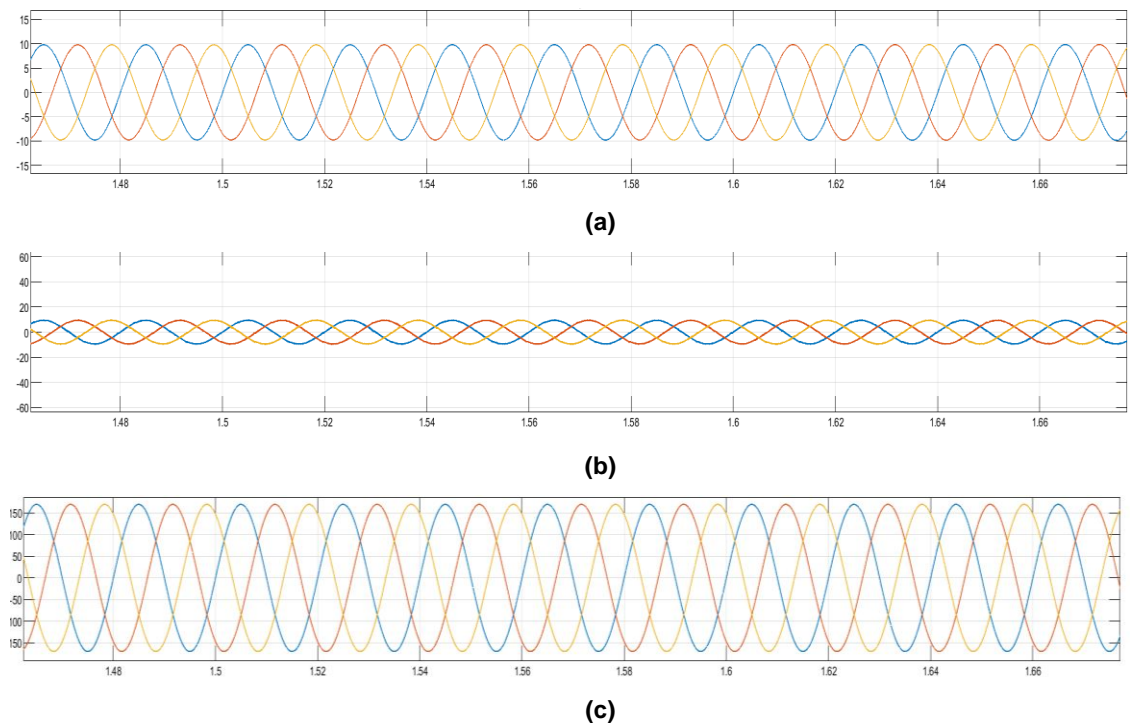
potencia de salida del SAPC por fase  $P_{1\_SAPC}^+ = 833.3W$  no considerando pérdidas en el SAPC.

De la Tabla 4-3 se tiene la potencia activa fundamental de secuencia positiva de la carga  $P_{1\_load}^+ = 4783 W$ , con lo que se infiere que el total de la potencia generada por la inyección de los 5 A de corriente en el bus DC está siendo absorbida como potencia activa por la carga.

En la Figura 4-45 la carga necesita absorber la corriente activa fundamental de secuencia positiva del SAPC para mantener el bus DC en un nivel estable de voltaje. A partir de la potencia activa fundamental de secuencia positiva a la salida del SAPC se puede calcular la corriente de compensación del bus DC, como:

$$I_{z\_compensa\_bus} = \frac{P_{1\_SAPC}^+}{V_{red}} * \sqrt{2} = 10.49A \quad (4-6)$$

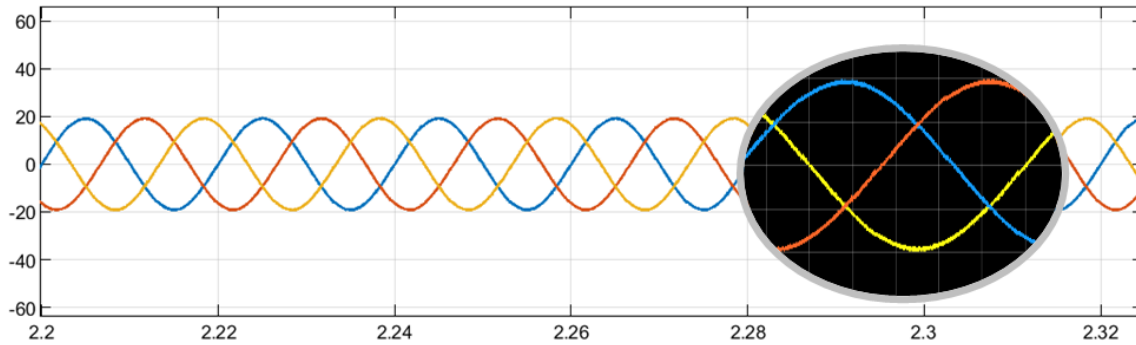
En Figura 4-45 se verifica que la corriente de compensación del bus DC está en fase con la tensión de red, confirmándose que se hace una entrega de potencia activa fundamental de secuencia positiva desde el SAPC hacia la carga. La corriente de red para completar el requerimiento de la carga está en fase con la tensión de red, debido a que la corriente suministrada por la red es puramente activa fundamental de secuencia positiva.



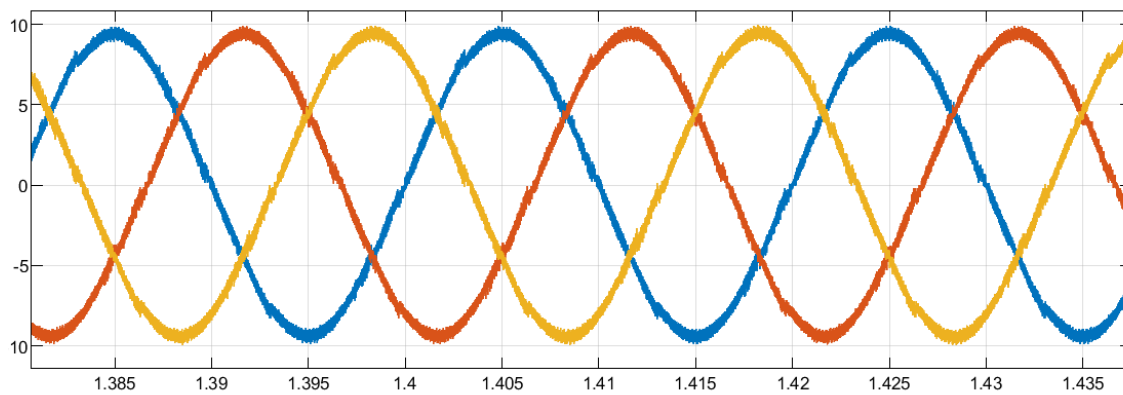
**Figura 4-45 (a) Corriente de compensación del bus DC con inyección de corriente en el bus DC y (b) corriente de red vs (c) tensión de red**

Por comodidad se copia la corriente de red de la Figura 4-5 para verificar su reducción de amplitud ante la inyección de corriente en el bus DC en la Figura 4-46. Aparte de la disminución de corriente inyectada por la red eléctrica hacia la carga, se nota que la

corriente de red tiene características senoidales ya que todas las ineficiencias han sido compensadas, como se detalla más adelante.



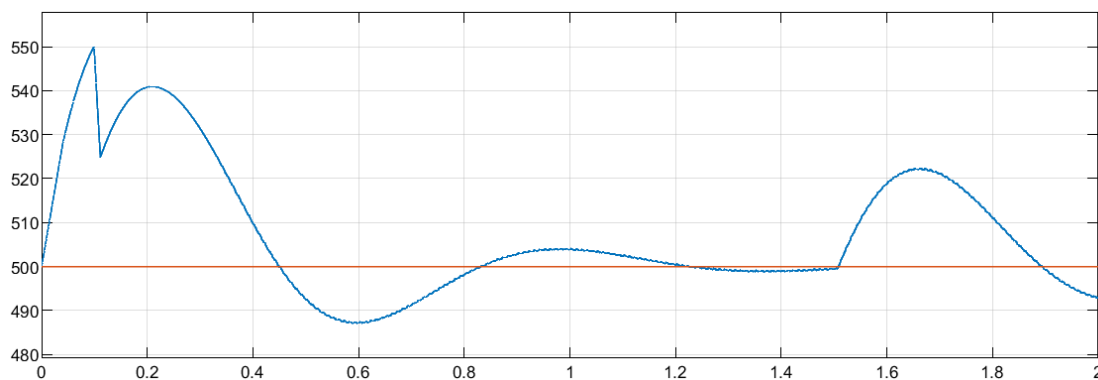
(a)



(b)

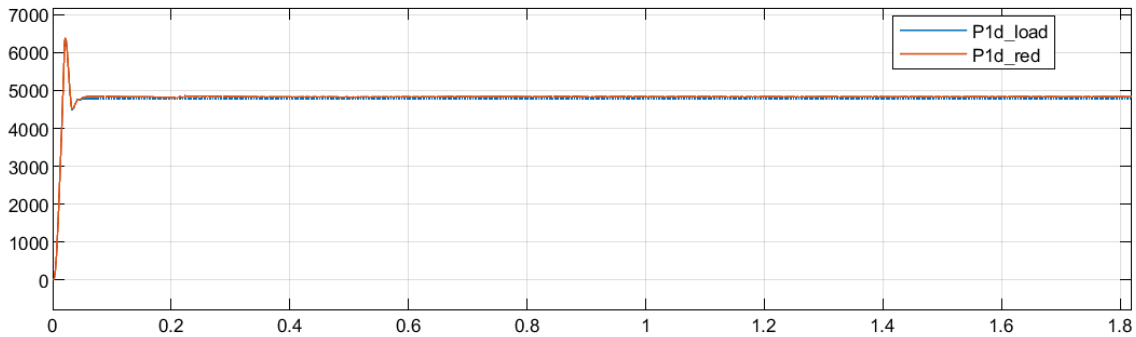
**Figura 4-46 Corrientes inyectada por la red eléctrica (a) antes y (b) después de activar el modo generación del SAPC**

El voltaje del bus DC se mantiene estable ante la transferencia de corriente activa fundamental de secuencia positiva del bus DC hacia la carga. A partir de  $t = 1.5$  s se incrementa la corriente inyectada en el bus DC a 7 A, manteniendo la misma forma de operación híbrida del SAPC de generador y compensador de ineficiencias globales.

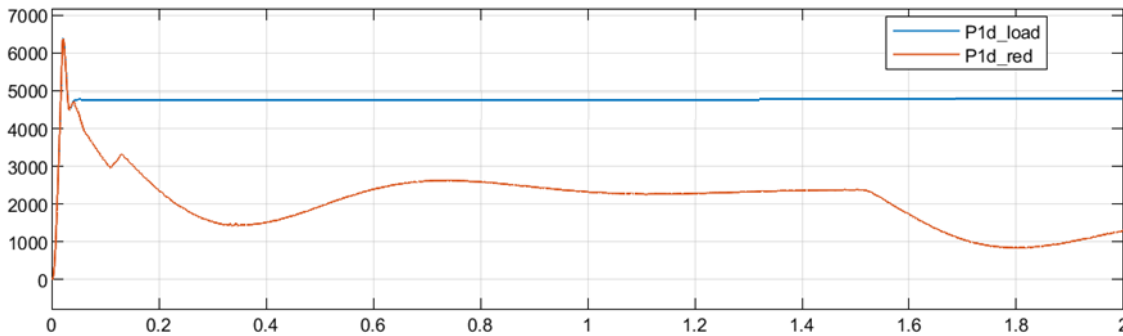


**Figura 4-47 Tensión del bus DC**

La transferencia de la corriente activa fundamental de secuencia positiva del SAPC a la carga, hace que disminuya el consumo de potencia activa fundamental de secuencia positiva de la red (Figura 4-48)



(a)

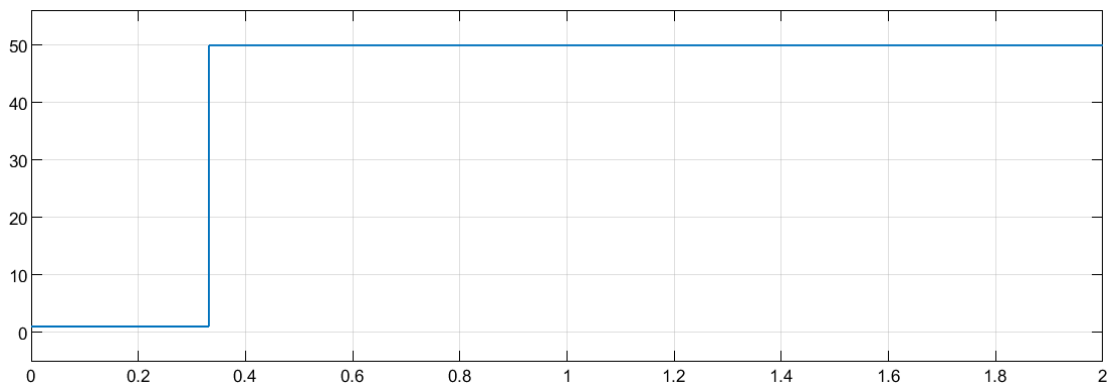


(b)

**Figura 4-48 Potencia activa fundamental de secuencia positiva  $P_1^+$  (a) antes y (b) después de operar en modo híbrido de generador - compensador**

Como se había mencionado anteriormente, la principal función del SAPC es la de inyectar la potencia activa de un sistema de generación conectado al bus DC y en segunda opción, si la capacidad de corriente del inversor lo permite, es trabajar en modo compensador de ineficiencias.

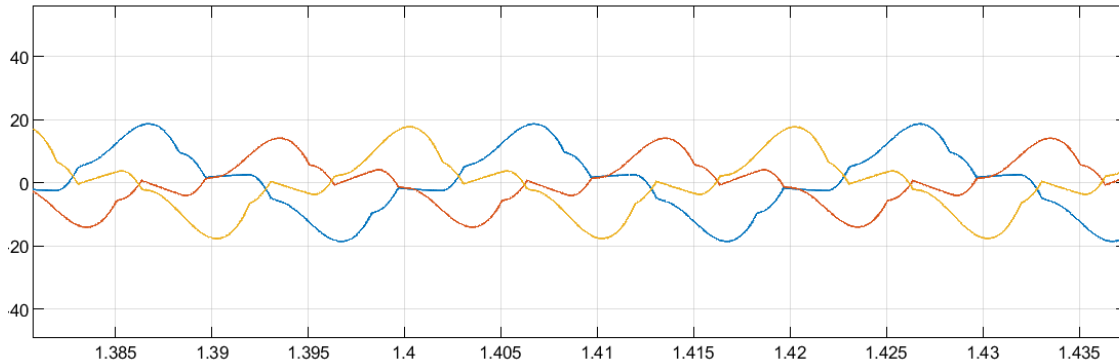
En este caso el inversor aún tiene capacidad disponible y el SAPC da una compensación global de ineficiencias como se muestra en Figura 4-49, donde el algoritmo determina los valores de  $K_Q=1$ ,  $K_U=1$  y  $K_H=1$  para los coeficientes de escalamiento de la ecuación (2-84).



**Figura 4-49 Estado de compensación de ineficiencias del SAPC (estado 50)**



Se tiene la corriente de referencia en la Figura 4-50, donde esta corriente contiene las corrientes para compensar las ineficiencias y la corriente para el mantenimiento del bus DC.



**Figura 4-50 Corrientes de referencia inyectadas por el SAPC**

Con las definiciones de potencia del IEEE Std. 1459, se determinan las magnitudes de potencias de la red (Tabla 4-15) y se comparan con la Tabla 4-3 a partir de los valores de tensiones en el PCC y las corrientes inyectadas por la red eléctrica.

$S_e=2379$ va				
$S_{e1}=2372$ va			$S_{eN}=176.8$ va	
$P_1^+=2372$ W	$Q_1^+=38.41$ var	$S_{U1}=24.17$ va	$D_{e1}=176.8$ va	$D_{eV}=0$ va
			$THD_{e1}=7.45$ %	$THD_{eV}=0$ %

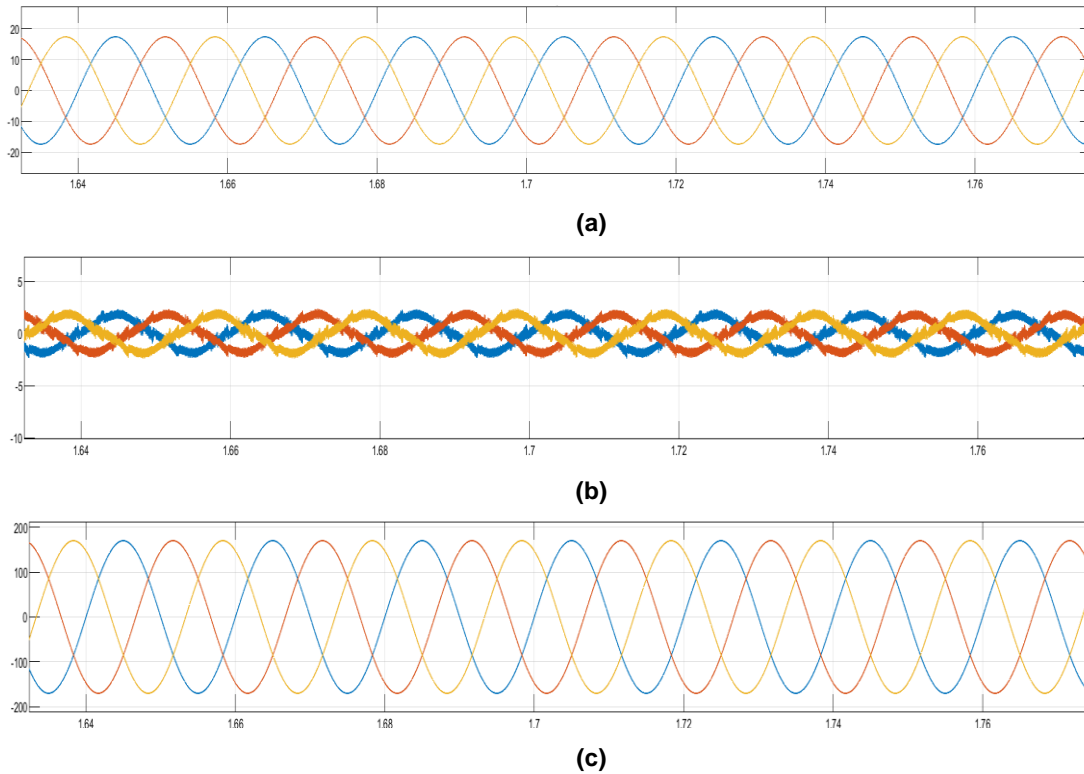
**Tabla 4-15 Potencias de red según la IEEE Std. 1459**

Se evidencia el 'estado 50' de compensación de ineficiencias, donde las potencias ineficientes  $D_{e1_{load}}$ ,  $S_{U1_{load}}$  y  $Q_{1_{load}}^+$  son casi nulas, además  $S_{e1_{red}}$  y  $S_{e1_{red}}$  disminuyen y  $P_{1_{red}}^+$  a disminuido en 2411W que son los suministrados por el SAPC ante su funcionamiento en modo de generación de potencia. El  $THD_{e1}$  se incrementa debido a que la potencia aparente fundamental  $S_{e1_{red}}$  se ve disminuida porque ahora el SAPC es el encargado de inyectarla a la carga.

#### **4.1.5.2. Simulación del modelo del SAPC en modo híbrido de generación y compensación: Prueba 2**

Se tiene la siguiente configuración del modelo,  $i_{inv_{max}}= 27$  A y corriente inyectada al bus DC de 9 A. Con este valor de corriente inyectado en el bus DC se sabe que la potencia activa fundamental de secuencia positiva generada por el SAPC es aún inferior a la requerida por la carga y no habrá corriente disponible para ser absorbida por la red.

Se verifica que la corriente de compensación del bus DC y la corriente de red están en fase con la tensión de red, confirmándose que solo se hace una entrega de potencia activa fundamental de secuencia positiva desde el SAPC hacia la carga

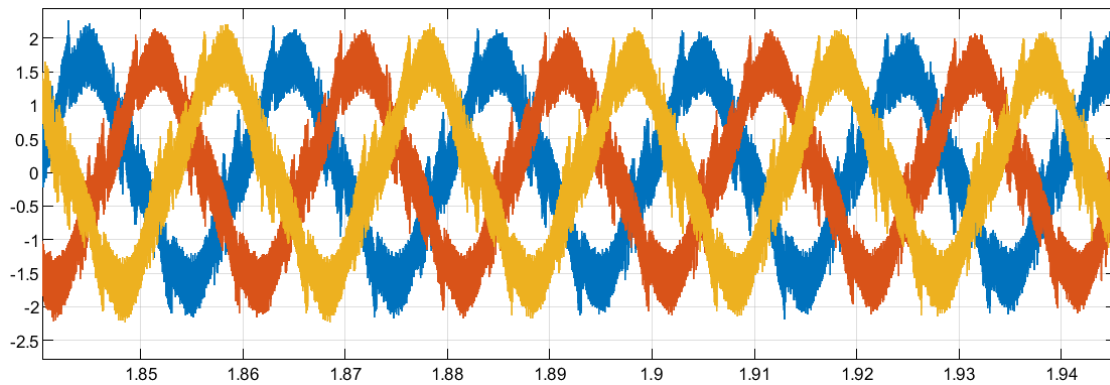


**Figura 4-51 (a) Corriente de compensación del bus DC con inyección de corriente en el bus DC y (b) corriente de red vs (c) tensión de red.**

Por comodidad se copia la corriente de red de la Figura 4-5 para verificar su reducción de amplitud ante la inyección de corriente en el bus DC en la Figura 4-52 . Aparte de la disminución de corriente inyectada por la red eléctrica hacia la carga, se nota que la corriente de red tiene características senoidales ya que todas las ineficiencias han sido compensadas, como se detalla más adelante.



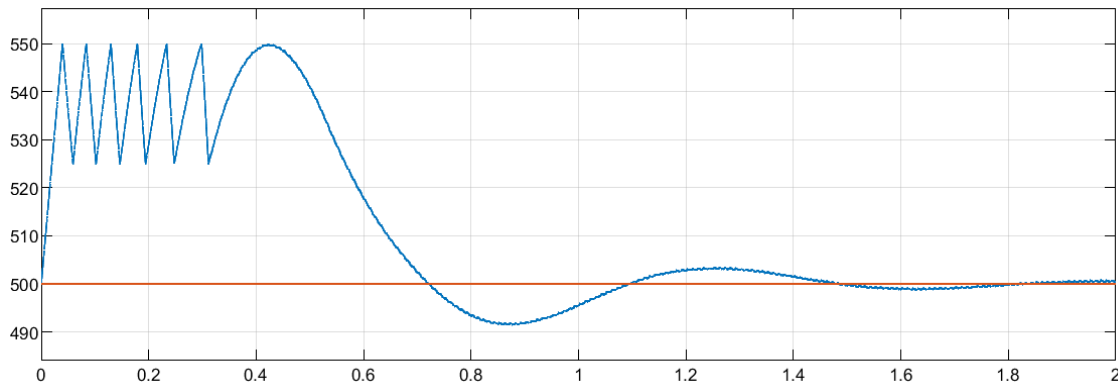
(a)



(b)

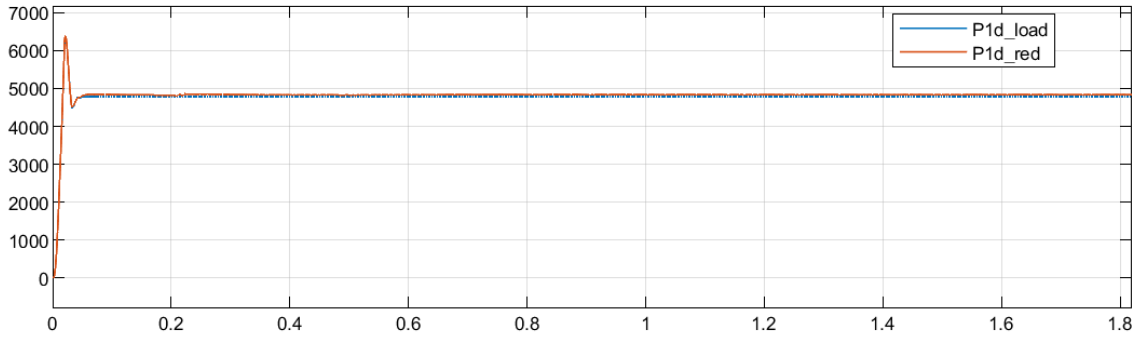
**Figura 4-52 Corrientes inyectada por la red eléctrica (a) antes y (b) después de activar el modo generación del SAPC**

La regulación de tensión del bus DC (Figura 4-53) se realiza mediante la inyección de corriente activa a la carga. A partir de  $t=0.3$  s se considera que el regulador del control del bus DC está respondiendo correctamente ante la inyección de los 5 A en el bus DC. El rizado inicial en la tensión del bus DC, es debido a que el regulador del bus DC no está adecuado para un incremento en escalón de inyección de corriente.

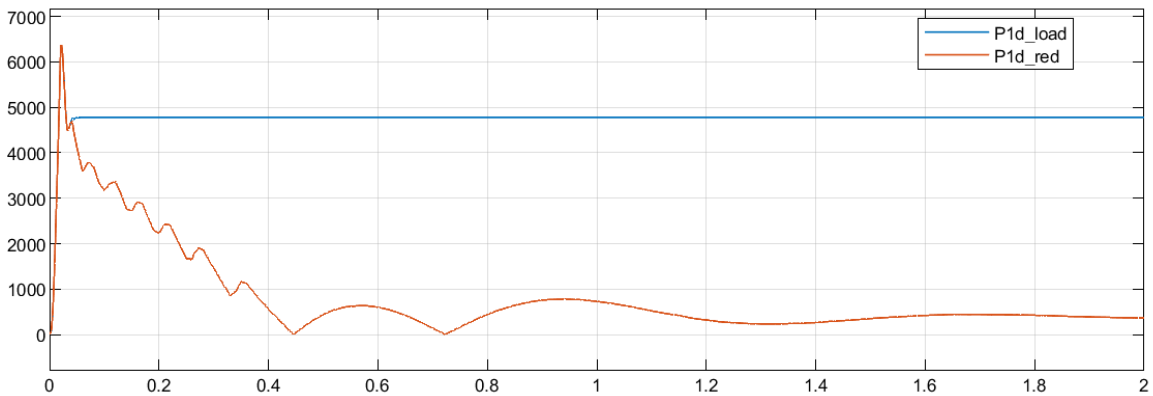


**Figura 4-53 Tensión del bus DC**

La transferencia de la corriente activa fundamental de secuencia positiva del SAPC a la carga, hace que disminuya el consumo de potencia activa fundamental de secuencia positiva de la red (Figura 4-54)



(a)

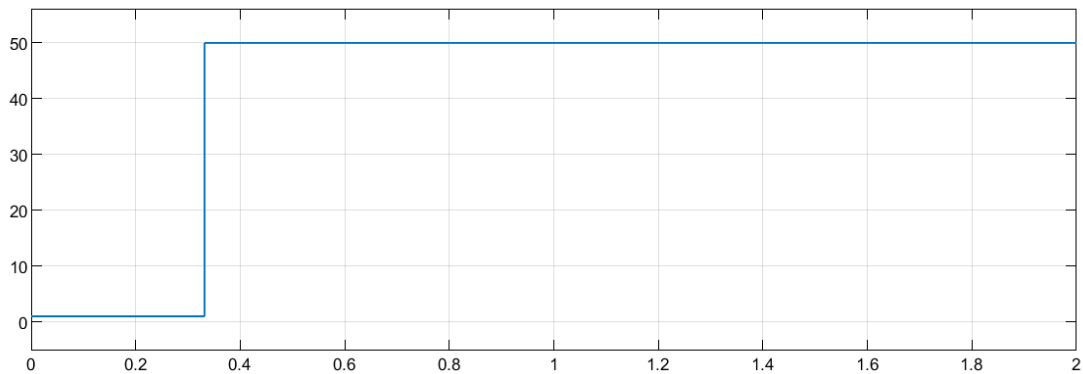


(b)

**Figura 4-54 Potencia activa fundamental de secuencia positiva  $P_1^+$  (a) antes y (b) después de operar en modo híbrido de generador – compensador**

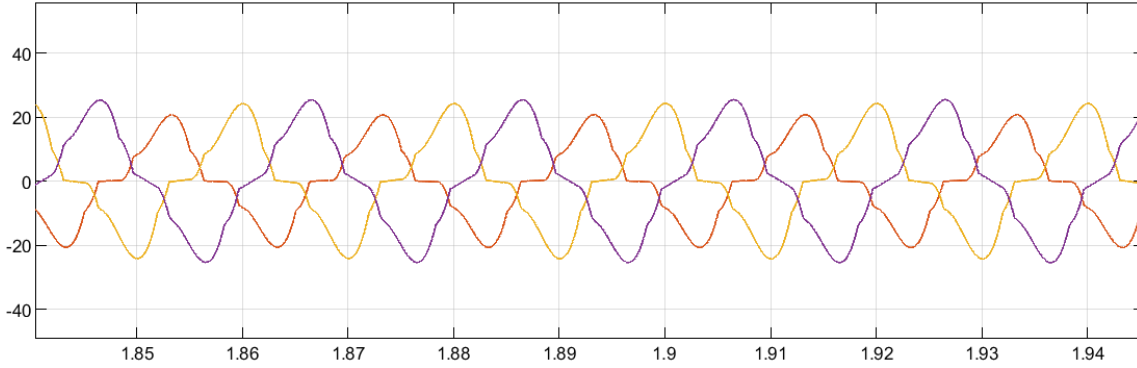
Si comparamos la imagen 2 de las figuras Figura 4-48 y Figura 4-54 se evidencia la disminución de la potencia activa  $P_{1,red}^+$  suministrada por la red mientras la corriente inyectada el bus DC va en aumento.

En este caso el inversor aún tiene capacidad disponible y el SAPC da una compensación global de ineficiencias como se muestra en Figura 4-55Figura 4-49 , donde el algoritmo determina los valores de  $K_Q=1$ ,  $K_U=1$  y  $K_H=1$  para los coeficientes de escalamiento de la ecuación (2-84).



**Figura 4-55 Estado de compensación de ineficiencias del SAPC (estado 50)**

Se tiene la corriente de referencia en la Figura 4-56, que contiene la corriente para compensar las ineficiencias y la corriente para el mantenimiento del bus DC.



**Figura 4-56 Corrientes de referencia inyectadas por el SAPC**

Con las definiciones de potencia del IEEE Std. 1459, se determinan las magnitudes de potencias de la red (Tabla 4-16) y se comparan con la Tabla 4-3 a partir de los valores de tensiones en el PCC y las corrientes inyectadas por la red eléctrica.

$S_e=414.5$ va				
$S_{e1}=372.9$ va			$S_{eN}=180.8$ va	
$P_1^+=366.1$ W	$Q_1^+=67.65$ var	$S_{U1}=21.83$ va	$D_{e1}=180.8$ va	$D_{eV}=0$ va
			$THD_{e1}=48$ %	$THD_{eV}=0$ %

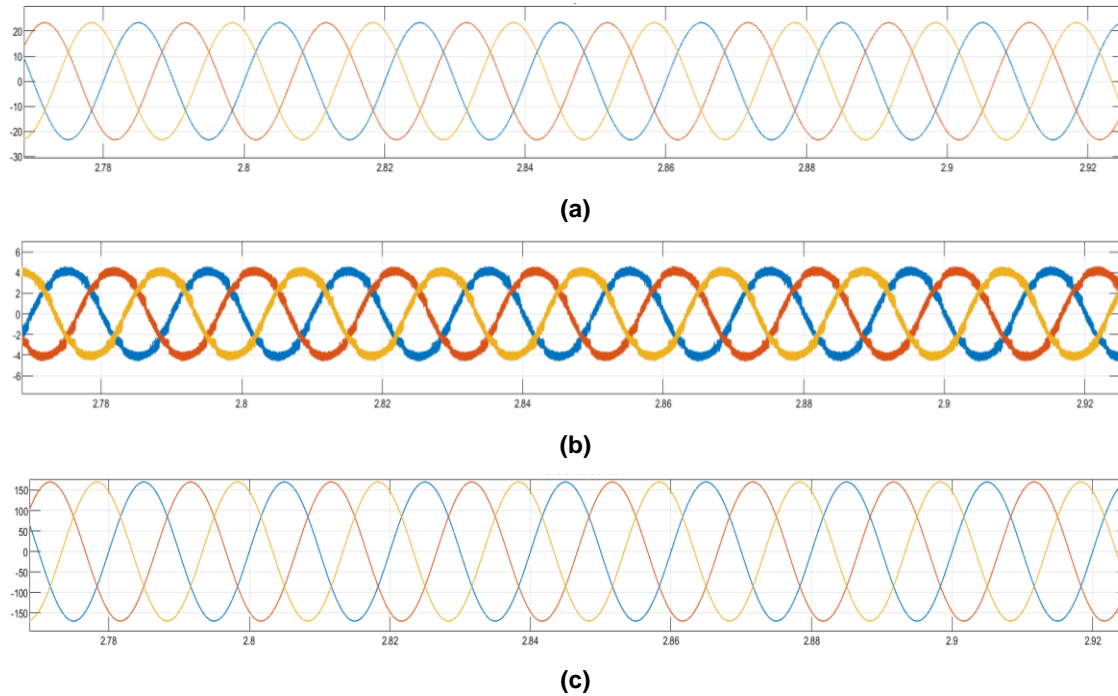
**Tabla 4-16 Potencias de red según la IEEE Std. 1459**

Se evidencia el 'estado 50' de compensación de ineficiencias, donde las potencias ineficientes  $D_{e1load}$ ,  $S_{U1load}$  y  $Q_{1load}^+$  son casi nulas, además  $S_{e1red}$  y  $S_{e1red}$  disminuyen y  $P_{1red}^+$  a disminuido en 4.4 KW que son los suministrados por el SAPC ante su funcionamiento en modo de generación de potencia. El  $THD_{e1}$  se incrementa debido a que la potencia aparente fundamental  $S_{e1red}$  se ve disminuida porque ahora el SAPC es el encargado de inyectarla a la carga.

#### **4.1.5.3. Simulación del modelo del SAPC en modo híbrido de generación y compensación: Prueba 3**

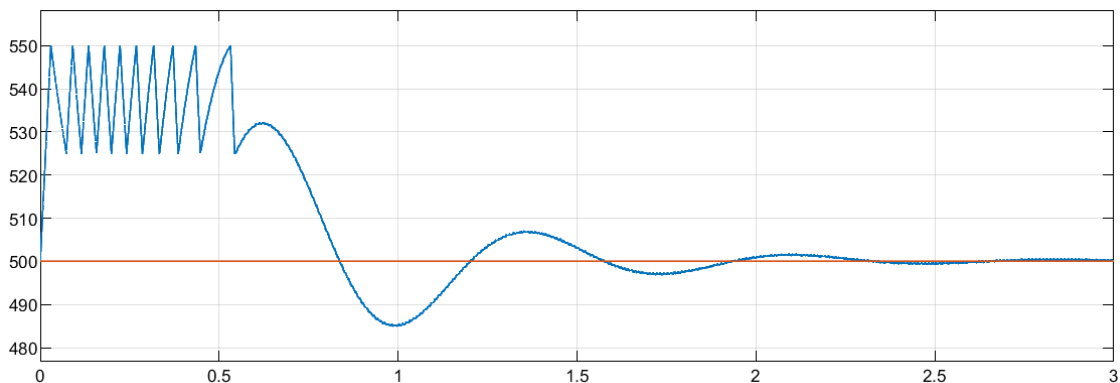
Se tiene la siguiente configuración del modelo,  $i_{inv,max}=27$  A y corriente inyectada al bus DC de 12 A. Con este valor de corriente inyectado en el bus DC se sabe que la potencia activa fundamental de secuencia positiva generada por el SAPC es superior a la requerida por la carga, en este momento habrá corriente disponible para ser absorbida por la red.

En Figura 4-57 se verifica que la corriente de compensación del bus DC es de mayor amplitud fase con la tensión de red con la finalidad inyectar más corriente activa al PCC y regular la tensión del bus DC, confirmándose que la carga absorbe corriente activa fundamental de secuencia positiva del SAPC; mientras que la corriente de red es una onda senoidal de mayor amplitud en contrafase con la tensión de red, confirmándose que la red absorbe la corriente activa fundamental de secuencia positiva restante del SAPC.



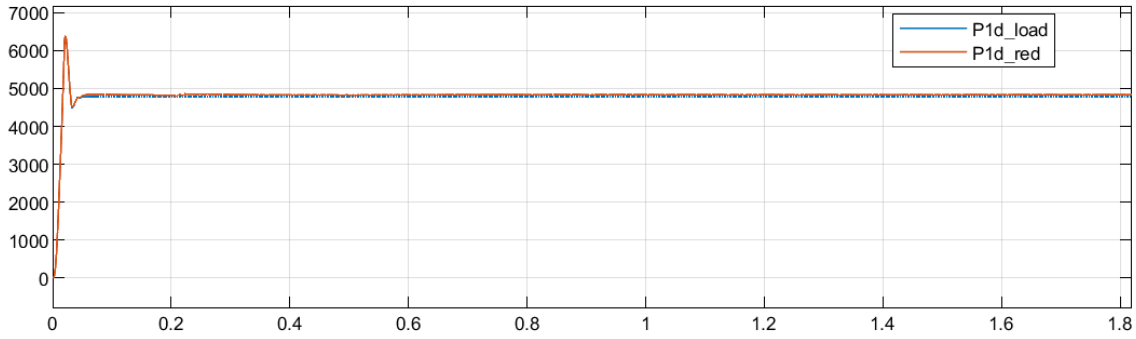
**Figura 4-57 (a) Corriente de compensación del bus DC con inyección de corriente en el bus DC y (b) corriente de red vs (c) tensión de red.**

La regulación de tensión del bus DC (Figura 4-58) se realiza mediante la inyección de corriente activa a la carga. A partir de  $t=0.55$  s se considera que el regulador del control del bus DC está respondiendo correctamente ante la inyección de los 12 A en el bus DC. El rizado inicial en la tensión del bus DC, es debido a que el regulador del bus DC no está adecuado para un incremento en escalón de inyección de corriente aún mayor que en la prueba1.

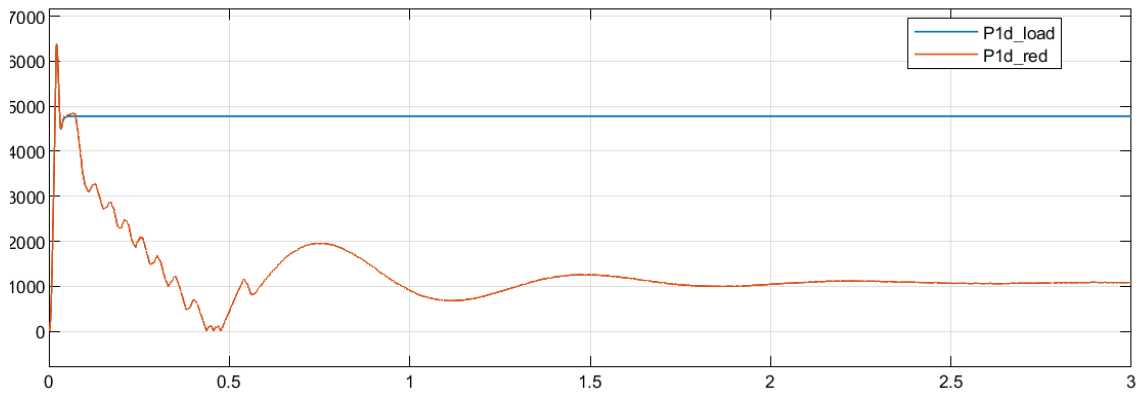


**Figura 4-58 Tensión del bus DC**

La transferencia de la corriente activa fundamental de secuencia positiva del SAPC a la red, hace que aumente el valor de la potencia activa fundamental de secuencia positiva absorbida por la red (Figura 4-59Figura 4-54).



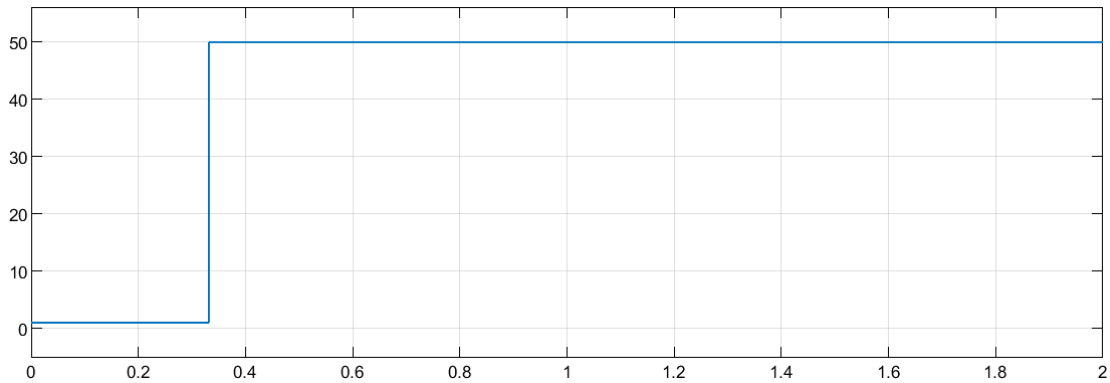
(a)



(b)

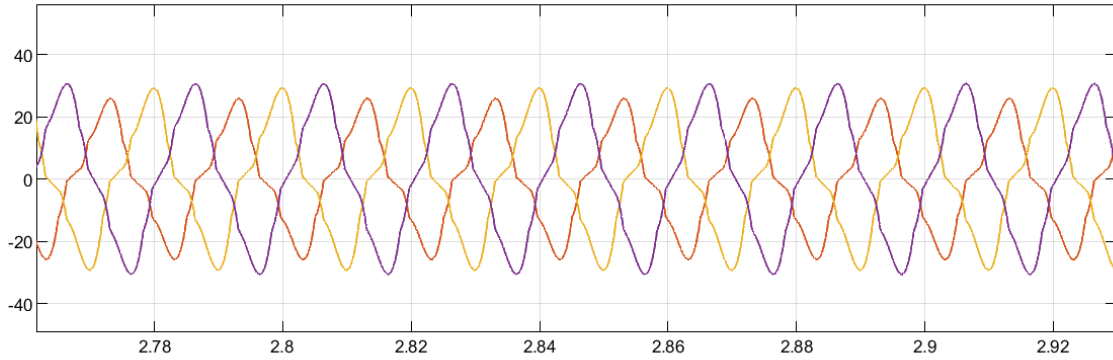
**Figura 4-59 Potencia activa fundamental de secuencia positiva  $P_1^+$  (a) antes y (b) después (2) de operar en modo híbrido de generador – compensador**

En este caso el inversor aún tiene capacidad disponible y el SAPC da una compensación global de ineficiencias como se muestra en Figura 4-60, donde el algoritmo determina los valores de  $K_Q=1$ ,  $K_U=1$  y  $K_H=1$  para los coeficientes de escalamiento de la ecuación (2-84).



**Figura 4-60 Estado de compensación de ineficiencias del SAPC (estado 50)**

Se tiene la corriente de referencia en la Figura 4-61, que contiene la corriente para compensar las ineficiencias y la corriente para el mantenimiento del bus DC.



**Figura 4-61 Corrientes de referencia inyectadas por el SAPC**

Con las definiciones de potencia del IEEE Std. 1459, se determinan las magnitudes de potencias de la red (*Tabla 4-17 Potencias de red según la IEEE Std. 1459*) y se comparan con la *Tabla 4-3* a partir de los valores de tensiones en el PCC y las corrientes inyectadas por la red eléctrica.

$S_e=1105 \text{ va}$				
$S_{e1}= 1090 \text{ va}$			$S_{eN}=180.3 \text{ va}$	
$P_1^+=1086 \text{ W}$	$Q_1^+=91.31 \text{ var}$	$S_{U1}=8.58 \text{ va}$	$D_{e1}=180.3 \text{ va}$	$D_{eV}=0 \text{ va}$
			$THD_{e1}=16.54\%$	$THD_{eV}=0 \%$

**Tabla 4-17 Potencias de red según la IEEE Std. 1459**

Se evidencia el 'estado 50' de compensación de ineficiencias, donde las potencias ineficientes  $D_{e1_{load}}$ ,  $S_{U1_{load}}$  y  $Q_{1_{load}}^+$  son casi nulas, además  $P_{1_{red}}^+$  es suministrado íntegramente por el SAPC ante su funcionamiento en modo de generación de potencia. Comparando la *Tabla 4-16* con la *Tabla 4-17* se ve que el aumento de la corriente activa en la red absorbida desde el SAPC genera un aumento de la potencia aparente efectiva, pues las potencias son calculadas a partir de valores cuadráticos y hace que la absorción de potencia activa por la red que presenta un valor negativo pierda el signo. Por eso no sale la potencia activa de la red negativa (absorción) si no que sigue viéndose positiva, pero si analizamos la *Figura 4-57* las corrientes de red están en contrafase con las tensiones de red, lo que indica que efectivamente se está inyectando la potencia activa sobrante a la red. El  $THD_{e1}$  disminuye debido a que la potencia aparente fundamental  $S_{e1_{red}}$  se ve incrementada porque ahora el SAPC es el encargado de inyectarla a la red.

Con las 3 pruebas realizadas sobre el sistema híbrido de generación- compensación queda comprobado que el algoritmo propuesto para la mejora del aprovechamiento del convertidor DC/AC y la optimización de la potencia aparente efectiva en sistemas de generación distribuida funciona correctamente y permite en primer lugar inyectar potencia activa a la carga, en segundo lugar permite a la red absorber la potencia activa no aprovechada y en tercer lugar compensa fenómenos ineficientes.



# CAPÍTULO 5

## 5. Conclusiones de la simulación y propuesta de actividades a desarrollar en el futuro

### 5.1. Conclusiones de la simulación

En los capítulos anteriores se han descrito las partes del sistema, la matemática utilizada y la lógica implementada, además con las simulaciones se ha puesto a prueba el algoritmo de control del convertidor DC/AC para que opere en modo híbrido de generación-compensación con el método propuesto para la compensación selectiva, obteniendo las siguientes conclusiones:

- Se han obtenido las corrientes de referencia para el convertidor DC/AC basados en el IEEE Std. 1459. Además la teoría de la potencia en el estándar permiten identificar los flujos de potencia que existen en los sistemas eléctricos trifásicos de 4 hilos con conexión a neutro.
- Se ha validado el flujo de corrientes y magnitud de potencias en la red y en la carga ante el estado de compensación global y los diferentes estados de compensación selectiva de las ineficiencias producidas por una carga trifásica no lineal con desbalance de cargas y componentes reactivas. Para la compensación selectiva se han calculado coeficientes de escalamiento que son aplicados a la corriente de referencia del SAPC. Obteniendo como resultado la mejora de la calidad de la corriente de red, en el caso de compensación global la corriente de red será una señal senoidal en fase con la tensión de red con el poco rizado generado por la conmutación del convertidor. En el caso de compensación selectiva la corriente de red estará en mayor o menor proporción desfasada de la tensión de red y presentará características no senoidales.
- Se ha validado el flujo de corrientes y magnitudes de potencias en la red y en la carga ante la conexión del sistema de generación de energía en paralelo al bus DC, modelado por una fuente de corriente. Además de comprobar en simultáneo la compensación global de las ineficiencias generadas por una carga trifásica no lineal con desbalance de cargas y componentes reactivas. Mostrando que la corriente en la red eléctrica es puramente corriente activa fundamental de secuencia positiva o nula, ya que las ineficiencias han sido eliminadas y :
  - La carga absorbe parte de su corriente activa fundamental de secuencia positiva de la red
  - La carga absorbe el total de su corriente activa fundamental de secuencia positiva del SAPC
  - El sistema de generación de energía genera una potencia activa mayor a la de la carga y el convertidor aún no ha alcanzado su potencia aparente nominal, entonces la diferencia de la potencia activa generada y la potencia activa de la carga, estará disponible para absorberse por la red eléctrica. Funcionando así como un sistema de generación distribuido.

En la simulación se consideran redes ideales capaces de absorber toda la corriente activa generada por el convertidor DC/AC.

- Se ha validado la condición de operación del convertidor DC/AC como un sistema híbrido de generación-compensación.
- Se ha comprobado el funcionamiento del método de la ventana deslizante para la obtención de muestras y cálculo de la DFT aplicado a la obtención de las corrientes de referencia del SAPC.
- Utilizando el modelo de simulación se ha comprobado el correcto funcionamiento del regulador de la tensión del bus DC. En el momento que se simuló junto con el modelo del sistema de generación de energía la respuesta del regulador fue lenta hasta que logró estabilizarse.

Con lo expuesto se confirma , desde el punto de vista de la simulación, que el algoritmo implementado es confiable.

## **5.2. Propuesta de actividades a desarrollar en el futuro**

- Implementar un algoritmo que permita la compensación selectiva de ineficiencias, seleccionado específicamente el armónico que se desea compensar.
- Implementar mediante simulación la parte de generación de energía a través de paneles solares.

# CAPÍTULO 6

## 6. Bibliografía

- [1] IEEE, IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions. 2010.
- [2] S. Orts Grau, "Sistema de compensación mediante filtro activo de potencia con sistema de obtención de las corrientes de referencia", Universidad Politécnica de Valencia, 2008
- [3] A. Emanuel, "Apparent Power Definitions For Three phase Systems", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 3, July 1999
- [4] R Arseneau, Y. Baghzouz, J. Belanger, K. Bowes, A. Braun, A. Chiaravallo, M. Cox, S. Crampton, A. Emanuel, P. Filipski, E. Gunther, A. Girgis, D. Hartmann, Shu-Dong He, G. Hensley, D. Iwanusiw, W. Kortebein, T. McComb, A. McEachern, T. Nelson, N. Oldham, D. Piehl, K. Srinivasan, R Stevens, T. Unruh, D. Williams "Practical Definitions for Powers in Systems with Nonsinusoidal Waveforms and Unbalanced Loads : A Discussion", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, January 1996
- [5] C. Martínez Márquez, " Contribución a la mejora de la eficiencia energética mediante convertidores electrónicos trifásicos de generación y compensación en sistemas de generación minieólica", Universidad Politécnica de Valencia, 2019
- [6] W.V. Lyon, "Reactive power and unbalanced circuits," Electrical World, pp. 1417-1420, Jun. 1920.
- [7] L. S. Czarnecki, S. M. Hsu, G. Chen, "Adaptive balancing compensator", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 10, no. 3, pp. 1663-1669, Jul. 1995.
- [8] L. S. Czarnecki, S. M. Hsu, "Thyristor controlled susceptances for balancing compensators operated under nonsinusoidal conditions", IEE Proceedings – Electric Power Applications, vol. 141, no. 4, pp. 177-185, Jul. 1994.
- [9] Manuel C. Rubio, "Eficiencia energética en edificios", Técnica Industrial 25, pp. 18-23, Diciembre 2003.
- [10] A. Emanuel Power Definitions and the Physical Mechanism of Power Flow, ProQuest Ebook Central, Incorporated, 2010.

- [11] K. Oku, O. Nakamura, and K. Uemura, "Measurement and analysis of harmonics in power distribution systems, and development of a harmonic suppression method (in Japanese)," IEE Japan Trans., vol. 114-B, no. 3, pp. 234241, 1994.
- [12] K. Oku, O. Nakamura, J. Inoue and M. Kohata, "Suppression effects of active filter on harmonics in a power distribution system including capacitors (in Japanese)," IEE Jupun Trans., vol. 115-B, no. 9, \_DD\_. 1023-1028, 1995
- [13] F.J Gimeno "Contribución a la mejora de la eficiencia y a la calidad en el suministro en centrales de energía solar fotovoltaica, en régimen permanente" Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Electrónica de la Universidad Politécnica de Valencia 2003
- [14] Transmission and Distribution Committee, "IEEE Std.1159-2009 IEEE Recommended Practice for monitoring electric power quality", 2009
- [15] Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales.Universidad Politécnica de Madrid, "Manual de la energía . Energía y sociedad", [Online]: <http://www.energiaysociedad.es/manenergia/1-1-que-es-la-eficiencia-energetica/>
- [16] T. Brekken, N. Mohan, "A novel doubly-fed induction wind generator control scheme for reactive power control and torque pulsation compensation under unbalanced grid voltage conditions", Proceedings of the IEEE Power Electronics Specialists Conference, I.S.B.N. 0-7803-7754-0/03, 2003.
- [17] Transmission and Distribution Committee, "IEEE std 519-1992 Recommended Practice and requirements for harmonic control in electric power systems", 2014.
- [18] J. Arrillaga, D. A. Bradley, P. S. Bodger, "Power System Harmonics", John Wiley & Sons, 1985.
- [19] S. Fryze, "Active, reactive and apparent power in non-sinusoidal systems", Przegląd Elektrot., no. 7, pp.193-203, Polonia, 1931.
- [20] C. I. Budeanu, "Reactive and fictitious powers", Inst. Romain de l'Energie, Bucharest, Rumania, 1927.

- [21] F. Buchholz, "Das begriffsystem rechteistung. Wirkleistung, totale blindleistung", Munich, Germany: Selbstverlag, 1950.
- [22] N. Muñoz, "Contribución a la mejora de la eficiencia energética en sistemas trifásicos a cuatro hilos mediante la compensación selectiva de las potencias ineficientes", Universidad Politécnica de Valencia, 2011.
- [23] B. Singh and V. Verma, "Selective Compensation of Power-Quality Problems Through Active Power Filter by Current Decomposition," Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 23, pp. 792-799, 2008.
- [24] L. Cristaldi, A. Ferrero, S. Salicone, "A distributed system for power quality measurement", Proc. of the IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference IMTC 2001, pp. 2130-2135, Mayo 2001.
- [25] Salvador Orts, Francisco J. Gimeno-Sales, Salvador Seguí-Chilet, Antonio Abellán-García, , Miguel Alcañiz-Fillol, and Rafael Masot-Peris "Selective Shunt Active Power Compensator Applied in Four-Wire Electrical Systems Based on IEEE Std. 1459", IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 23, NO. 4, OCTOBER 2008
- [26] Transmission and Distribution Committee, "IEEE Std. 1250-2011, IEEE Guide for Identifying and improving voltage quality in power systems", 2011.
- [27] H. Akagi. "New trends in Active Filters for Power conditioning", IEEE transactions on industry applications, vol 32, no 6, November december 1996
- [28] P. Cárdenas, F. Jimenez, C. Peña , "Filtro Activo de Potencia en Paralelo Analisis y Diseño" ISSN: 1692-7257 – Volumen 2 – Número 14 – Año 2009
- [29] M. Aredes, K. Heumann, E. H. Watanabe, "An universal active power line conditioner," IEEE Trans. On Power Delivery, vol. 13, no. 2, pp. 545–551, Apr. 1998.
- [30] S. Orts-Grau, Member, IEEE, N. Muñoz-Galeano, J. C. Alfonso-Gil, S. Seguí-Chilet, Member, IEEE, and F. J. Gimeno-Sales "Meaningful Resolution of the IEEE Std. 1459 Unbalanced Power" IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 26, NO. 3, AUGUST 2011

- [31] José Alfonso, "Contribución a la mejora de los sistemas de medida basados en el IEEE Std. 1459-2000", Universidad Politécnica de Valencia, 2010.
- [32] J. Willems, "Budeanu's Reactive Power and Related Concepts Revisited"; IEEE-IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, VOL. 60, NO. 4, APRIL 2011
- [33] P. Mattavelli, "A closed-loop selective harmonic compensation for active filters," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 37, no. 1, pp. 81–89, Jan./Feb. 2001.
- [34] M.Graña "Significado y medida de los fenómenos de desfase en los sistemas trifásicos desequilibrados, lineales.Aplicación a la medida en sistemas con conductor neutro", Universidad Politécnica de Valencia, 2010.
- [35] S. Fryze, "Active, reactive and apparent power in non-sinusoidal systems", Przegląd Elektrot., no. 7, pp.193-203, Polonia, 1931.
- [36] C. I. Budeanu, "Reactive and fictitious powers", Inst. Romain de l'Energie, Bucharest, Rumania, 1927.
- [37] F. Buchholz, "Das begriffssystem rechteistung. Wirkleistung, totale blindleistung", Munich, Germany: Selbstverlag, 1950.