



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

TESIS

**“EVALUACIÓN DE SOLUCIONES TÉCNICAS
DE PROBLEMAS DE VARIACIONES DE
TENSIÓN”**

**INGENIERO ELÉCTRICO-ELECTRÓNICO EN ELÉCTRICA
DE POTENCIA**

PRESENTA:

ALEJANDRO URBAN VILLA

**DIRECTOR DE TESIS:
M. I. ESTHER BARRIOS MARTÍNEZ**

CIUDAD UNIVERSITARIA 21 /02/ 2012.





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central

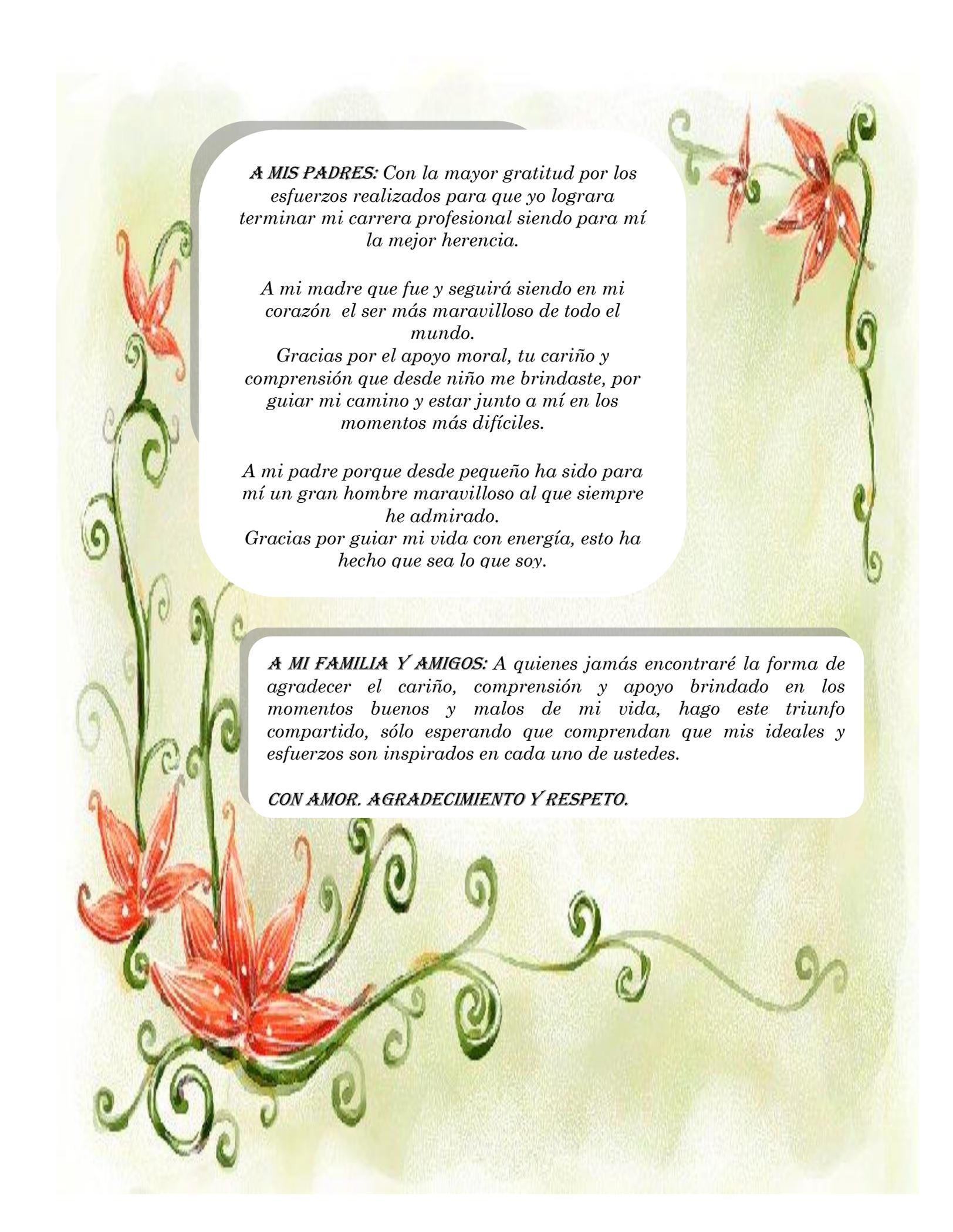


UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



***A MIS PADRES:** Con la mayor gratitud por los esfuerzos realizados para que yo lograra terminar mi carrera profesional siendo para mí la mejor herencia.*

A mi madre que fue y seguirá siendo en mi corazón el ser más maravilloso de todo el mundo.

Gracias por el apoyo moral, tu cariño y comprensión que desde niño me brindaste, por guiar mi camino y estar junto a mí en los momentos más difíciles.

A mi padre porque desde pequeño ha sido para mí un gran hombre maravilloso al que siempre he admirado.

Gracias por guiar mi vida con energía, esto ha hecho que sea lo que soy.

***A MI FAMILIA Y AMIGOS:** A quienes jamás encontraré la forma de agradecer el cariño, comprensión y apoyo brindado en los momentos buenos y malos de mi vida, hago este triunfo compartido, sólo esperando que comprendan que mis ideales y esfuerzos son inspirados en cada uno de ustedes.*

CON AMOR. AGRADECIMIENTO Y RESPETO.

INDICE

Capitulo 1 -----	4
Introducción -----	4
1.1 Motivación-----	6
1.2 Formulación del Problema-----	6
1.3 Propuesta de Solución-----	8
1.4 Hipótesis del Trabajo-----	8
1.5 Metodología-----	9
1.6 Antecedentes-----	10
1.7 Descripción de los Capítulos-----	11
Capitulo 2 -----	13
Estabilidad de Voltaje y Eventos que Afectan la forma de Onda de tensión -----	15
2.2 Continuidad -----	15
Interrupción Momentánea -----	15
Interrupción Temporal -----	15
Interrupción Sostenida -----	15
2.2 Análisis de Estabilidad de Voltaje -----	15
Estabilidad de Sistemas de Potencia -----	16
Definición de Estabilidad en Sistemas de Potencia -----	16
Estabilidad de Voltaje -----	16
2.3 Eventos de Variaciones de Tensión -----	17
Sobre-tensión -----	17
Caída de Tensión -----	17
Huecos de Tensión -----	18
Características de los Huecos de Tensión -----	19
Tensión Swell -----	20
Flicker -----	20
Armónicos -----	22
Características de Distorsión -----	22
Desequilibrio de Corriente -----	23

Desequilibrio de Tensión -----	23
Notching -----	23
Transitorios -----	24
Capítulo 3 -----	26
Soluciones Técnicas para Problemas de Variaciones de Tensión -----	27
3.1 Equipo Para Corrección de Perturbaciones -----	27
Reguladores de Tensión -----	27
Reactancias Inductivas Controladas, Capacitores Controlados y Capacitores de Almacenamiento -----	28
Transformadores -----	28
Filtros y Supresores de Transitorios -----	30
Fuente de Alimentación Uninterrumpida (UPS) -----	32
Restaurador Dinámico de Tensión (DVR) -----	32
Compensador Estático Síncrono de Distribución (D-STATCOM) -----	33
3.2 Técnicas de Modulación -----	33
Modulación de un Solo Ancho de Pulso -----	33
Modulación de Varios Anchos de Pulso -----	35
Modulación Senoidal del Ancho de Pulso -----	36
Modulación Senoidal Modificada de Ancho de Pulso -----	38
Modulación Trapezoidal -----	39
Modulación en Escalera -----	40
Modulación Escalonada -----	41
Modulación por Inyección de Armónicas -----	42
Modulación en Delta -----	44
Capítulo 4 -----	46
Aplicación de los Sistemas Correctores de Eventos -----	46
4.1 Red de Prueba -----	46
4.2 Modelado D-STATCOM -----	48
4.3 Modelado Capacitor -----	57
4.4 Modelado Reactancia -----	61
4.5 Modelado Máquina Síncrona -----	65
4.7 Modelado Transformador -----	72

Conclusiones	76
Bibliografía	79
Glosario	82

CAPITULO

1

INTRODUCCIÓN.

La regulación de la magnitud de tensión en la red se logra controlando la generación y el suministro del flujo de potencia reactiva a través del sistema.

En México, la regulación de tensión es tan importante que se considera como un parámetro de la calidad de energía. Las técnicas de solución para las variaciones de tensión, varían con la utilización de técnicas convencionales o más recientemente, utilizando FACTS instalados. El Compensador Estático de VARS (CEV), utiliza impedancias controladas por semiconductores. Hasta ahora el Sistema Interconectado Nacional cuenta con 21 CEV's instalados como se muestra en la figura 1.1, la cual muestra la ubicación en el territorio nacional de los CEV's y la tabla 1.1 muestra el nombre de la subestación, su capacidad, la fecha de instalación y el nivel de voltaje.



Figura 1.1 Aplicación de CEVs en el Sistema Interconectado Nacional

	Subestación	MVAR	Fecha	KV
1	Santa Ana	-50/0	1982	230
2	Temascal	-300/300	1982	400
3	Acatlán	-200/0	1983	400
4	Cananea	0/80	1984	230
5	Culiacán III	-100/100	1992	230
6	Xul-Ha	-10/40	1998	115
7	Nizuc	-25/100	1998	115
8	Escárcega	-50/150	1998	230
9	Güemez	-90/300	1999	400
10	Texcoco	-90/300	1999	400
11	Topilejo	-90/300	1999	400
12	La Pila	-50/200	1999	230
13	Cerro Gordo	-90/300	2000	230
14	Durango Sur	-50/150	2003	230
15	Camargo	0/200	2003	230
16	Cerro de Oro	-300/300	2005	400
17	Moctezuma	-90/300	2005	400
18	Pie de la Cuesta	-50/150	2005	230
19	Cañada	-90/300	2006	400
20	Nopala	-90/300	2006	400
21	La Paz	-90/300	2007	400

Tabla 1.1. Subestaciones en el Sistema Interconectado Nacional que cuentan con un CEV

La función más importante del D-STATCOM (Compensador Estático Síncrono de Distribución) al igual que el CEV es controlar la magnitud de voltaje del nodo donde se conecta, sin embargo la ventaja del D-STATCOM sobre el CEV es que no usa impedancias y presenta mayor capacidad de compensación de potencia reactiva.

1.1- Motivación.

La estabilidad en el voltaje es importante para tener continuidad en el servicio eléctrico, por qué cuando existe una interrupción o una variación de tensión como lo es: un sobre-voltaje o un bajo-voltaje, se dañan los aparatos eléctricos que poseemos en nuestros hogares. Cuando existe una tensión muy alta, los dispositivos eléctricos internos del aparato pueden quemarse, por otro lado, si existe una tensión baja el aparato no opera.

Existen diferentes tipos de interrupciones que afectan la estabilidad del voltaje, como lo son: los Flickers, la tensión Swell, los transitorios, interrupciones temporales, interrupciones momentáneas e interrupciones sostenidas, que se derivan de variaciones en el sistema de suministro eléctrico. Más allá de conocer las interrupciones del sistema es importante saber cómo podemos compensar este tipo de fallas y cuál es la mejor opción para resolver el problema.

El objetivo de este trabajo es encontrar la mejor solución al problema de variaciones de voltaje, simulando fallas que existen en nuestra señal de tensión utilizando dispositivos convencionales y otros basados en electrónica de potencia.

1.2- Formulación del Problema.

La continuidad del suministro es uno de los aspectos básicos de la calidad del servicio, y al que históricamente se ha prestado más atención. Últimamente, tras los procesos de reestructuración del sector eléctrico, en muchos países están apareciendo cada vez más regulaciones explícitas que controlan la calidad de energía que se suministra a los clientes finales. [6]

La mayoría de estas regulaciones no realiza un tratamiento integral y coordinado de la continuidad del suministro. Un cliente puede ver su suministro interrumpido por problemas en cualquiera de los niveles del sistema eléctrico: generación, transmisión y distribución, es en la etapa de distribución donde se va a poner más énfasis y dar una solución técnica a los problemas de variación de la tensión.

Los principales aspectos que debe cumplir una regulación sobre calidad son:

Remuneración acorde con el nivel de continuidad ofrecido, conseguir que este nivel de continuidad sea el óptimo social, repartir los beneficios de la calidad entre los agentes implicados, a saber, distribuidores y consumidores y garantizar unos niveles mínimos de continuidad a todos los clientes.

Es importante que la regulación tenga en cuenta el origen de las interrupciones de suministro, que implante mecanismos de control en todos los niveles, y que éstos mecanismos sean coherentes entre ellos.

Otro aspecto importante; es la estabilidad en la tensión, éste es un problema en los sistemas eléctricos de potencia cargados altamente, ante una falla o carencia de potencia reactiva, que puede terminar en un colapso de tensión. El colapso de voltaje está asociado con la insatisfacción en la demanda de potencia reactiva, debido a las limitaciones en la producción y transmisión de ésta; mismas que en la producción de potencia reactiva incluyen límites en los generadores y baja producción en los capacitores de bajo voltaje.

Las causas que contribuyen al colapso del voltaje por mencionar algunas son:

- ✚ Incremento de la carga.
- ✚ Alcanzar los límites de potencia reactiva en generadores, condensadores síncronos o SVC.
- ✚ Acción de los cambiadores de taps de los transformadores.
- ✚ Salidas de líneas de transmisión, transformadores y generadores.

Otros aspectos a tomar en cuenta en las variaciones de la tensión y sobre los que se va a simular y analizar a lo largo de los capítulos son:

- ✚ Sobre-voltaje y Bajo-voltaje.
- ✚ Huecos de tensión.
- ✚ Tensión Swell.
- ✚ Flickers.
- ✚ Interrupción momentánea.
- ✚ Interrupción temporal.
- ✚ Interrupción Sostenida.
- ✚ Transitoria.
- ✚ Desequilibrio de tensión trifásico.
- ✚ Tensión armónica.
- ✚ Muesca.
- ✚ Estabilidad de Voltaje.

1.3- Propuesta de Solución.

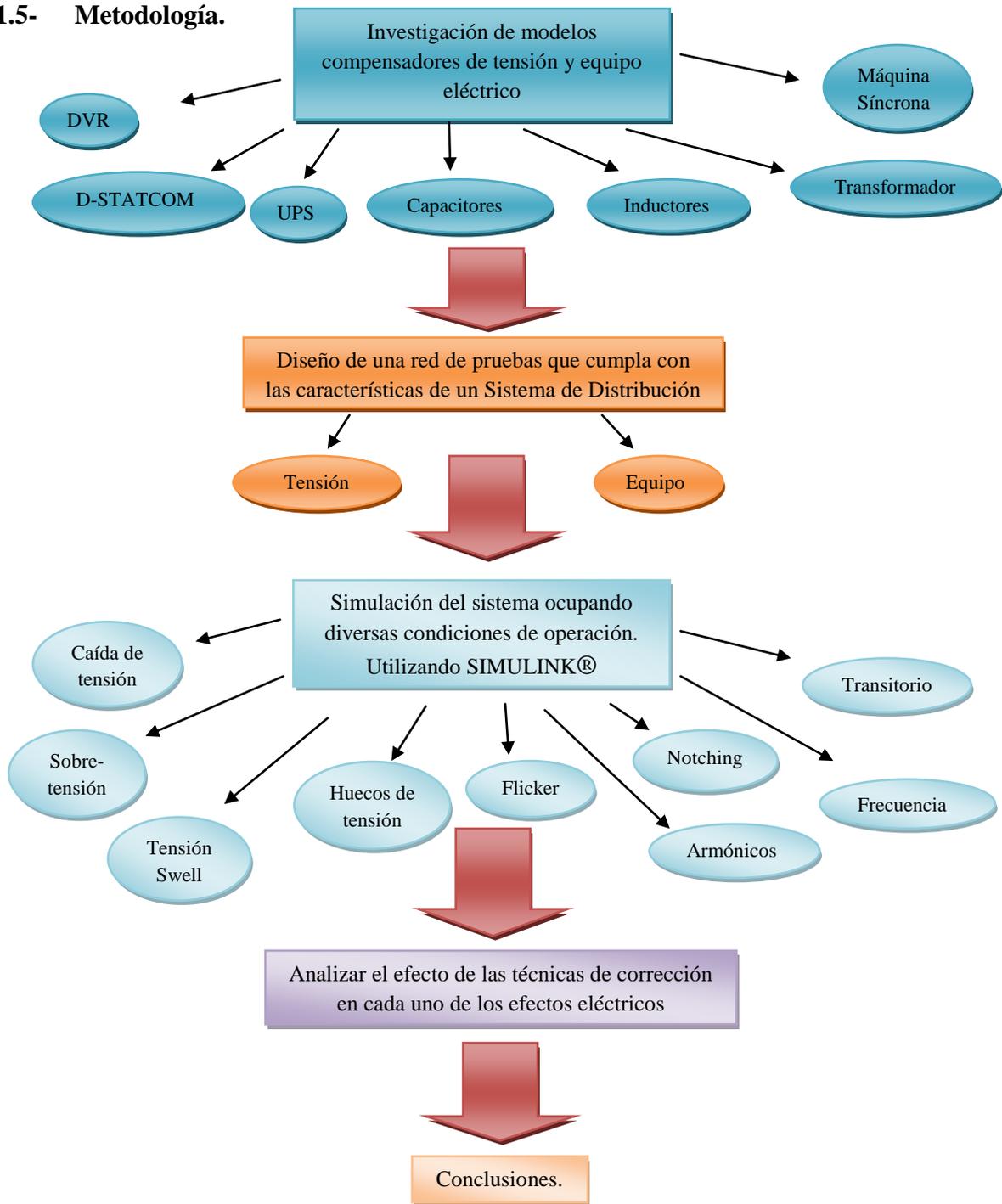
Existen diferentes dispositivos con los que se pueden resolver el problema de variaciones de tensión como son; D-STATCOM, transformadores de aislamiento, compensadores estáticos, DVRS (Restaurador Dinámico de Tensión), maquinas síncronas y UPS (Fuente de Alimentación Ininterrumpida).

Estos dispositivos suministran soluciones técnicas de problemas de variaciones de tensión y a su vez mejoran la calidad de energía.

1.4- Hipótesis de Trabajo.

Mediante las simulaciones que se trabajarán con la ayuda de Simulink® se obtendrá una solución para la estabilidad de tensión dependiendo de las variaciones en la forma de onda que se propongan como son: Flicker, Huecos de tensión, Armónicos, Sobre-voltaje, Caída de tensión, Tensión Swell, Transitorios, Notching. Para mitigar una sobre tensión, se puede utilizar un regulador de tensión; su función es reducir los márgenes de variación del valor eficaz de la tensión de alimentación del receptor y proporcionar una tensión constante a su salida para elevar o disminuir la corriente para que el voltaje sea estable.

1.5- Metodología.



Se realizará una investigación de los modelos compensadores de tensión y equipo eléctrico; D-STATCOM, DVR, UPS, capacitores, inductancias, transformador y máquina síncrona, qué servirán para comprender detalladamente cada uno de los problemas de estabilidad de tensión y cuál será la mejor forma de mitigarlo. Después de analizar cada uno de los modelos, se diseñará una red de prueba que cumplirá con las características de un Sistema de Distribución, tanto en tensión como en equipo eléctrico.

Para poder simular los modelos de nuestros compensadores de tensión, se necesitará de la ayuda de un programa de simulación, para que bajo diversas condiciones de operación se pueda observar su comportamiento y analizar el efecto que tenían los compensadores en cada uno de los disturbios eléctricos.

1.6- Antecedentes.

Históricamente, la mayoría de los equipos son capaces de operar satisfactoriamente con variaciones relativamente amplias de estos tres parámetros; voltaje, corriente y frecuencia. Sin embargo, en los últimos diez años se han agregado al sistema eléctrico un elevado número de equipos no tan tolerantes a estas variaciones; en su gran mayoría los controlados electrónicamente.

En los nuevos equipos electrónicos algo del control se hace directamente a través de la electrónica de conversión de potencia, como son los drives de CA, CD, y fuentes de energía conmutadas; además del equipo electrónico que está en los controles periféricos, como los PLC's.

Con la disponibilidad de estos complejos controles, se desarrolló un control de procesos mucho más preciso, y un sistema de protección mucho más sensible; lo que hace a éstos aún más susceptibles a los efectos de los disturbios en el sistema eléctrico.

Los disturbios y la forma de protegerlos son:

Sobre-voltaje y Caída de tensión: estos tipos de fallas pueden ser compensados por cambios convencionales de tomas de transformadores. Los huecos de tensión, la tensión Swell y los cambios de fase que a veces se presentan simultáneamente con los huecos de tensión,

pueden ser compensados por un dispositivo de regulación de voltaje tales como un *DVR*. Los Flickers pueden ser compensados por un *DVR*. Aunque el desbalance en las tres fases de voltaje y los armónicos de voltaje pueden ser corregidos por un sistema con una frecuencia de corte superior. Sin embargo, esto no se considera debido a las altas pérdidas de conmutación.

Los *UPS* nos ayudan para la compensación de interrupciones de línea, el tipo de *UPS* en paralelo es adecuado para la reducción de pérdidas de potencia en los convertidores. Las interrupciones prolongadas pueden ser compensadas con Generación Distribuida tales como micro-turbinas o pilas de combustible que se instalan en la parte de c.d de los *UPS*. Por otra parte, el desequilibrio en la corriente de armónica y la corriente trifásica causados por las cargas pueden ser corregidos por un *UPS* con frecuencia de corte superior.

Existen ciertos tipos de compensadores de potencia reactiva *D-STATCOM* o *DVR* que sirven para corregir el desbalance armónico y trifásico de corriente causado por las cargas.

Los equipos han probado su funcionamiento adecuado para solucionar variaciones de tensión. Sin embargo, los sistemas eléctricos de potencia son cada vez más robustos, lo que implica la necesidad de proponer soluciones más versátiles.

1.7- Descripción de los Capítulos.

En el *capítulo dos* se da una breve explicación de por qué es importante la estabilidad de voltaje en un SEP (*Sistema Eléctrico de Potencia*), para posteriormente entrar al problema de interrupciones que alteran el voltaje. Al mismo tiempo, se da una breve explicación de las características de cada interrupción y la duración de cada una de ellas. La gran mayoría de estos fenómenos llegan a ser visibles en la forma de onda de la señal de tensión como lo son: los Flickers, sobre y bajo-voltajes, la tensión Swell, los transitorios, los huecos de tensión, los armónicos y los notching.

En el *capítulo tres* se explican los métodos más utilizados para la corrección de interrupciones que afectan la estabilidad en el voltaje, dando algunas características básicas del método de operación y la forma en que estos dispositivos compensan ciertos tipos de eventos. Para poder entender mejor cómo el D-STATCOM, el DVR y los UPS logran

estabilizar la ganancia y el voltaje de salida, es necesario conocer las técnicas de modulación; y es precisamente en este apartado donde se abarcan las técnicas más importantes.

El *capítulo cuatro* muestra las gráficas de cada una de las simulaciones realizadas con la ayuda de Simulink®; cada simulación contiene una breve explicación de cómo se realizó la falla, para posteriormente ser corregida con la ayuda del capacitor, reactancia, DSTATCOM, transformador y máquina síncrona.

CAPITULO

2

ESTABILIDAD DE VOLTAJE Y EVENTOS QUE AFECTAN LA FORMA DE ONDA DE TENSIÓN.
--

Los disturbios en el sistema eléctrico que se han considerado aceptables durante muchos años, ahora pueden causar desorden en el sistema eléctrico industrial con la consecuente pérdida de energía. La relación entre la calidad de la energía y el sistema de distribución ha sido un tema de interés durante varios años. El concepto de calidad de energía aplicada a la tensión, describe la calidad de la tensión de proveedor en relación con los saltos transitorios, la caída de tensión, armónicos y el parpadeo de tensión. Es importante darse cuenta de que existen otras fuentes de disturbios que no están asociadas con el suministro eléctrico de entrada como se puede observar en el cuadro 2.1.

Varios aspectos de calidad de la energía se pueden clasificar como se muestra en la figura 2.1. Esta se basa en la energía necesaria para compensar las perturbaciones. El aspecto de la estabilidad de tensión puede ser corregida por el uso de dispositivos de electrónica de potencia y transformadores. Por otra parte, la remuneración de continuidad de las fuentes de alimentación requiere de un dispositivo de almacenamiento de energía más grande o de generación distribuida. [9]

En este capítulo se trabajarán los conceptos de interrupciones que afectan la estabilidad de tensión para comprender mejor su comportamiento. En el capítulo dos no se abarcarán los conceptos de cómo podemos compensar este tipo de fallas; ese tema se tratará en los capítulos subsecuentes.

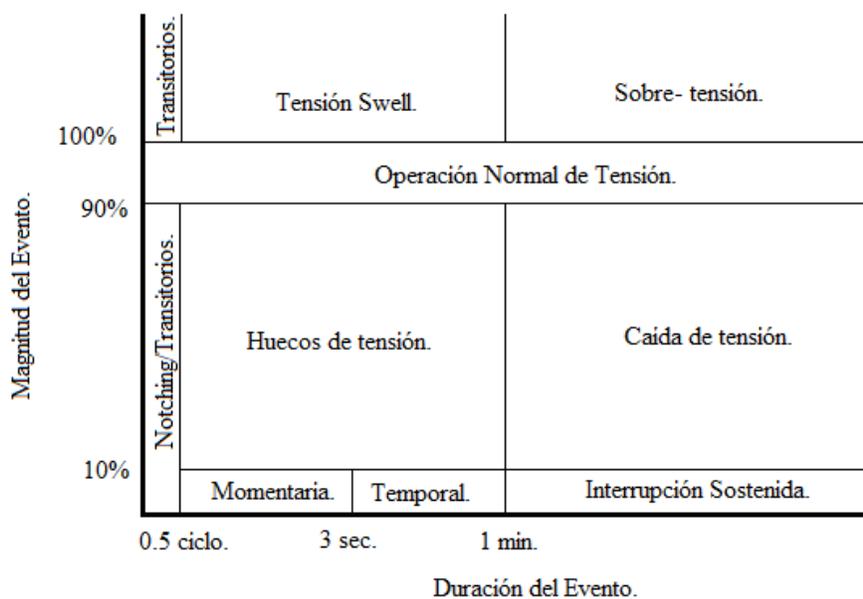


Figura 2.1. Magnitud y duración de Eventos.

<ul style="list-style-type: none"> • Estabilidad de Voltaje <p>Sobre-tensión y Baja-tensión. Huecos de tensión. Tensión Swell. Desplazamiento de Fase. Flicker. Frecuencia.</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Continuidad de Servicio de Energía. <p>Interrupción Momentánea. Interrupción Temporal. Interrupción Sostenida.</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Forma de Onda de Tensión. <p>Transitorios. Armónicos de tensión y Corriente. Muesca.</p>

Cuadro 2.1. Eventos en la forma de onda de tensión.

2.1 CONTINUIDAD.

La continuidad es cuando un sistema de potencia es capaz de llevar la tensión sin cortes y sin ningún tipo de interrupción que pueda afectar el sistema, la interrupción es el cese de servicio a uno o más usuarios y elementos del sistema que se encuentran fuera de servicio. La duración de la interrupción va desde el momento en que ocurre el cese de potencia hasta que el servicio es restaurado.

Existen diferentes tipos de interrupciones, pero solamente se van abarcar las siguientes:

- Interrupciones Momentáneas.
- Interrupciones Temporales.
- Interrupciones Sostenidas.

Interrupción Momentánea.

Es un tipo de variación de corta duración. La pérdida completa de tensión (< 0.1 p.u) en una o más fases por un periodo de tiempo entre 30 ciclos y 3 segundos.

Interrupción Temporal.

Un tipo de variación de corta duración. La pérdida completa de tensión (< 0.1 p.u) en una o más fases por un periodo de tiempo entre 30 ciclos y 3 segundos.

Interrupción Sostenida.

Un tipo de variación de duración larga. La pérdida completa de tensión (< 0.1 p.u) en una o más fases por un periodo de tiempo mayor a un minuto.

2.2 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE.

Para poder establecer la definición de estabilidad de voltaje tenemos que entender primero, por qué es importante la estabilidad en un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP).

Estabilidad de Sistemas de Potencia.

La estabilidad de un sistema de potencia ha sido reconocida como un importante problema de seguridad en la operación del sistema desde los años 20s. Muchos de los principales apagones causados por la inestabilidad del sistema de potencia ilustran la importancia de este fenómeno [7].

Definición de Estabilidad en Sistemas de Potencia.

La estabilidad de un sistema de potencia es la capacidad del SEP, dadas las condiciones iniciales de operación, para recuperar el estado de operación de equilibrio después de ser sujeto a un disturbio físico.

La inestabilidad en un sistema de potencia puede manifestarse de diferentes maneras dependiendo de la configuración del sistema y del modo de operación.

El sistema de potencia es un sistema altamente no lineal que opera en un ambiente de constante cambio; cargas, salidas de generadores y los parámetros de operación cambian continuamente. Cuando está sujeto a una perturbación, la estabilidad del sistema depende de las condiciones iniciales de operación, así como de la naturaleza de la perturbación [7].

Teniendo en cuenta la importancia de la estabilidad en un sistema de potencia podemos dar una definición formal de estabilidad de voltaje.

Estabilidad de Voltaje.

Es la capacidad de un sistema de potencia de mantener un voltaje constante en un estado de equilibrio bajo condiciones normales de operación después de una perturbación [7].

Depende de la capacidad de mantener y recuperar el equilibrio entre demanda y generación.

El principal factor causante de la inestabilidad es la incapacidad del sistema de potencia para satisfacer la demanda de potencia reactiva. Existen otro tipo de factores que alteran la inestabilidad de voltaje, podría decirse que algunos de ellos por su duración no llegan a ser muy dañinos para el sistema, pero si se presentan frecuentemente, pueden llegar a ser un problema para los aparatos eléctricos; estos se muestran a continuación:

2.3 EVENTOS DE VARIACIONES DE TENSIÓN.

Sobre-tensión.

Este término es usado para describir una variación de larga duración, se refiere a un valor de tensión mayor al valor nominal hasta un 10% por un periodo de tiempo mayor a un minuto. En la figura 2.2 se puede observar cómo la forma de onda tiene un aumento con respecto de la forma de entrada, a este fenómeno se le conoce como sobre tensión. Este fenómeno regularmente es causado por un cortocircuito o por causas atmosféricas; regularmente los rayos.

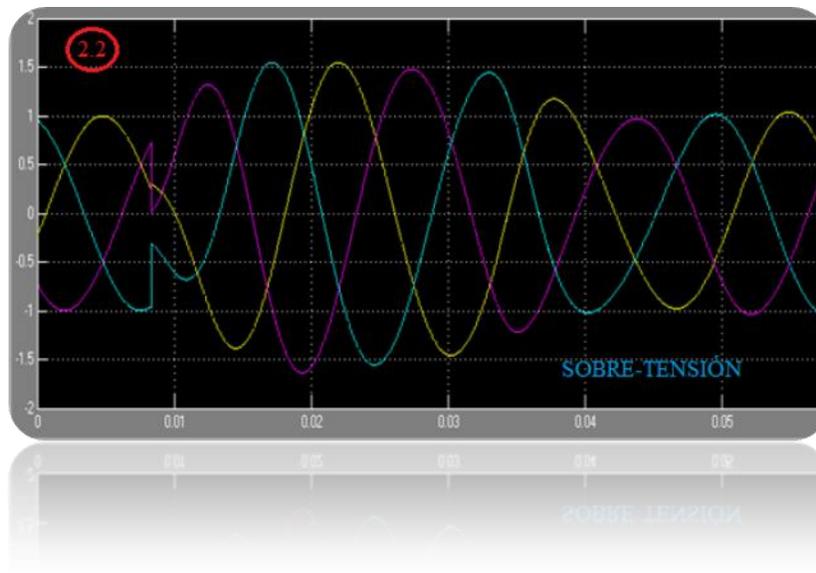


Figura 2.2. Sobre- tensión.

Caída de tensión.

Este término es usado para describir una variación de larga duración, se refiere a medidas de tensión que tienen valores de 10% por debajo del valor nominal de tensión por un periodo de tiempo mayor a un minuto. En la gráfica 2.2 se observa como la forma de onda cambia por un momento con respecto de la forma de entrada; a esta disminución en el voltaje se le conoce como *caída de tensión*.

Generalmente una caída de tensión se debe a la baja de voltaje en las líneas de distribución sobrecargadas de forma continua, un conductor de neutro dañado o a una baja capacidad de suministro de la compañía eléctrica; este problema se origina generalmente en el interior del país.

La caída de voltaje puede causar desgaste excesivo en ciertos dispositivos, tales como motores, los cuales operan sobrecalentados cuando el voltaje es muy bajo [8].

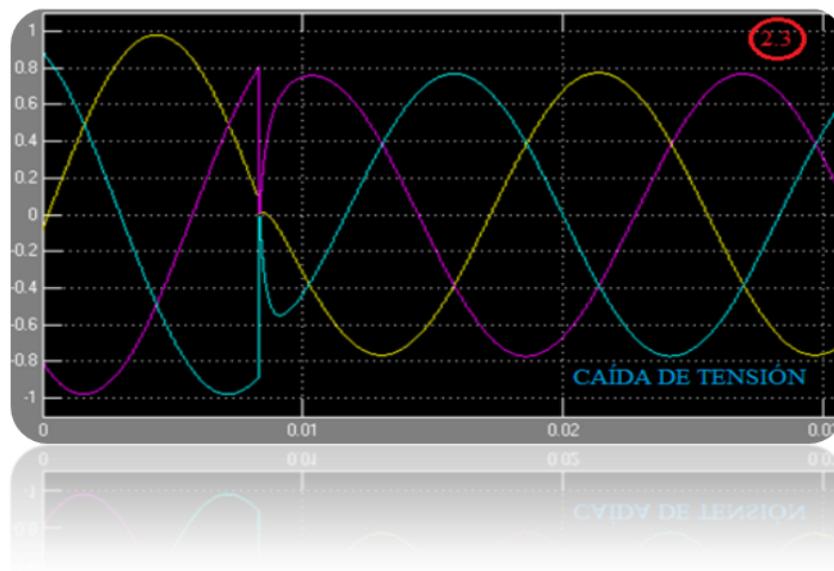


Figura 2.3. Caída de tensión.

Huecos de Tensión (Sags).

Los *huecos de tensión* son caídas momentáneas en el voltaje que causan disturbios en las cargas sensibles de los clientes y es reconocido dentro de la calidad de energía como el problema más importante. [21]

Es la reducción en el nivel de voltaje de entre un 10% y un 90% de una duración de entre medio ciclo y un minuto. Esta es una condición que típicamente ocurre cuando se inicia una falla en el sistema eléctrico y dura hasta que la falla sea eliminada por un dispositivo de sobrecorriente, siendo la más común los disturbios eléctricos. Caídas severas pueden resultar en el mal funcionamiento de algunas cargas sensibles. Mientras más larga sea la duración de la caída de voltaje hay más probabilidad de tener un mal funcionamiento. Los huecos de tensión normalmente no causan daños severos al equipo, pero fácilmente pueden

interrumpir la operación de cargas sensibles. Este tipo de disturbio puede ocurrir en el sistema de la empresa eléctrica o también durante el arranque de motores grandes.

Esta condición temporal tiende a ocurrir diez veces más frecuentemente que una interrupción total de energía. [8]

Características de los Huecos de Tensión.

Una mejor comprensión de las características de los huecos de tensión en el sistema de suministro eléctrico ofrece la oportunidad de evaluar la configuración del sistema alternativo y cómo con pequeñas modificaciones en las especificaciones de los equipos se puede reducir el número de cortes o molestias debido a los huecos de tensión.

Los huecos de tensión se caracterizan *por su magnitud (durante el periodo de la falla), su duración y el brinco de su ángulo de fase.* La *magnitud* es determinada por la distancia de la falla eléctrica y la *duración* por el tiempo de compensación de la falla. En la gráfica 2.4 se observa con claridad el cambio de amplitud en la forma de onda y el tiempo de duración del hueco de tensión.

Un cortocircuito en un sistema de alimentación no solamente conduce a una caída en la magnitud de voltaje, sino también a un cambio en el ángulo de fase del voltaje. A este cambio se le llama *salto en el ángulo de voltaje.*

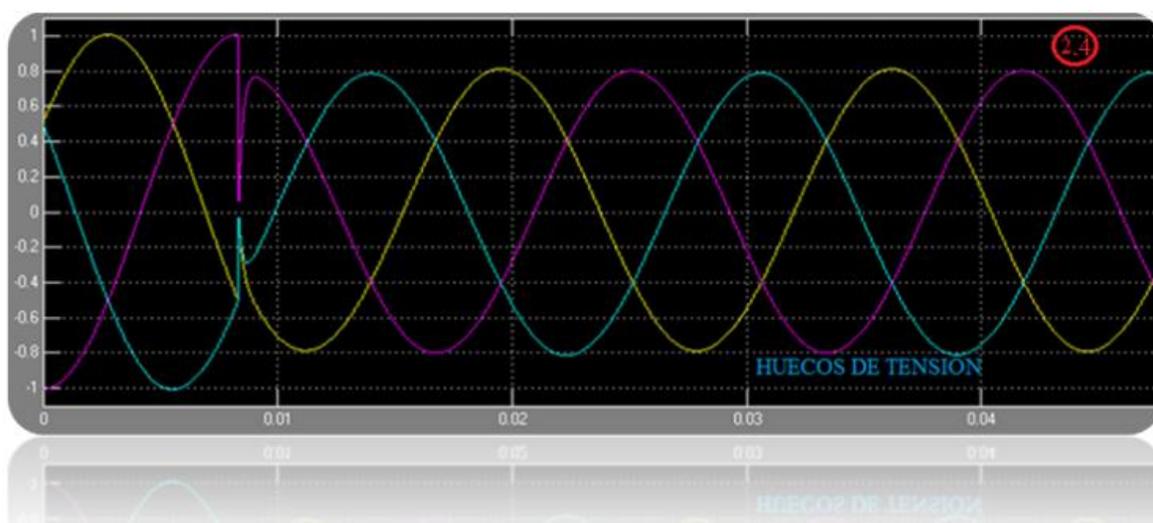


Figura 2.4. Huecos de tensión.

Tensión Swell.

Es un incremento temporal en el valor de tensión de más de 10% de la tensión nominal a frecuencia del sistema para duraciones entre medio ciclo y un minuto. [8]

Si bien es cierto que esta perturbación eléctrica ocurre con menos frecuencia en comparación con los Sags, éstos pueden causar mal funcionamiento y acelerar el desgaste. La gráfica 2.5 muestra el aumento de magnitud que se da cuando sucede este tipo de falla. Se puede decir que la *Tensión Swell* posee las mismas características de los *huecos de tensión*, con la diferencia de que en vez de existir una disminución en la amplitud de la onda existe un aumento en esta.

La *Tensión Swell* generalmente es causada al apagar grandes cargas o al encender bancos de condensadores.

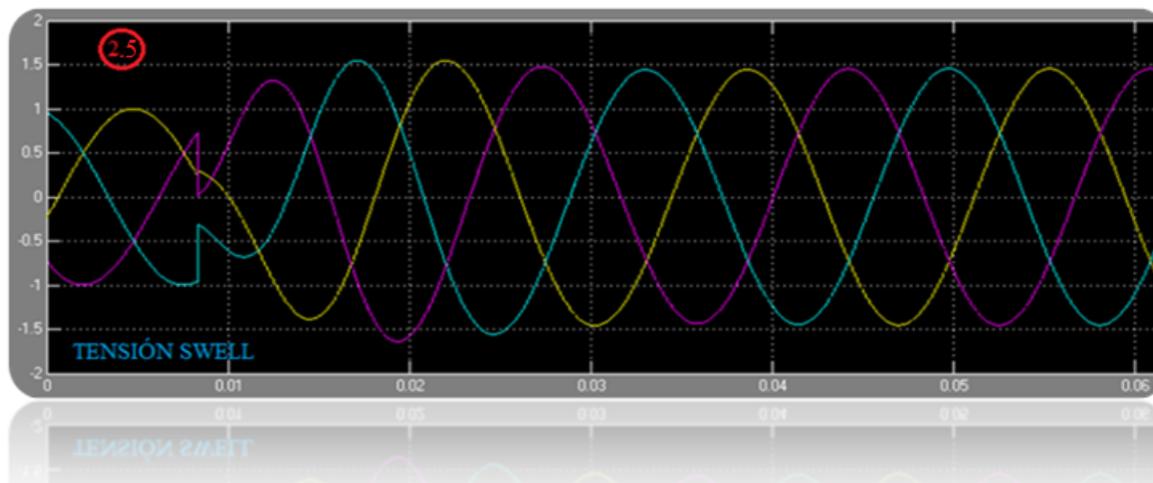


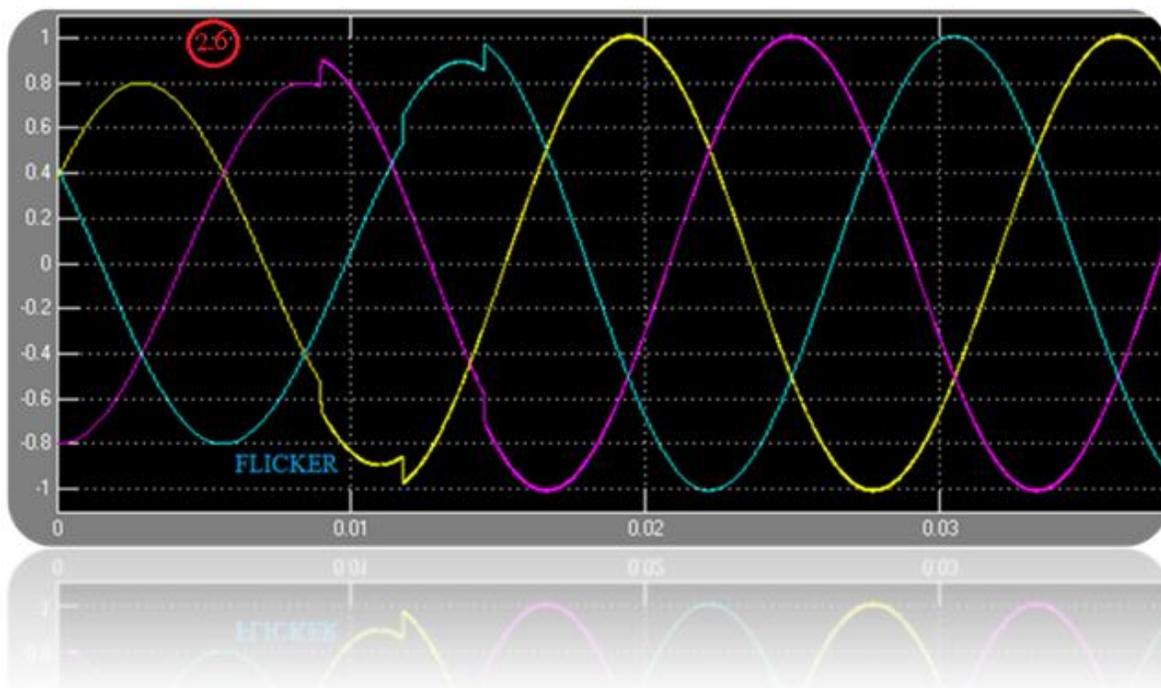
Figura 2.5. Tensión Swell.

Flickers.

El énfasis actual sobre la calidad de la energía ha llevado a una renovada atención al tema de los Flicker, debido a que existe una necesidad de revisar las bases técnicas de las curvas de tolerancia de los Flickers usadas como guías para satisfacer la instalación.

Los *Flickers* son producidos por las descargas atmosféricas. Asimismo, son considerados como uno de los problemas más severos en la calidad de la energía y esto ha llamado mucho la atención durante los últimos años. En [11] son definidos como: destellos a menudo no visibles que se presentan cuando hay una caída de tensión, como se muestra en la figura 2.6.

Es importante distinguir dos aspectos de este largo tema: *Luz de Parpadeo* es una impresión subjetiva de fluctuación de luminancia en la luz procedente de una lámpara o una luz que brilla de forma intermitente. La lámpara puede ser eléctrica, pero no es necesario. Las velas también emiten este tipo de parpadeo. El resultado de la fluctuación de las cualidades en el cambio del brillo, la modulación de la intensidad o la variación en el color suficientes, pueden ser perceptibles para el ojo humano. Mientras sean mayores o menores las veces en que se repitan las alteraciones de voltaje de baja amplitud el problema de Flickers se presentara continuamente. *Tensión de Luz de Parpadeo* prescribirá el máximo de las fluctuaciones de tensión admisible que el sistema pueda tolerar. [21]



Flicker 2.6. Flicker.

Armónicos.

Es un componente sinusoidal de una señal, es una función periódica cualquiera que está integrada por una suma de funciones senoidales; incluyendo un término constante en caso de asimetría respecto al eje de las abscisas, siendo la primera armónica, denominada también señal fundamental del mismo periodo y frecuencia que la señal original, y el resto serán funciones senoidales cuyas frecuencias son múltiplos de la fundamental. Estas componentes son denominadas armónicas de la función armónica original.

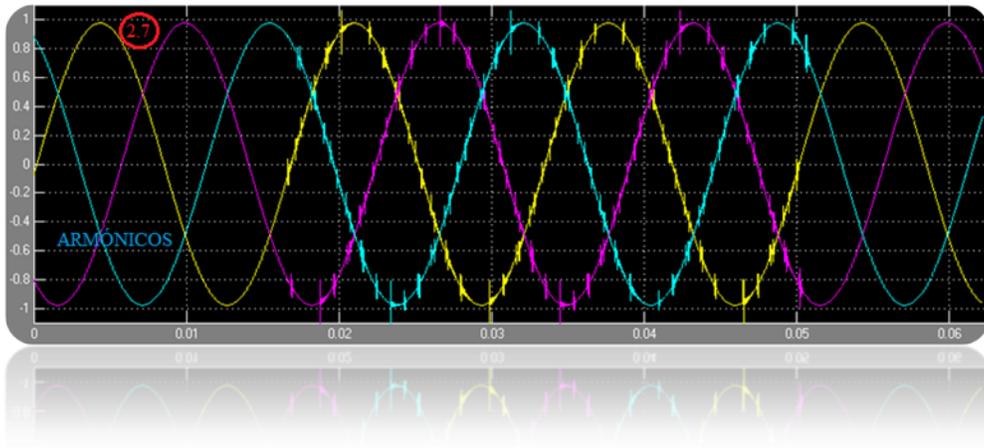


Figura 2.7. Armónicos.

Características de la distorsión Armónica.

Cuando la onda de corriente o de tensión medida en cualquier punto de un sistema eléctrico se encuentra distorsionada con relación a la onda sinusoidal que idealmente deberíamos encontrar, se dice que se trata de una onda contaminada con componentes armónicos.

Para que se considere como distorsión armónica las deformaciones en una señal se deben de cumplir las siguientes condiciones:

- ✚ Que la señal tenga valores definidos dentro del intervalo, lo que implica que la energía contenida es finita.
- ✚ Que la señal sea periódica, teniendo la misma forma de onda en cada ciclo de la señal de corriente o voltaje.

La *Distorsión Armónica* es causada por fenómenos transitorios tales como: arranque de motores, conmutación de capacitores, efectos de tormentas o fallas por cortocircuito.

La causa es debido a la caída de voltaje en las líneas de distribución sobrecargadas de forma continua, un conductor de neutro dañado o a una baja capacidad de suministro de la compañía eléctrica.

Desequilibrios de corriente.

Se producen cuando las tres fases de un sistema trifásico no circulan las mismas intensidades de corriente. Este tipo de desequilibrio provoca: sobrecalentamiento en los receptores, en cables de alimentación y protecciones que incluso podrían llegar a disparar.

Desequilibrio de Tensión.

Son producidos cuando en un sistema trifásico existen diferencias entre los valores eficaces (rms) de las tensiones, tenga o no distribuido el conductor neutro.

Notching.

Es una perturbación de polaridad opuesta a la forma de onda normal de duración de menos de medio ciclo.

Este fenómeno es causado frecuentemente por conmutadores electrónicos de energía eléctrica que no funcionan correctamente, como es el caso de un UPS e incluso estabilizadores de voltaje. Sin embargo, no es un disturbio muy común.

Aunque un Notching no es usualmente un problema mayor, puede causar que equipos; especialmente electrónicos, operen incorrectamente. [8]



Figura 2.8. Notching

Transitorios.

Son deformaciones en la forma de onda de tensión, la mayor fuente de tensiones transitorias son los rayos y quizás los de mayor estudio. En la figura 2.10 se observa con mayor claridad este tipo de deformación.

Otro tipo de transitorios; pero de origen interno, son los de conmutación. Cuando es interrumpido el flujo de corriente, apertura o cierre de equipos en un circuito capacitivo se generan ondas de voltaje transitorios o trenes de ondas de alta frecuencia de amortiguamiento rápido.

Son variaciones en la forma de onda de tensión que dan como resultado condiciones de sobretensión durante una fracción de ciclo de la frecuencia fundamental. Las fuentes comunes de estos transitorios son los rayos, operación de los dispositivos de interrupción de los sistemas eléctricos y el arqueo de conexiones flojas o fallas intermitentes.

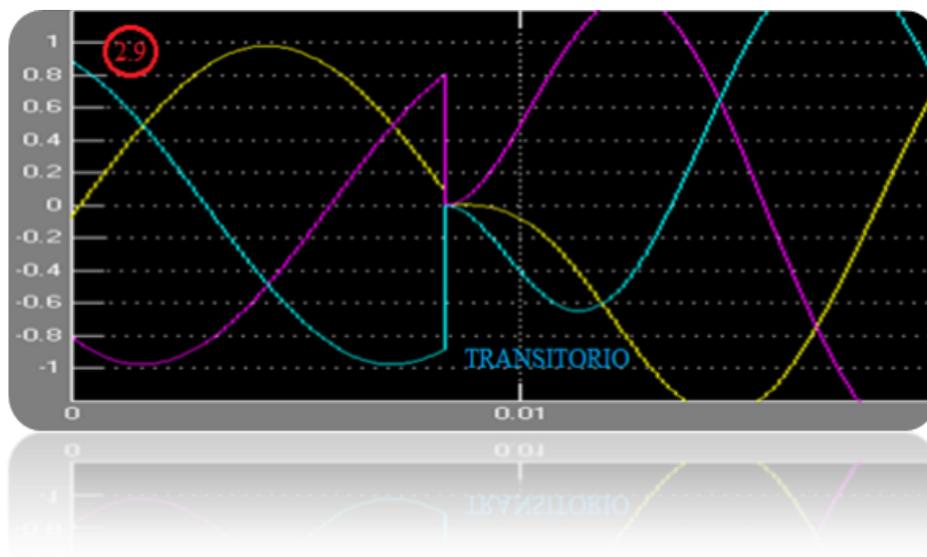


Figura 2.9. Transitorios de tensión.

CAPITULO

3

SOLUCIONES TÉCNICAS PARA PROBLEMAS DE VARIACIONES DE TENSIÓN.
--

Las perturbaciones de tensión abarcan los armónicos, huecos de tensión, sobretensiones, desequilibrios y Flickers; éstas pueden causar mal funcionamiento de las cargas en las fábricas, hospitales, edificios y detener los procesos que resulta en pérdidas económicas sustanciales o datos. [15]

El seguimiento basado en las técnicas de control, tiene algunas dificultades en la compensación de eventos en sistemas desbalanceados, por lo tanto, su utilización ha llamado la atención tanto en la parte académica como en la parte industrial. Especialmente, en los últimos años se ha prestado considerable importancia al desarrollo y a la aplicación de dispositivos llamados FACTS, los cuales nos ayudan a mitigar cierto tipo eventos. [16]

En este capítulo se hablará de cómo podemos mitigar las interrupciones y de la solución a éste tipo de problemas, también se abordaran las características de estos dispositivos como el D-STATCOM y los DVRS, así como de máquinas eléctricas (Transformadores y Máquinas Síncronas) y capacitores.

3.1 CORRECCIÓN DE PERTURBACIONES.

El concepto de corrección de perturbaciones se define como cualquier medida que se adopte para mitigar la perturbación en una instalación o en los receptores conectados a la misma para que su funcionamiento sea satisfactorio en el entorno considerado.

La corrección puede efectuarse desde dos puntos de vista; i) considerando qué o a quién provoca la perturbación; ii) conociendo que tan inmune es el sistema frente a las perturbaciones. [14]

A continuación se describen los diferentes sistemas correctores existentes para cada tipo de perturbaciones.

Reguladores de Tensión.

Su función es reducir los márgenes de variación del valor eficaz de la tensión de alimentación del receptor. [14] Su misión es proporcionar una tensión constante a su salida, este eleva o disminuye la corriente para que el voltaje sea estable.

Conectado en serie entre la carga crítica y la línea de suministro, el regulador monitorea el nivel de tensión que entrega a la carga y lo compara con un valor de referencia, en caso de existir un diferencial, ya sea disminución o aumento en el valor de tensión, lo corrige o lo acerca a un valor preestablecido como nominal. [22]

Los reguladores de tensión nos ayudan en la compensación de los huecos de tensión, alto voltaje, tensión Swell y bajo voltaje.

Reactancias Inductivas Controladas, Capacitores Controlados y Capacitores de Almacenamiento.

Las reactancias inductivas controladas tienen como función disminuir las variaciones de la potencia demandada que están asociadas a variaciones de su componente reactiva, mientras que los capacitores compensan los incrementos de demanda de potencia reactiva corrigiendo las correspondientes variaciones de $\cos \varphi$ de forma que se mantenga aproximadamente constante a un valor prefijado.

Estos dispositivos son análogos a las reactancias controladas, sustituyendo la reactancia inductiva por condensadores. La descarga de un condensador mantiene la alimentación de un circuito de corriente continua frente a un hueco o un corte breve, es por esto que es apropiada para huecos de tensión y cortes inferiores a un segundo. [14]

Transformadores.

Debido a que en la línea de alimentación, los valores de tensión nunca son constantes los transformadores se equipan con un cierto tipo de accesorio que le permite adaptarse a los cambios de tensión de la línea de alimentación llamado; ***cambiador de derivaciones***. Es a través del cambiador de derivaciones, que se cambia el número de espiras para elevar o reducir la tensión de salida del transformador, dependiendo de los requerimientos de la carga. Siempre y cuando el cambiador se encuentre dentro del rango de tensión de la alimentación. Estos se clasifican en:

- Cambiador de derivaciones de operación sin carga.
- Cambiador de derivaciones de operación bajo carga.

El primero se usa cuando la variación de la tensión es poco frecuente y se ajusta únicamente cuando el transformador se encuentra desconectado de la red de alimentación. Este ajuste se lleva a cabo por medio de un volante exterior operado manualmente.



Figura 3.1. Cambiador de derivaciones de operación sin carga

El Cambiador de derivaciones de operación bajo carga se usa cuando la variación de tensión debe hacerse sin interrupción del servicio, es decir, sin desconectar el equipo de la red de alimentación. La figura siguiente muestra un cambiador de derivaciones de operación con carga para tensión alta.



Figura 3.2. Cambiador de derivaciones para operación con carga para tensión alta.

Su construcción es más robusta y con un número mayor de posiciones que un cambiador de derivaciones de operación sin carga de la misma clase de aislamiento. Estos tipos de cambiadores pueden ser resistivos o manejados usando un reactor para su operación. El cambiador tipo reactivo maneja más corriente que el resistivo. La operación de ambos puede ser manual o automática.

El cambiador de derivaciones bajo carga requiere de accesorios adicionales para su funcionamiento más eficiente y confiable, los cuales son: mando a motor, regulador automático de voltaje, transformadores de corriente y de potencial para censar tensión y corriente, válvula mecánica de operación en caso de sobrepresión en el tanque del cambiador, relevador de sobrepresión súbita, diafragma para operación del equipo de protección contra explosión e incendio, indicador de posiciones remoto, depósito de sílica gel para respiración de la cámara del cambiador. Gracias a las características mostradas por el transformador, éste nos ayuda en la corrección de variaciones de tensión como; sobrevoltajes, caídas de tensión, huecos de tensión y tensión swell.

Filtros y Supresores de Transitorios.

Como en cualquier problema la mejor solución para evitar un efecto no es mitigarlo, si no eliminar la causa que lo produce. En nuestro caso, eliminar los armónicos de la red.

Actualmente los sistemas más empleados son los filtros pasivos y filtros activos.

El propósito de un filtro es reducir la amplitud de uno o más armónicos de voltaje de corriente [14]. Estos se conectan en paralelo y otros en serie, entre la línea y la carga, son arreglos R, L, C. Dependiendo del diseño ofrecen una baja o alta impedancia para la armónica que deseen rechazar.

Los filtros activos se conectan en paralelo a la carga crítica, son arreglos R, L, C controlados por dispositivos activos (electrónica de potencia). Actúan como una fuente de corriente que inyecta una corriente en magnitud y sentido opuesto a las generadas por la carga, cancelando las corrientes armónicas.

Para contrarrestar el problema de los transitorios se utiliza un ***Supresor de Transitorios*** el cuál protege al equipo electrónico sensible dentro de límites de voltaje menores que los apartarrays. Los supresores se clasifican de acuerdo a la conexión con la carga que protegen. La conexión puede ser en *paralelo* o en *serie* con la carga, siendo la conexión en paralelo la más común.

El tamaño de los supresores en paralelo no depende del tamaño de la carga, si no de su cercanía a la acometida y de la corriente que pueden tolerar, este se conecta en paralelo a la carga crítica, cuando detecta una corriente transitoria el supresor baja su impedancia a prácticamente un valor de cero y crea un corto circuito momentáneo desviando la corriente a tierra y abatiendo el sobrevoltaje dañino. [22]

Los dispositivos en paralelo se pueden clasificar en dos tipos; *sujetadores de voltaje* y *dispositivos de arco*, ambos tipos de supresores en paralelo drenan corriente cuando el voltaje aumenta por arriba del valor de ruptura. Los sujetadores de voltaje recuperan el estado de circuito abierto cuando el voltaje disminuye por debajo del nivel de ruptura, mientras que los de arco entran en conducción cuando el voltaje está muy por arriba del voltaje de arco, un 50% por arriba de dicho voltaje, una vez en conducción el voltaje en terminales cae repentinamente a ese voltaje de arco y se mantiene casi constante.

Los supresores en serie utilizan elementos de protección como los utilizados en protectores en paralelo; pero incorporan un inductor o un resistor en serie, debido a esto pueden limitar mucho mejor los sobrevoltajes transitorios. [23]

Los supresores se pueden clasificar de acuerdo a su ubicación en categoría: C, B, y A.

Nivel C: Corresponde al de mayor exposición debido a la cercanía a la acometida, los supresores colocados en este nivel deben ser robustos ya que no se cuenta con mucho cableado.

Capacidad típica del supresor: 250 kA a 300 kA.

Nivel B: Corresponde a la exposición media en este nivel existen tableros de distribución y nuevas fuentes como transformadores de aislamiento y UPS, se cuenta con cableado en el camino y por lo tanto impedancia para atenuar los transitorios.

Capacidad típica del supresor: 125 kA a 200 kA.

Nivel A: Corresponde a la exposición baja en este nivel existen los tableros de distribución que alimentan a la carga final.

Capacidad típica del supresor: 60 kA a 100 kA.

Fuente de Alimentación Ininterrumpida (UPS).

Otro dispositivo que nos ayuda en la corrección de los huecos de tensión, sobre tensión, caída de tensión y tensión swell son los UPS, él cual es la mejor solución para el suministro de energía de alta calidad para mantener la fuente de alimentación de las perturbaciones y falta de ruido. Éste sistema de energía ininterrumpible, conectado en serie entre la carga crítica y la línea de suministro, cumple doble función: de regulador y en caso de falla del suministro de energía el UPS la obtiene de un banco de baterías propio, por lo tanto la carga puede seguir operando. [22]

Restaurador Dinámico de Tensión (DVR)

Los *DVRs* pueden compensar por un periodo largo los huecos de tensión y la tensión Swell, así como aumentar la optimización de la distribución para superar la distorsión armónica durante el proceso de mitigación.

El *DVR* es un dispositivo electrónico de potencia, su operación básica es inyectar una tensión de magnitud y frecuencia, qué conectados con un alimentador de distribución mantiene la amplitud deseada y la forma de onda de tensión de carga incluso cuando la tensión sea desequilibrada o distorsionada. Éstos son componentes básicos que determinan si el *DVR* puede operar con éxito a fin de mitigar los huecos de tensión.

Diferentes topologías y métodos de control se han presentando en los *DVRs*. Dichas topologías se clasifican en dos grupos diferentes. El primer grupo usa conversión AC/DC/AC. En esta topología la tensión DC es provista a través de un transformador de la red por la vía de un rectificador. En el segundo grupo la energía requerida para la compensación del voltaje es tomada del capacitor en DC u otro elemento de almacenamiento de energía como un condensador de doble capa, el imán superconductor o la batería de plomo-ácido a través del conductor. Este tipo de topologías no pueden compensar la *tensión Swell* y los *huecos de tensión* durante mucho tiempo debido a la limitación de la energía almacenada. En ambas topologías es necesario integrar un gran

capacitor en el circuito de corriente directa. El precio de este capacitor es alto y el resultado es el alto costo y la aplicación limitada de los *DVRs*. [15]

Compensador Estático Síncrono de Distribución (D-STATCOM).

Una forma de mitigar las fluctuaciones en el voltaje y para regular el punto de acoplamiento común de tensión en la parte de distribución, es utilizando un DSTATCOM [13], este se basa en el principio de que un inversor de tensión genera un voltaje de AC controlable atrás de la reactancia de dispersión del transformador, de modo que la diferencia de voltaje a través de la reactancia produce intercambio de potencia activa y reactiva entre el DSTATCOM y la red. El DSTATCOM es un dispositivo que puede usarse como compensador dinámico en sistemas de potencia, para proporcionar soporte de voltaje y mejorar la estabilidad. Así que el DSTATCOM es un controlador multifuncional. [16]

El DSTATCOM es análogo a una máquina síncrona ideal que genera un conjunto de voltajes balanceados a frecuencia fundamental, con amplitud y ángulo controlable. Ésta máquina ideal no tienen inercia y su respuesta es prácticamente instantánea.

3.2 TECNICAS DE MODULACION.

Para entender un poco más cómo el D-STATCOM, el DVR y los UPS, controlan la ganancia y el voltaje de salida, es necesario conocer las técnicas de modulación utilizadas con mayor frecuencia, así como las técnicas avanzadas de modulación.

Modulación de un solo ancho de pulso:

En el control por modulación de un solo ancho de pulso, existe un solo pulso por cada medio ciclo, el ancho del pulso se hace variar, a fin de controlar el voltaje de salida del inversor. La Figura muestra la generación de las señales de excitación y el voltaje de salida.

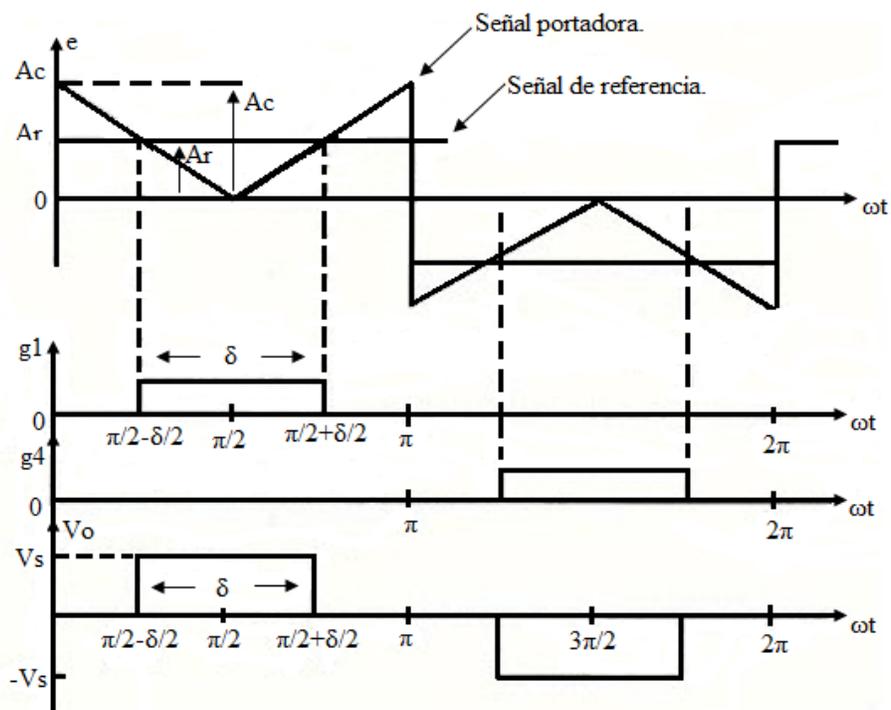


Figura 3.3. Modulación de un solo ancho de pulso.

Las señales de excitación se generan comparando una señal rectangular de referencia de amplitud A_r , con una onda portadora triangular de amplitud A_c . La frecuencia de la señal de referencia determina la frecuencia fundamental del voltaje de salida. Si se varía A_r desde 0 hasta A_c , el ancho de pulso δ , se puede modificar desde 0 hasta 180° . La relación de A_r con A_c , que se muestra en la ecuación 3.1, es la variable de control y se define como el *índice de modulación de la amplitud*.

$$M = \frac{A_r}{A_c} \quad 3.1$$

El voltaje RMS de salida se puede determinar:

$$V_o = \frac{V_s \sqrt{\delta}}{\pi} \quad 3.2$$

Modulación de varios anchos de pulso:

Utilizando varios pulsos en cada medio ciclo de voltaje de salida puede reducirse el contenido armónico. La frecuencia de la señal de referencia establece la frecuencia de salida f_o , y la frecuencia de la portadora f_c , determina el número de pulsos por cada ciclo p . El índice de modulación controla el voltaje de salida. Este tipo de modulación también se conoce como *Modulación Uniforme de Ancho de Pulso (UPWM)*. El número de pulsos por medio ciclo se determina a partir de la ecuación 3.3:

$$\rho = \frac{f_c}{2f_o} = \frac{mf}{2} \quad 3.3$$

Donde $mf = f_c/f_o$ y se define como la relación de modulación de frecuencia.

La variación del índice de modulación M desde 0 hasta 1 varía el ancho de pulso desde 0 hasta π/ρ y el ancho del voltaje de salida desde 0 hasta V_s .

V_s se puede obtener de la siguiente fórmula:

$$V_o = V_s = \frac{\sqrt{\rho\delta}}{\pi} \quad 3.4$$

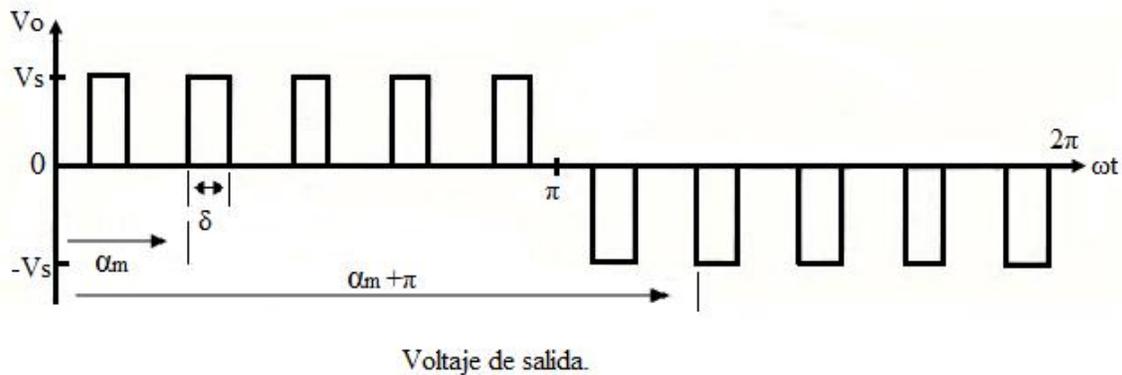
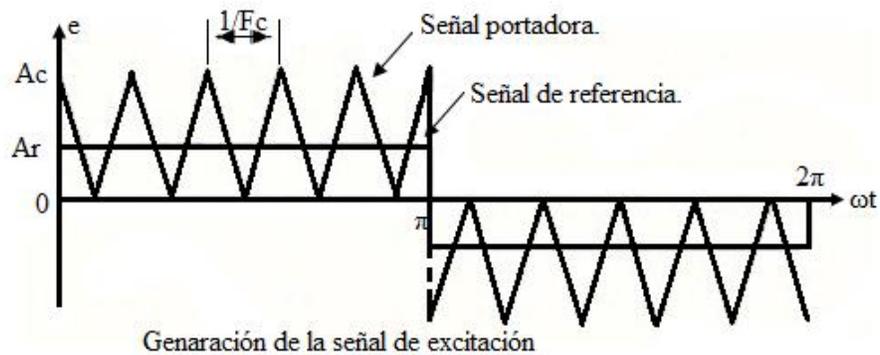


Figura 3.4. Modulación de varios anchos de pulso.

Modulación senoidal del ancho de pulso:

En vez de mantener igual el ancho de todos los pulsos, como es el caso de la modulación múltiple, el ancho de cada pulso varía en proporción con la amplitud de una onda senoidal evaluada en el centro del mismo pulso. El factor de distorsión y las armónicas de menor orden se reducen en forma significativa. Las señales de compuerta, se generan al comparar una señal senoidal de referencia con una onda portadora triangular de frecuencia f_c . Este tipo de modulación se utiliza frecuentemente en las aplicaciones industriales: *SPWM*.

La frecuencia de la señal de referencia f_r , determina la frecuencia de salida del inversor f_o , y su amplitud pico A_r , controla el índice de modulación M , y en consecuencia, el voltaje

rms de salida V_o . El voltaje rms de salida puede controlarse si se varía el índice de modulación M . El número de pulsos por medio ciclo depende de la señal de la portadora.

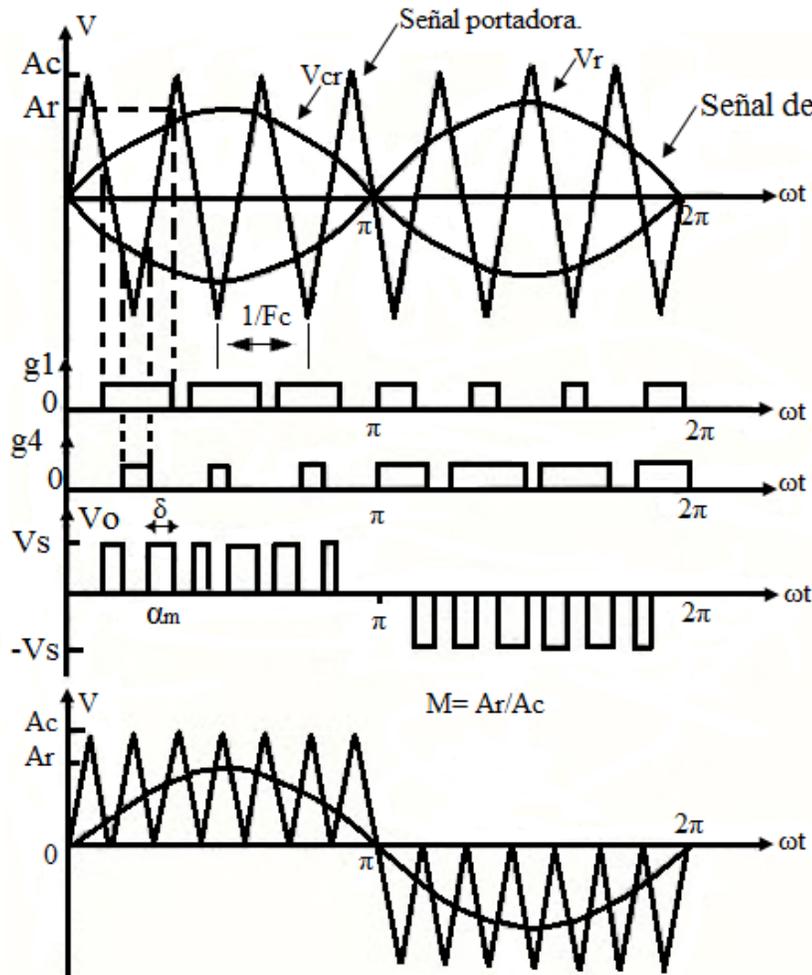


Figura 3.5. Modulación senoidal por ancho pulso.

Modulación senoidal modificada de ancho de pulso.

La figura nos muestra que los anchos de pulsos más cercanos al pico de la onda senoidal no cambian en forma significativa con la variación del índice de modulación. Esto se debe a las características de una onda senoidal, la técnica *SPWM* se puede modificar de tal manera que la onda portadora se aplique durante el primer y último intervalo de 60° de cada medio ciclo, es decir de 0° a 60° y de 120° a 180° . Este tipo de modulación se conoce como *MSPWM*. La componente fundamental se incrementa y sus características mejoran. Esto reduce el número de conmutaciones de los dispositivos de potencia y las pérdidas de conmutación.

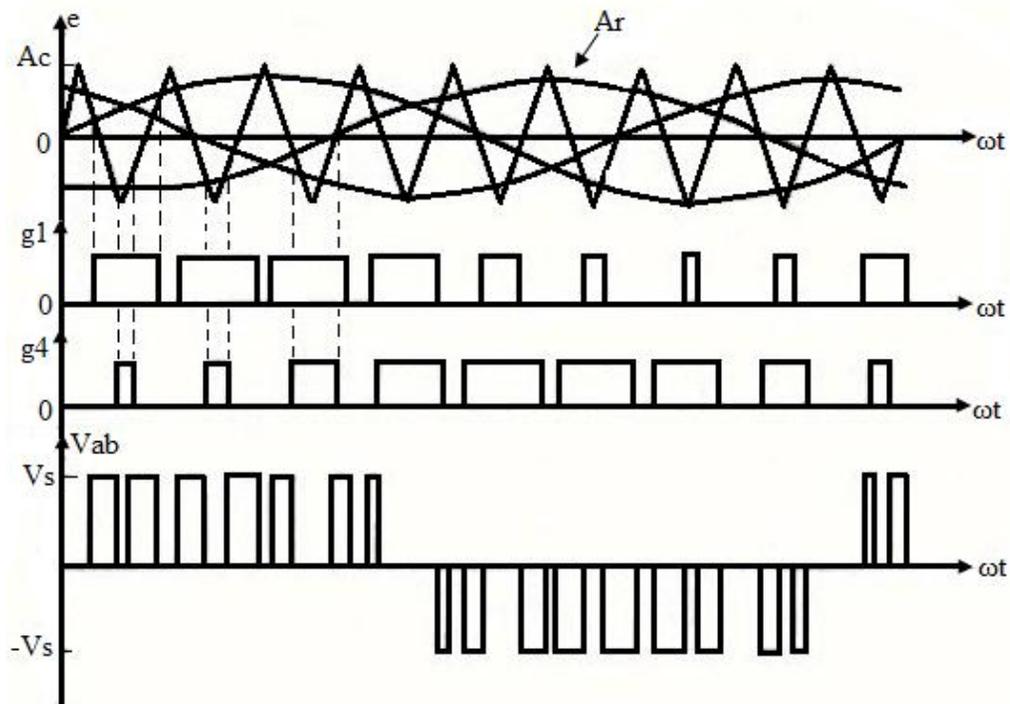


Figura 3.6. Modulación senoidal modificada de ancho de pulso.

Modulación Trapezoidal

Las señales de excitación se generan al comparar una onda portadora triangular con una onda moduladora trapezoidal. La onda trapezoidal puede obtenerse a partir de una onda triangular si se limita su magnitud $\pm Ar$, misma que se relaciona con el valor pico $Ar(max)$ mediante la siguiente fórmula:

$$Ar = \sigma Ar(max) \quad 3.5$$

Donde σ es el *factor triangular*, por que cuando $\sigma = 1$ la forma de onda se convierte en una onda triangular. El índice de modulación M es:

$$M = \frac{Ar}{Ac} = \frac{\sigma Ar(max)}{Ac} \quad \text{para } 0 \leq M \leq 1 \quad 3.6$$

Para valores fijos de $Ar (max)$ y de Ac , puede modificarse M , que varía con el voltaje de salida, cambiando el factor triangula, σ . Este tipo de modulación aumenta hasta 1.05 Vs el voltaje pico de salida de la fundamental, pero la salida contiene armónicas de menor orden.

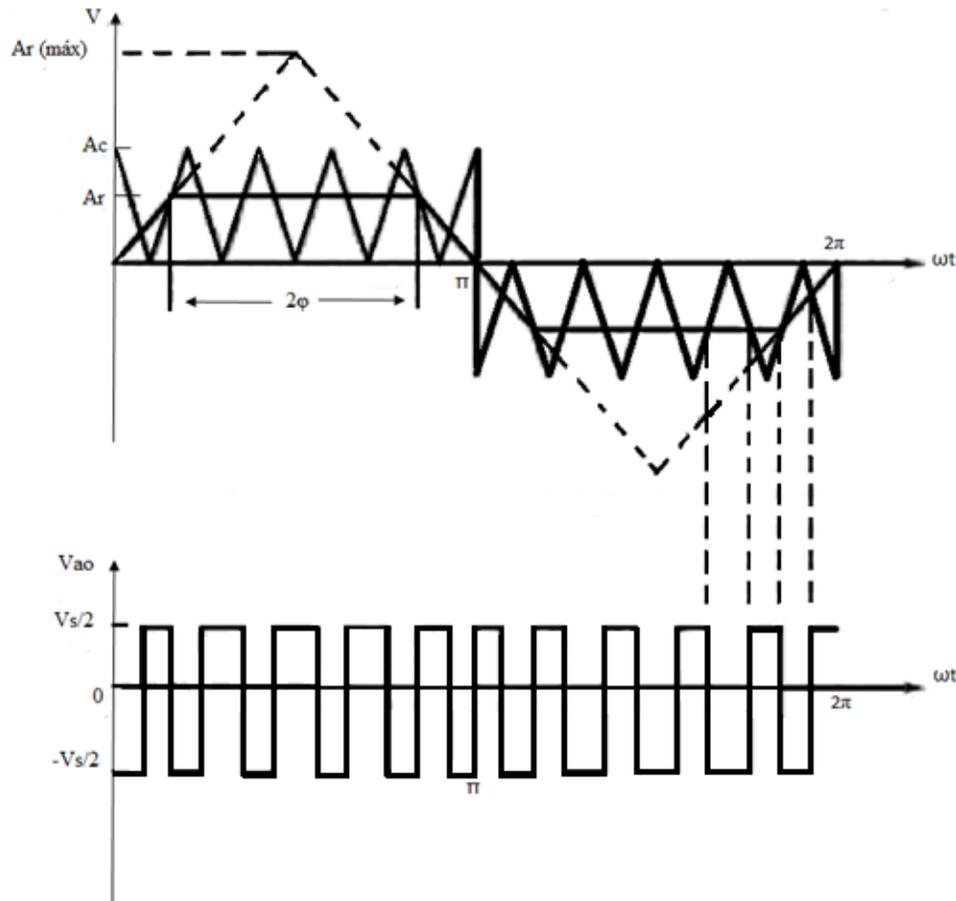
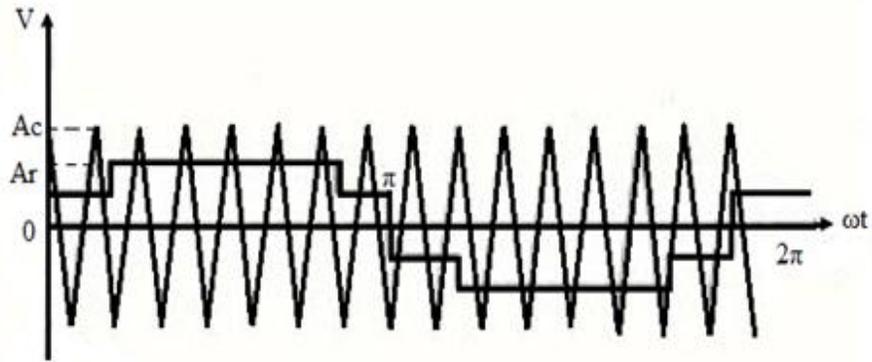


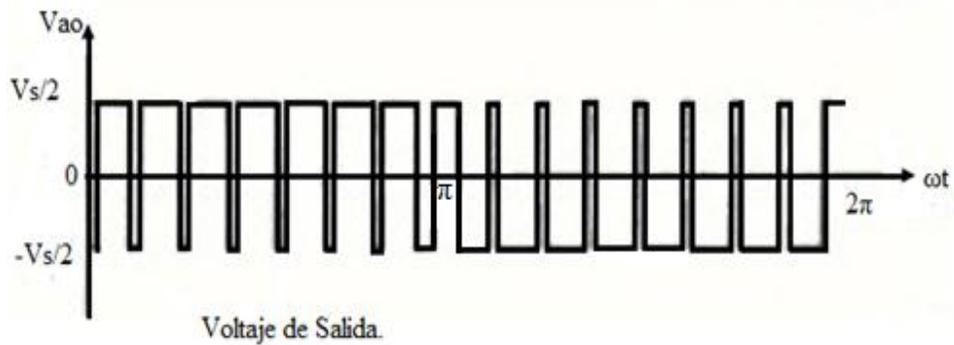
Figura 3.7. Modulación Trapezoidal.

Modulación en Escalera.

A fin de eliminar armónicas específicas, los niveles de los escalones se calculan. La razón de modulación de la frecuencia mf y el número de escalones se escoge con el fin de obtener el voltaje de salida con la calidad deseada. Este es un *PWM* optimizado y no se recomienda para casos con menos de 15 pulsos por ciclo. Ha sido demostrado que para un alto voltaje de la fundamental de salida y un bajo factor de distorsión, el número óptimo de pulsos en un ciclo es 15 para dos niveles, 21 para tres niveles y 27 para cuatro niveles. Este tipo de control suministra un voltaje de salida de alta calidad, con un valor de la fundamental de hasta 0.94 V_s .



Generación de la señal de excitación



Voltaje de Salida.

Figura 3.8. Modulación en Escalera.

Modulación Escalonada.

Está dividida en intervalos específicos, cada uno controlado en forma individual a fin de definir la magnitud de la componente fundamental y de eliminar armónicas específicas. Este tipo de control logra una distorsión baja, pero con una mayor amplitud de la fundamental en comparación con el control *PWM* normal.

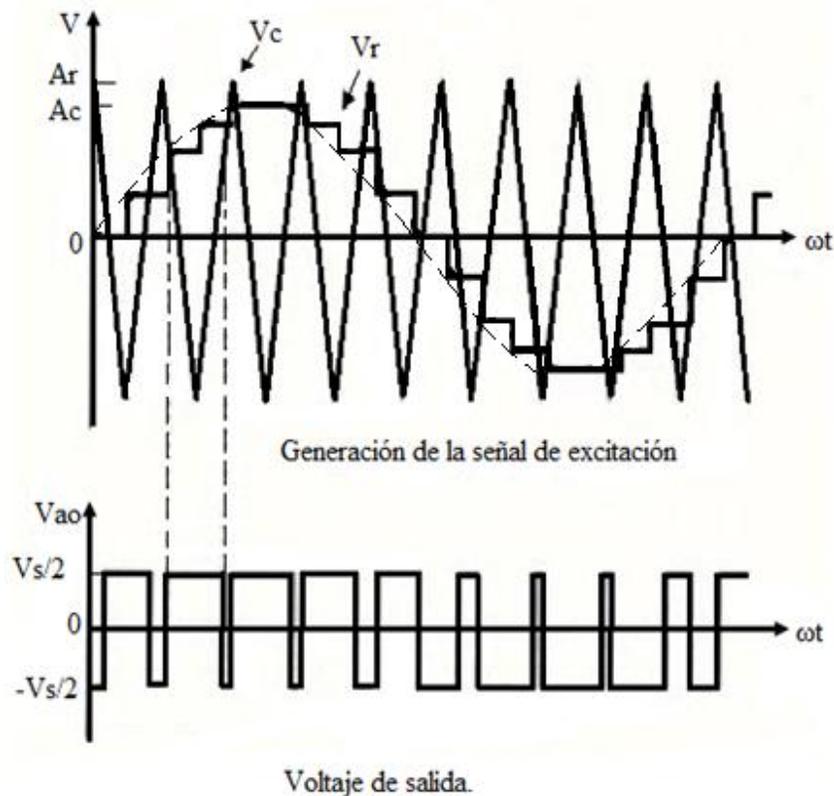


Figura 3.9. Modulación escalonada.

Modulación por inyección de armónicas.

La señal de modulación es generada mediante la inyección de armónicas seleccionadas en la onda senoidal. Esto da como resultado una forma de onda de cresta aplanada y reduce la sobremodulación. Suministra una mayor amplitud de la fundamental y una menor distorsión del voltaje de salida. La señal moduladora esta usualmente compuesta de:

$$V_r = 1.15 \text{sen} \omega t + 0.27 \text{sen} 3 \omega t - 0.029 \text{sen} 9 \omega t \quad 3.7$$

En la figura 3.10 aparece la señal moduladora, con inyecciones de tercera y novena armónica. Debe hacerse notar que la inyección de armónicas de tercer orden no afectará la

calidad del voltaje de salida, dado que la salida de un inversor trifásico no contiene múltiplos de tres. Si sólo se inyecta la tercera armónica, V_r estará dado por:

$$V_r = 1.15\text{sen}\omega t + 0.19\text{sen}3\omega t \quad 3.8$$

La señal moduladora puede generarse a partir de segmentos de $2\pi/3$ de una onda senoidal, como se muestra en la figura 3.11. Esto es similar a inyectar armónicas múltiplos de 3 a una onda senoidal. El voltaje de línea a línea es *PWM* senoidal y la amplitud de la componente fundamental es aproximadamente 15% mayor que la de un *PWM* senoidal normal

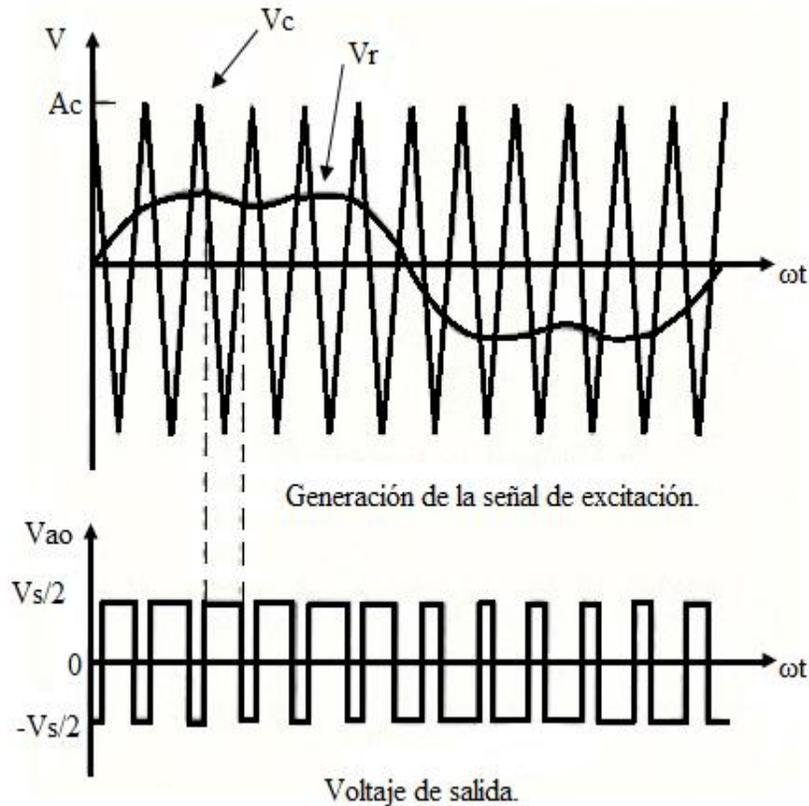


Figura 3.10. Modulación de inyección de armónicas seleccionadas.

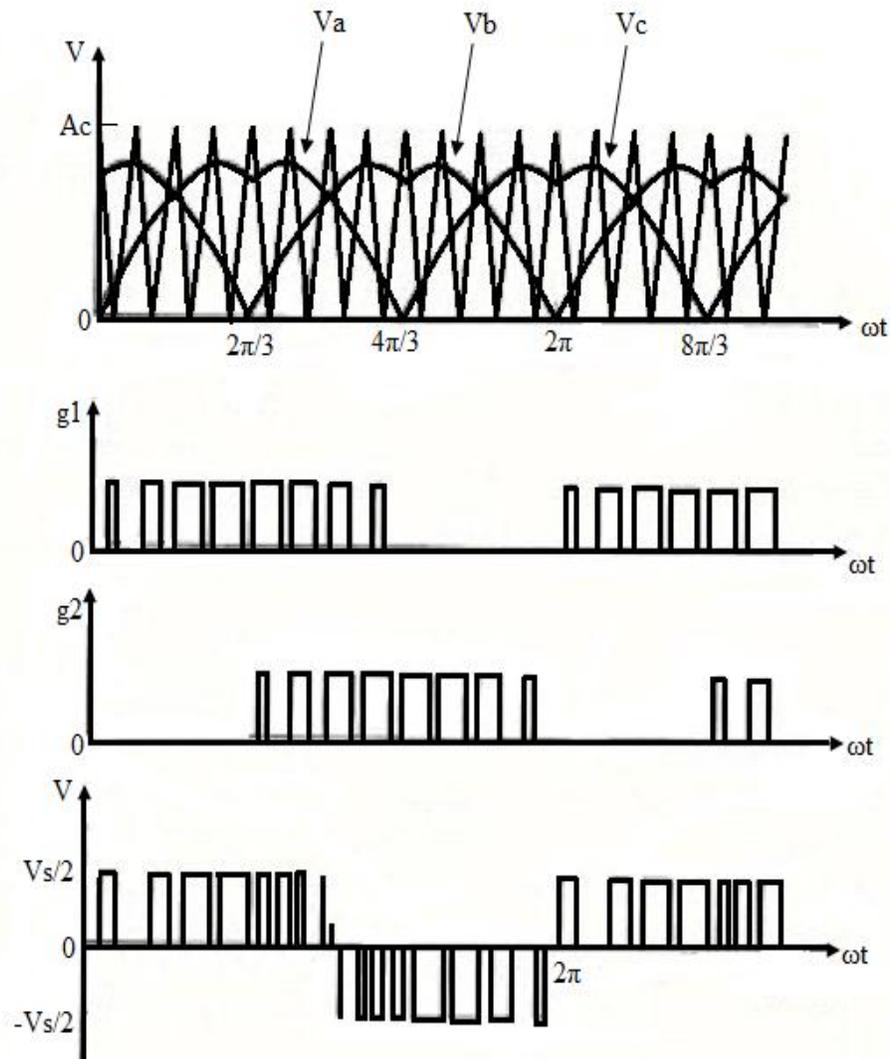


Figura 3.11. Modulación por inyección de armónicas.

Modulación en Delta.

En la modulación delta se deja que una onda triangular oscile dentro de una ventana definida ΔV por encima y por debajo de la onda senoidal de referencia V_r . La función de conmutación del inversor, que es idéntica al voltaje de salida V_o , se genera a partir de los vértices de la onda triangular V_c , También se conoce como *modulación por histéresis*. Si se modifica la frecuencia de la onda de moduladora manteniendo constante la pendiente de la onda triangular, el número de pulsos y de anchos de pulso de la onda modulada cambiará.

El voltaje de salida V_s depende de la amplitud pico A_r y de la frecuencia F_r del voltaje de referencia. La modulación en delta puede controlar la relación entre voltaje y frecuencia, características deseables en el control de motores de CA.

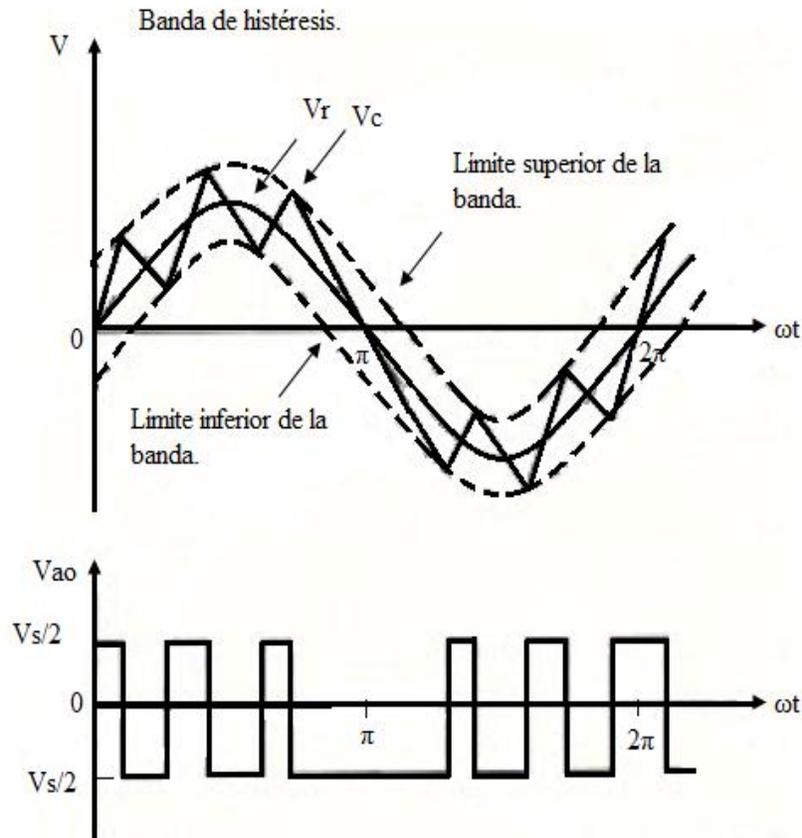


Figura 3.12. Modulación en delta.

CAPITULO

4

MODELOS DE LOS SISTEMAS CORRECTORES DE TENSION.
--

En el capítulo anterior, se observaron los modelos de los equipos que se pueden aplicar como técnicas de solución al problema de variaciones de tensión. El diagrama mostrado en la figura 4.1, prácticamente es el mismo esquema utilizado para todas nuestras pruebas, con un ligero cambio en los dispositivos de corrección utilizados para mitigar cada evento.

4.1 RED DE PRUEBA

La figura 4.1 muestra el diagrama esquemático del sistema de prueba utilizado para llevar a cabo la modelización y el análisis de transitorios del DSTATCOM. El sistema de prueba se compone de una carga de 230 kV de la transmisión de tres fases, representada por una alimentación equivalente de Thévenin en el lado primario del transformador. Una carga variable es conectada en el lado de 11 kV por el secundario del transformador. Los dos niveles de voltaje del VSC basados en el DSTATCOM son conectados en el lado de los 11kV de la bobina terciaria para proporcionar apoyo instantáneo de voltaje en el punto de carga. Un capacitor de 750 μ F por el lado de DC proporciona al DSTATCOM la capacidad de almacenamiento de energía. El interruptor 1 es utilizado para controlar el periodo de funcionamiento y el interruptor 2 controla la conexión de la carga que llega al sistema.

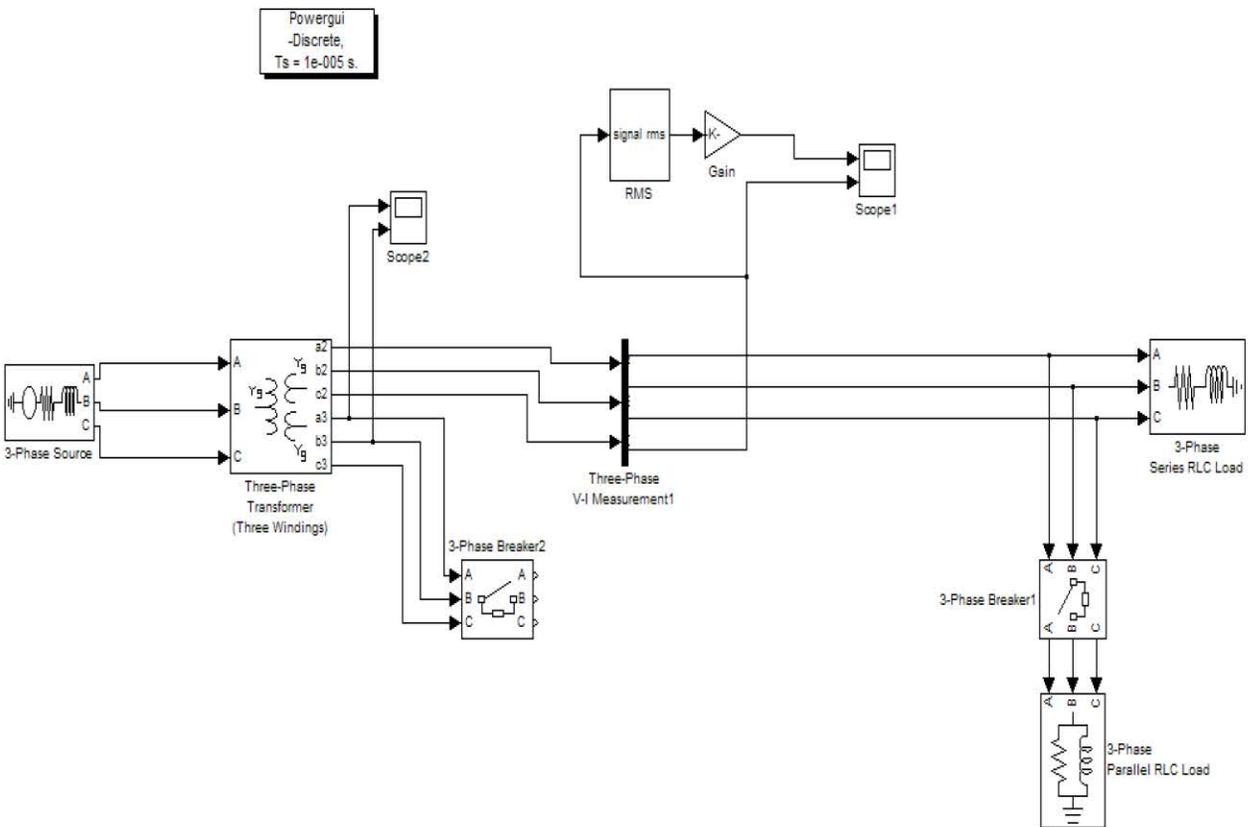


Figura 4.1. Diagrama Esquemático de la Red de Prueba

4.2 MODELADO D-STATCOM

Cuando en el sistema de distribución utilizamos un STATCOM normalmente lo podemos identificar como DSTATCOM, con el flujo de potencia activo controlado por el ángulo entre el sistema de AC y los voltajes VSC y el flujo de potencia reactiva controlado por la diferencia entre las magnitudes de estas tensiones, el capacitor en el DSTATCOM actúa como un dispositivo de almacenamiento de energía y su tamaño es elegido de acuerdo en la potencia, control y consideraciones de armónicos. El controlador DSTATCOM continuamente monitorea los voltajes de carga, corrientes y determina la cantidad de compensación requerida por el sistema de AC para cualquier variación de disturbio. En este capítulo el DSTATCOM es modelado utilizando SIMULINK. El diagrama esquemático del DSTATCOM se muestra en la figura 4.2.

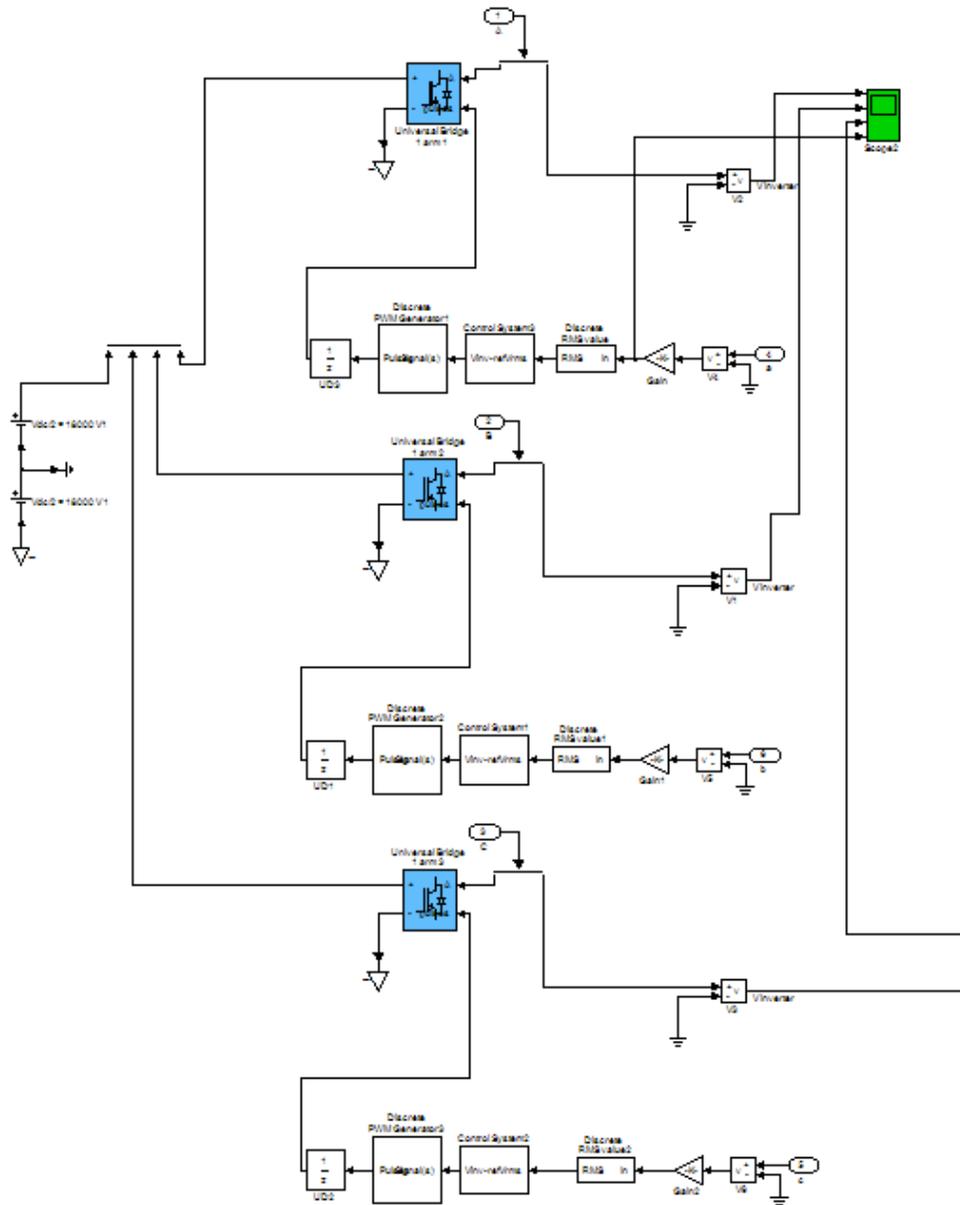


Figura 4.2. Diagrama Esquemático D-STATCOM

En este ejemplo en particular, el objetivo del DSTATCOM es proporcionar regulación de voltaje en el punto de carga y mitigar la tensión swell generada cuando disminuya la carga. El sistema está considerado para trabajar bajo condiciones desbalanceadas y que las dos cargas sean lineales. La estructura del DSTATCOM está basada en dos niveles de VSC que son controlados mediante sinusoidales convencionales *PWM*.

El diagrama de bloques para el programa designado al DSTATCOM se muestra en la figura 4.3. Este se basa solamente en las mediciones de voltaje V_{rms} en el punto de carga. La señal de error en la tensión se obtiene mediante la comparación en las mediciones de V_{rms} de la tensión medida y en contra de una tensión referente, V_{rms_ref} . La diferencia entre estas dos señales es procesada por un controlador PI con el fin de obtener el ángulo de fase δ necesario para conducir el error a cero.

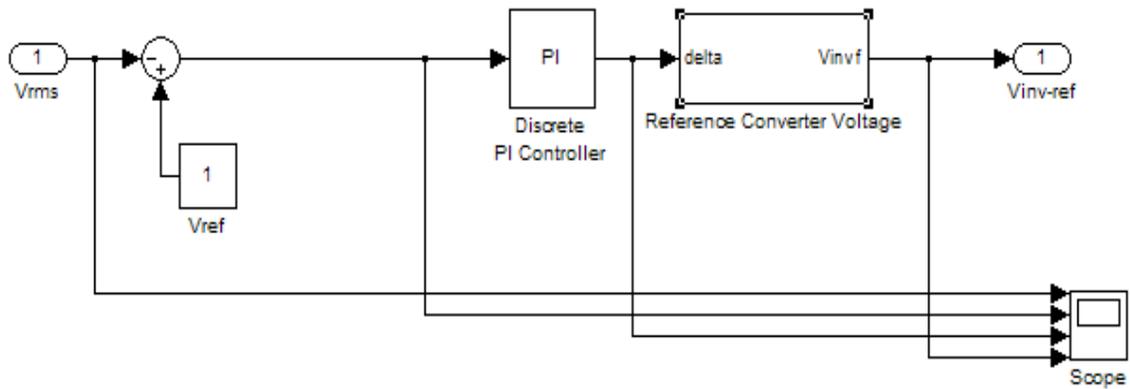


Figura 4.3. Diagrama del Controlador.

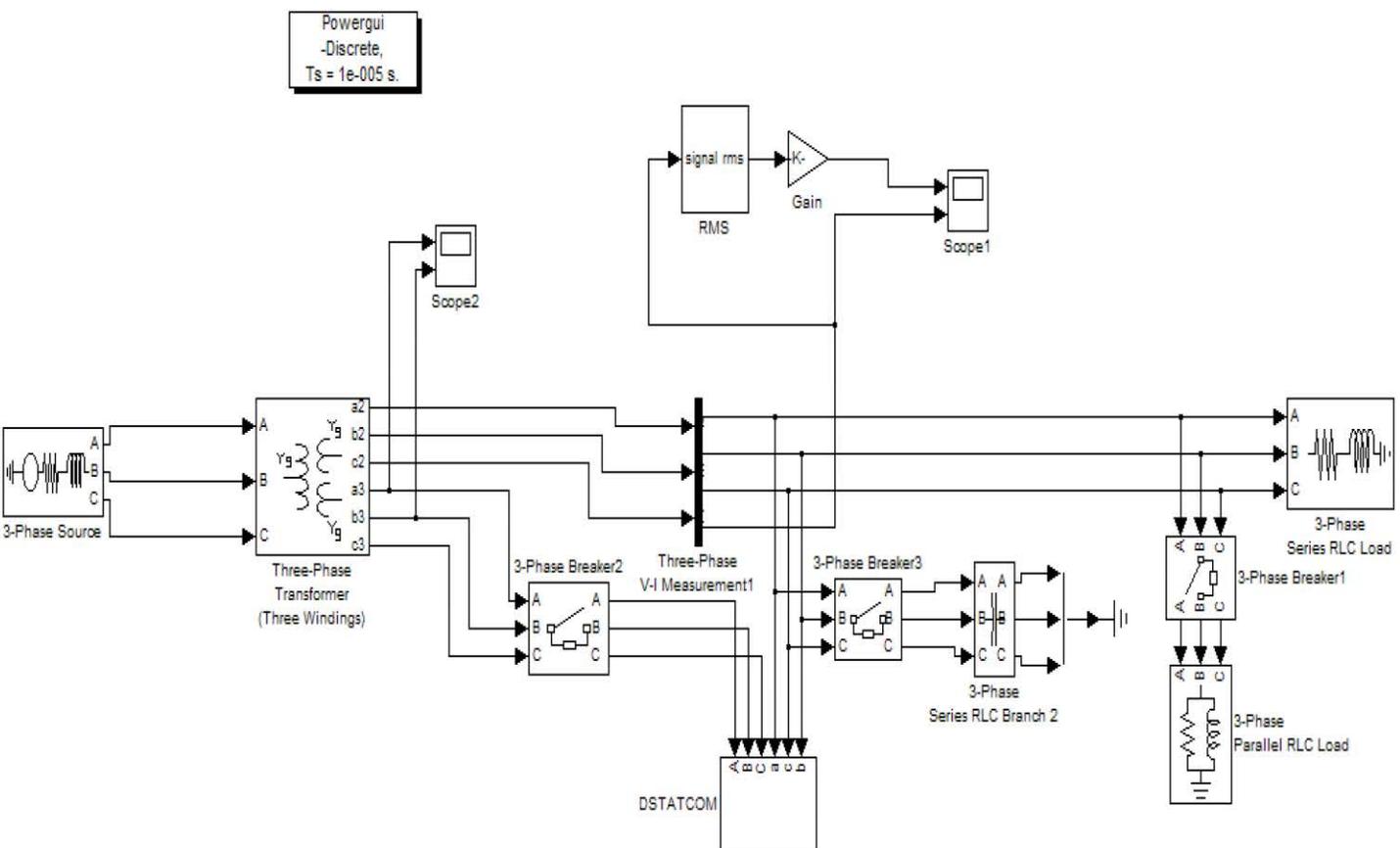
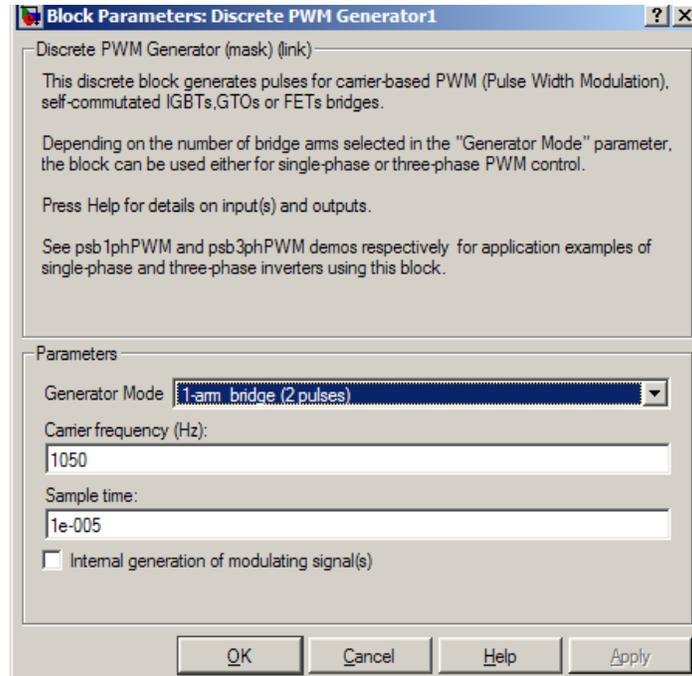


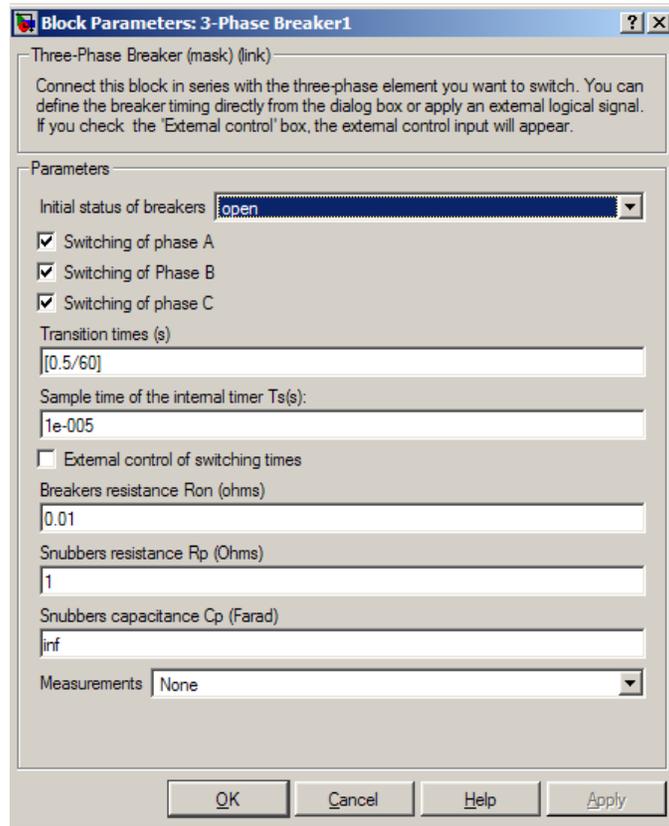
Figura 4.4. Diagrama Esquemático de la Red de Prueba con el D-STATCOM.

El ángulo δ se usa en los generadores del *PWM* como el ángulo de fase de la señal de control sinusoidal. La frecuencia de conmutación utilizada en los generadores sinusoidales del *PWM* es $f_{sw} = 1050$ Hz y el índice de modulación $M_s \approx 1$, como se ilustra en el cuadro.



Cuadro 4.1. Parámetros de Medición del PWM

Las simulaciones se llevarán a cabo tanto para los casos en que el DSTATCOM esté conectado o no al sistema. En el intervalo de simulación de 0.0083-0.33 s. Cerrando el interruptor 1 la carga se incrementa.



Cuadro 4.2. Parámetros de Medición Interruptor 1.

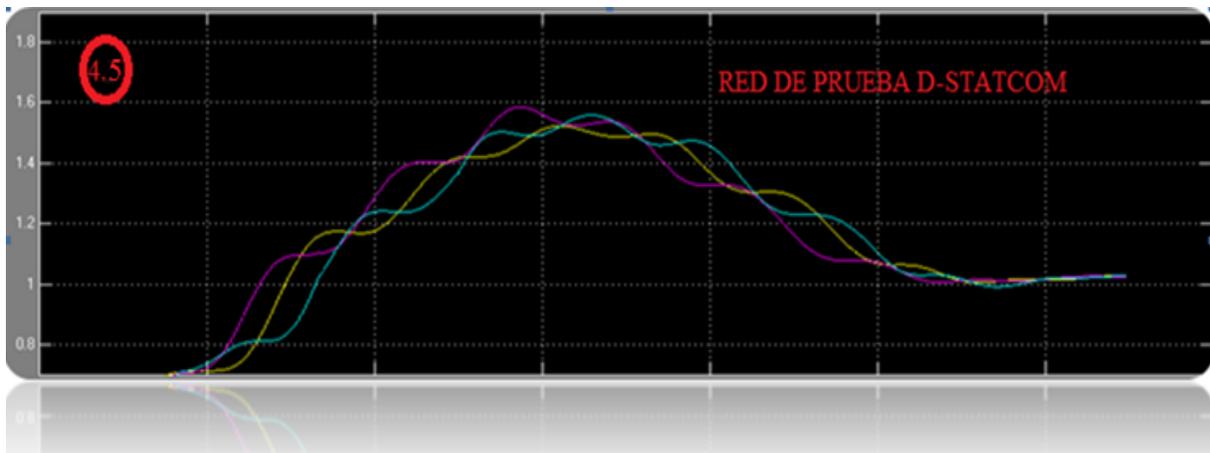


Figura 4.5. Gráfica-Red de Prueba del D-STATCOM

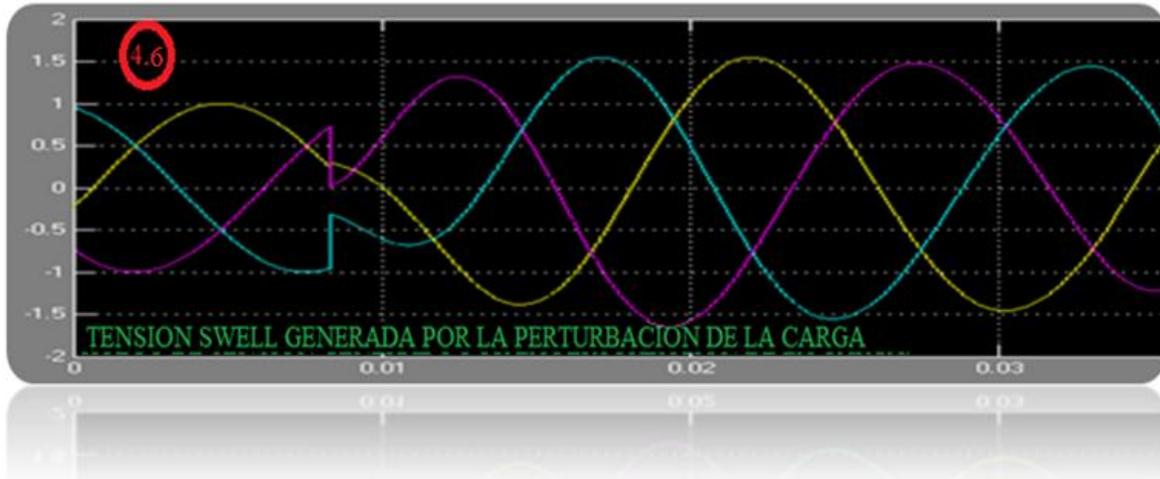
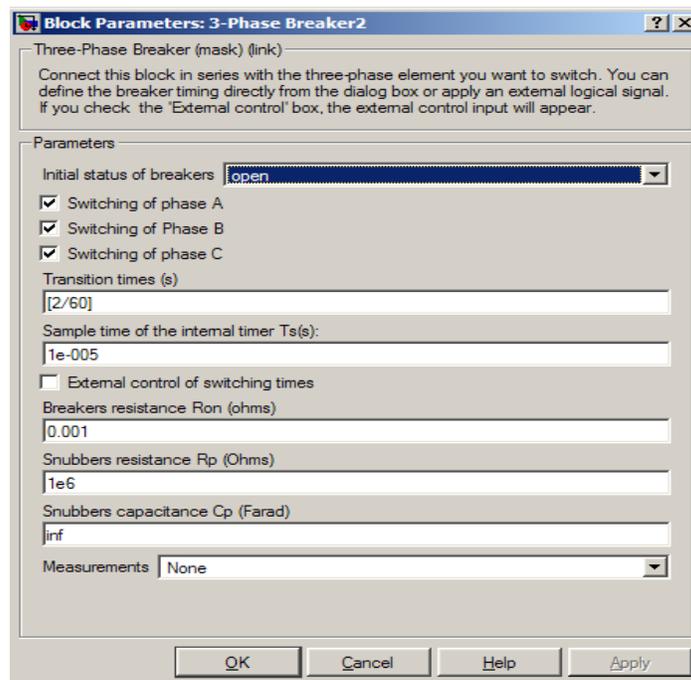


Figura 4.6. Gráfica-Apertura del Interruptor 1.

Bajo estas nuevas condiciones de operación del voltaje en el punto de carga se experimenta un hueco de tensión de un 10% con respecto al valor de referencia que se ajusta al valor de unidad.

En este mismo intervalo el interruptor 2 se cierra y la operación del DSTATCOM comienza para mitigar el hueco de tensión y restaurar la tensión de nuevo al valor de referencia.



Cuadro 4.3. Parámetros de Medición Interruptor 2.

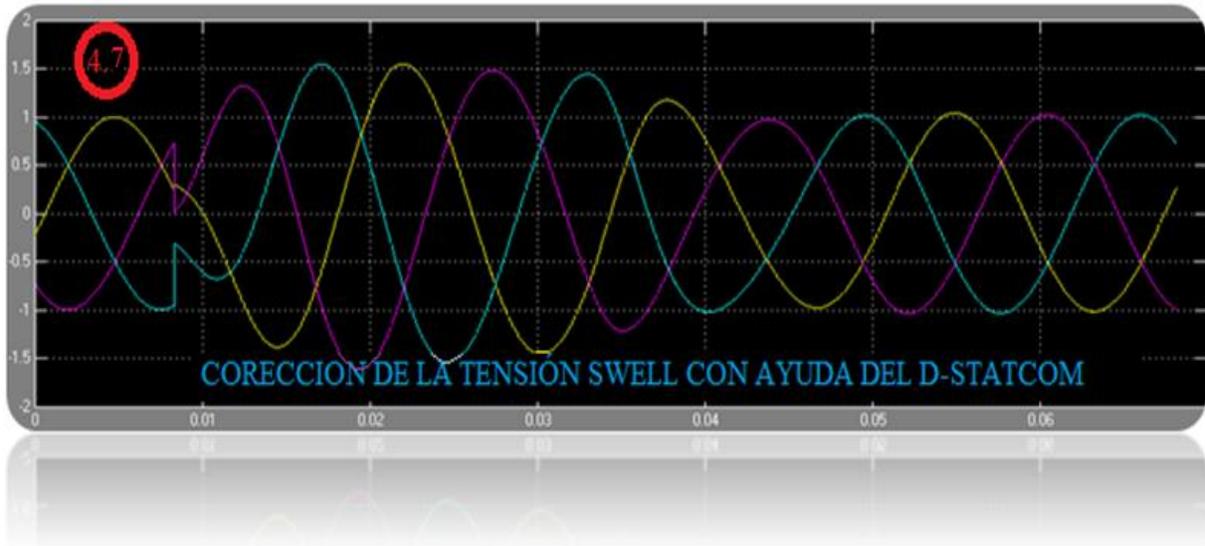


Figura 4.7. Gráfica-Apertura Interruptor 2

Los resultados obtenidos a través de la simulación digital muestran claramente la capacidad del D-STATCOM para mitigar los huecos de tensión proporcionando un nivel continuo a la variable de compensación. La respuesta del controlador es rápida, é incluso cuando es simple, es efectivo considerando las condiciones de operación en el ejemplo.

Incluso puede ser utilizado para evitar que las cargas no lineales contaminen el resto del sistema de distribución. La rápida respuesta del D-STATCOM hace posible él correcto suministro continuo y dinámica de control sobre la fuente de alimentación incluyendo voltajes, compensación de potencia activa, mitigación de armónicos y la eliminación de los huecos de tensión y la tensión Swell.

En la siguiente simulación se observa el funcionamiento del DSTATCOM al mitigar un hueco de tensión.

En la figura 4.8 se observa que, en el momento en que el interruptor 1 permite el paso de la carga en el $t=0.016$, se produce un decremento con respecto del voltaje de entrada. Mientras que en la figura 4.9 en $t=0.5$; instante en que el interruptor conectado al D-STATCOM permite la entrada de este dispositivo, se observa cómo la onda vuelve a su valor original.

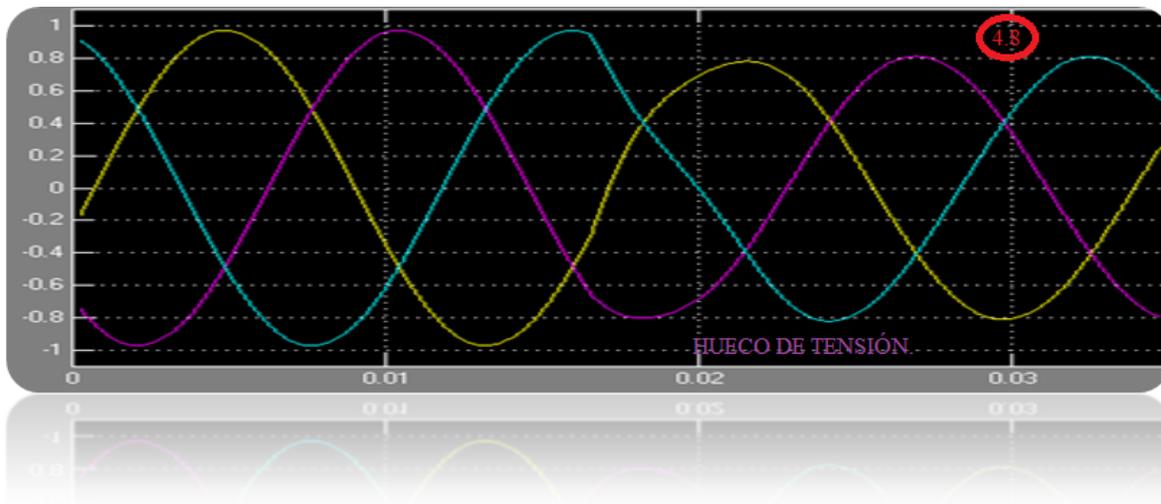


Figura 4.8. Comportamiento del Interruptor 1



Figura 4.9. Comportamiento de los interruptores 1 y 2

4.3 Modelado Capacitor

El bloque paralelo de la carga RLC implementa una carga lineal con una combinación en paralelo. A la frecuencia especificada la carga exhibe una impedancia constante. Las potencias activa y reactiva, absorbidas por la carga son proporcionales al cuadrado de la tensión de la carga y dependiendo de los parámetros de; la reactancia capacitiva, potencia activa y reactancia inductiva es el elemento que se indicara en el bloque. El diagrama esquemático del bloque se muestra en la siguiente figura:

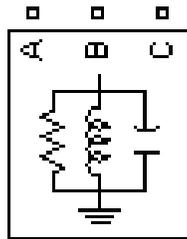
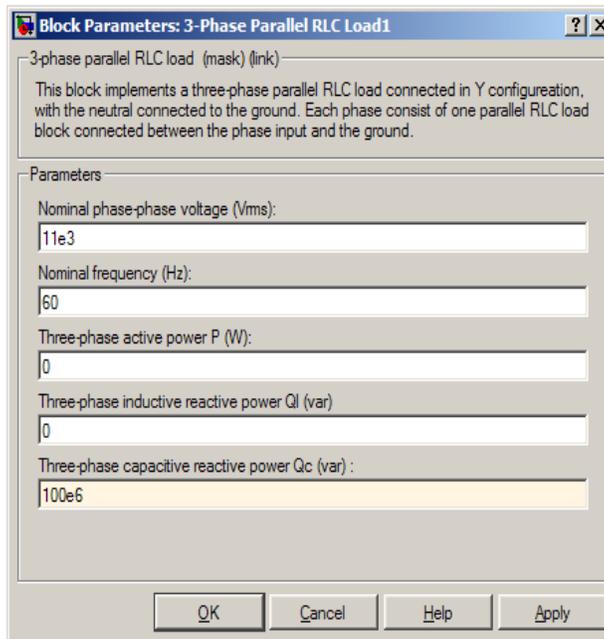


Figura 4.10 Diagrama Esquemático de la Carga RLC.



Cuadro 4.5 Bloque de los Parámetros de la Carga RLC para el Capacitor.

El diagrama utilizado para el modelado del capacitor se muestra en la figura 4.11 y la red de prueba se observa en la figura 4.13, para esta modelización se mantuvieron los valores

fijos tanto en voltaje como en frecuencia y únicamente para mitigar nuestro evento se trabajo con la potencia reactiva y la reactancia capacitiva.

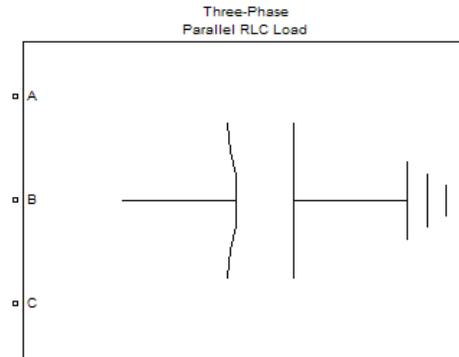


Figura 4.11. Diagrama del Capacitor

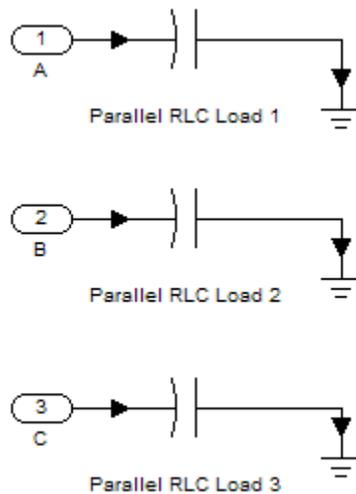


Figura 4.12. Arreglo de los Capacitores por Fase.

En la gráfica de la figura 4.14 se observa el momento en que el interruptor 1 se cierra en el $t=0.083$ s. La forma de onda decrece con respecto a nuestro valor de inicio y continua de esta manera hasta que nuestro interruptor 2 da el paso al capacitor para restablece la forma de onda en un $t=0.33$ s, como se puede observar en la figura 4.15

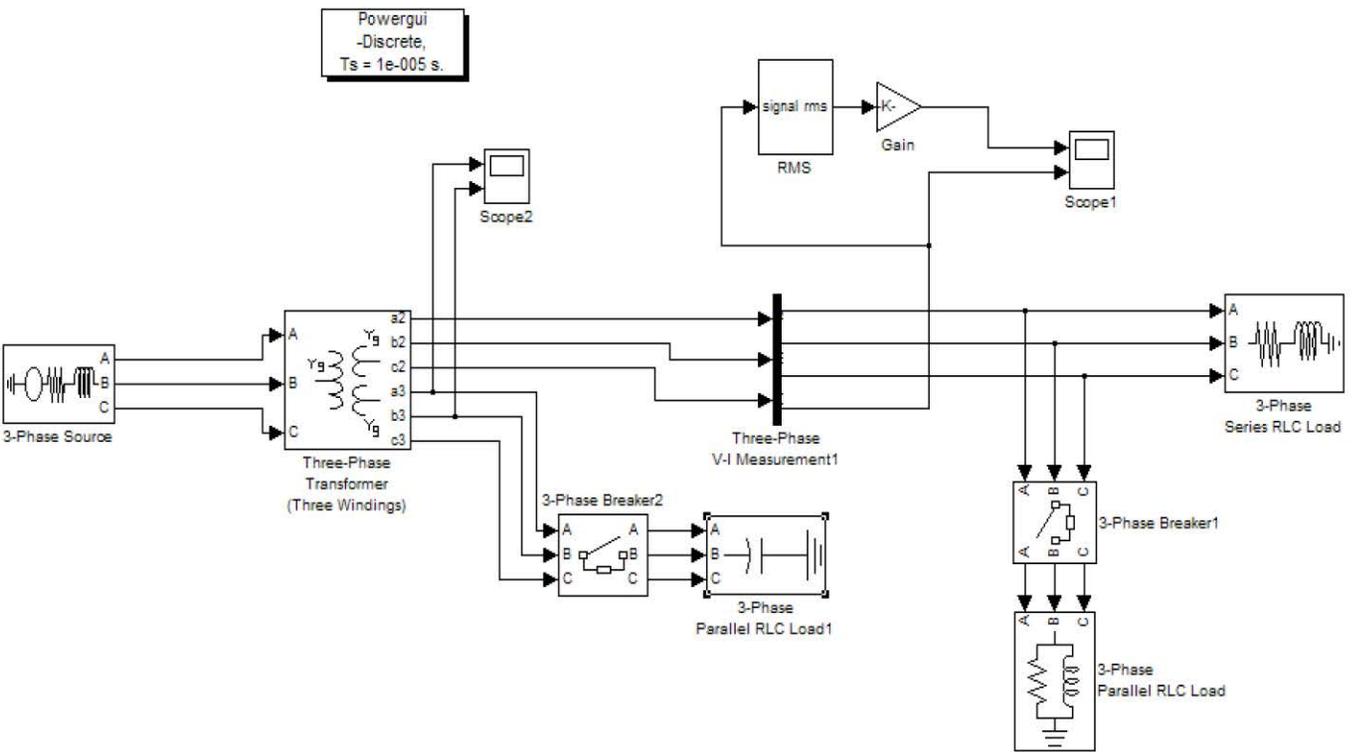


Figura 4.13. Red de Prueba con el Capacitor

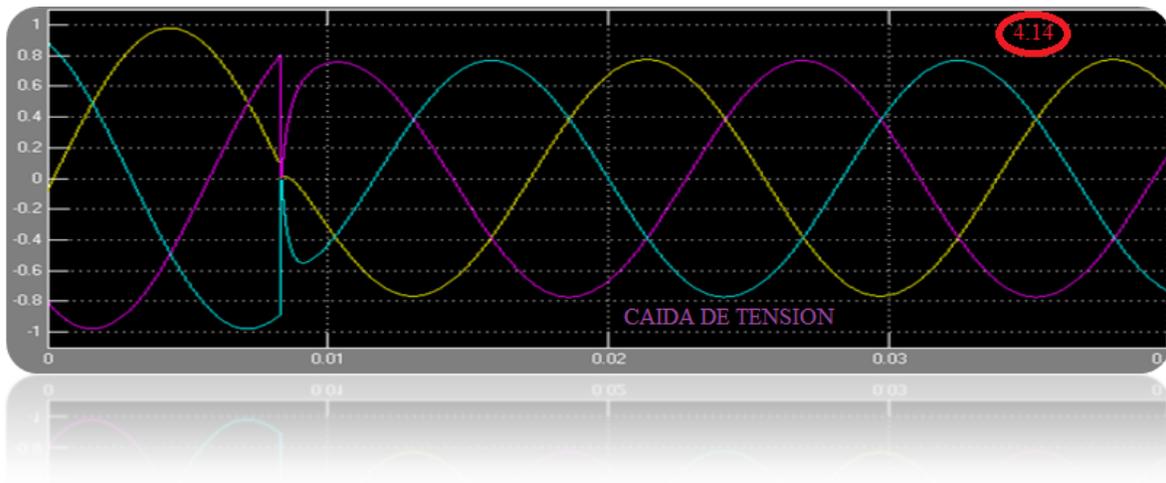


Figura 4.14. Cierre del Interruptor 1

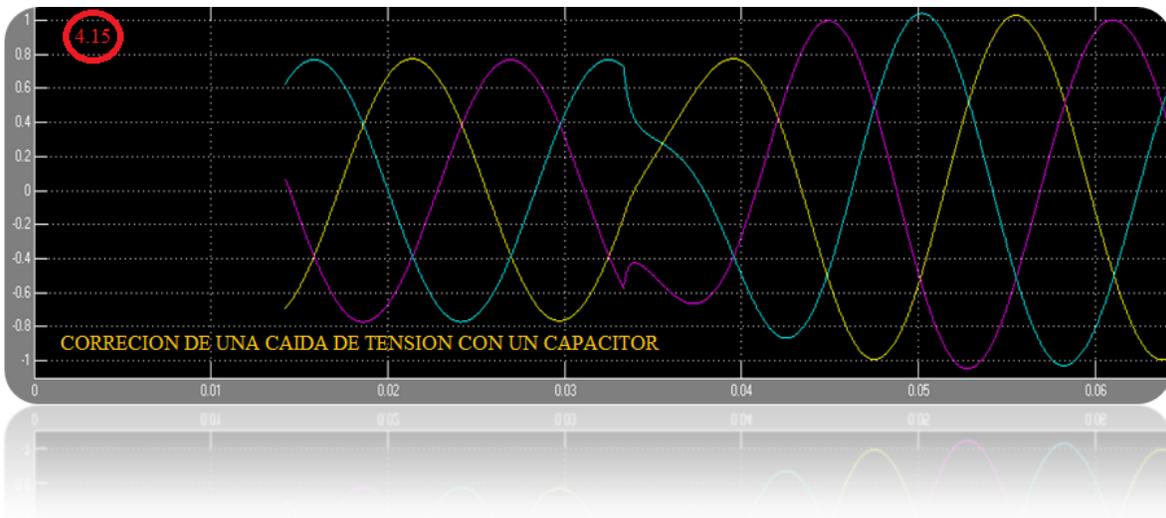


Figura 4.15. Cierre del Interruptor 2

En la figura 4.16 claramente se puede observar el momento en el que el interruptor dos realiza el re-cierre para dar paso al capacitor, el cual mitiga el evento de sobretensión. Con lo anterior, podemos darnos cuenta de esta acción gracias al ligero transitorio que se forma al momento de dicho cierre.

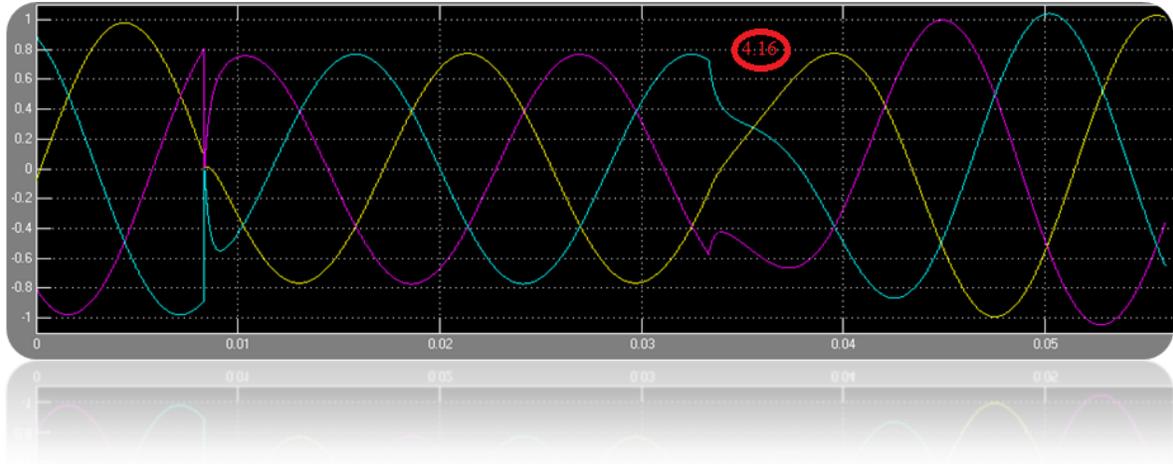
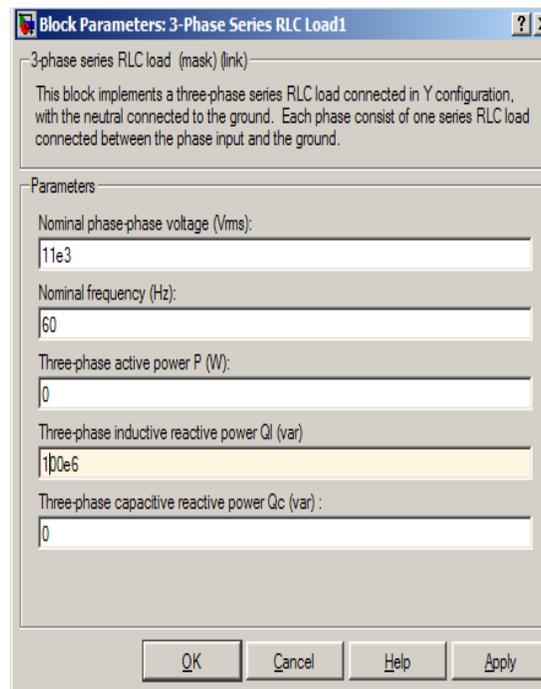


Figura 4.16. Re-cierres de los interruptores 1 y 2

4.4 Modelado Reactancia.

El bloque utilizado en el modelado del capacitor prácticamente es el mismo que se utilizó para el modelado de la reactancia, sin embargo el parámetro a utilizar es el valor de la reactancia inductiva.



Cuadro 4.6. Parámetros de la Carga RLC Para la Reactancia.

El modelo que se observa en la figura 4.17 se utilizó para la prueba de sobre tensión y tensión swell. Los parámetros de voltaje y frecuencia no cambian.

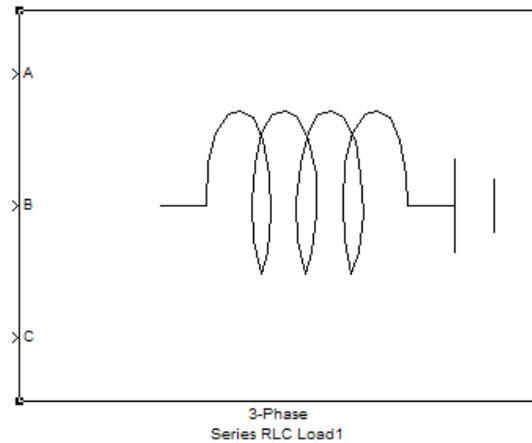


Figura 4.17. Diagrama Esquemático de la Reactancia

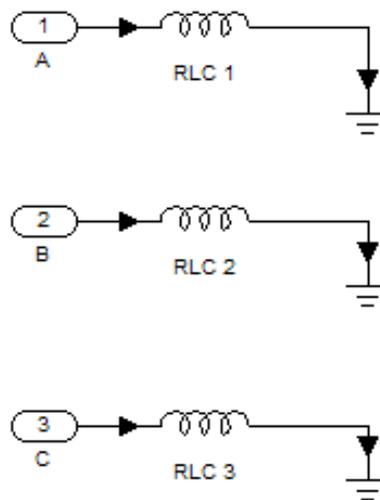


Figura 4.18. Arreglo de las Reactancias por Fase.

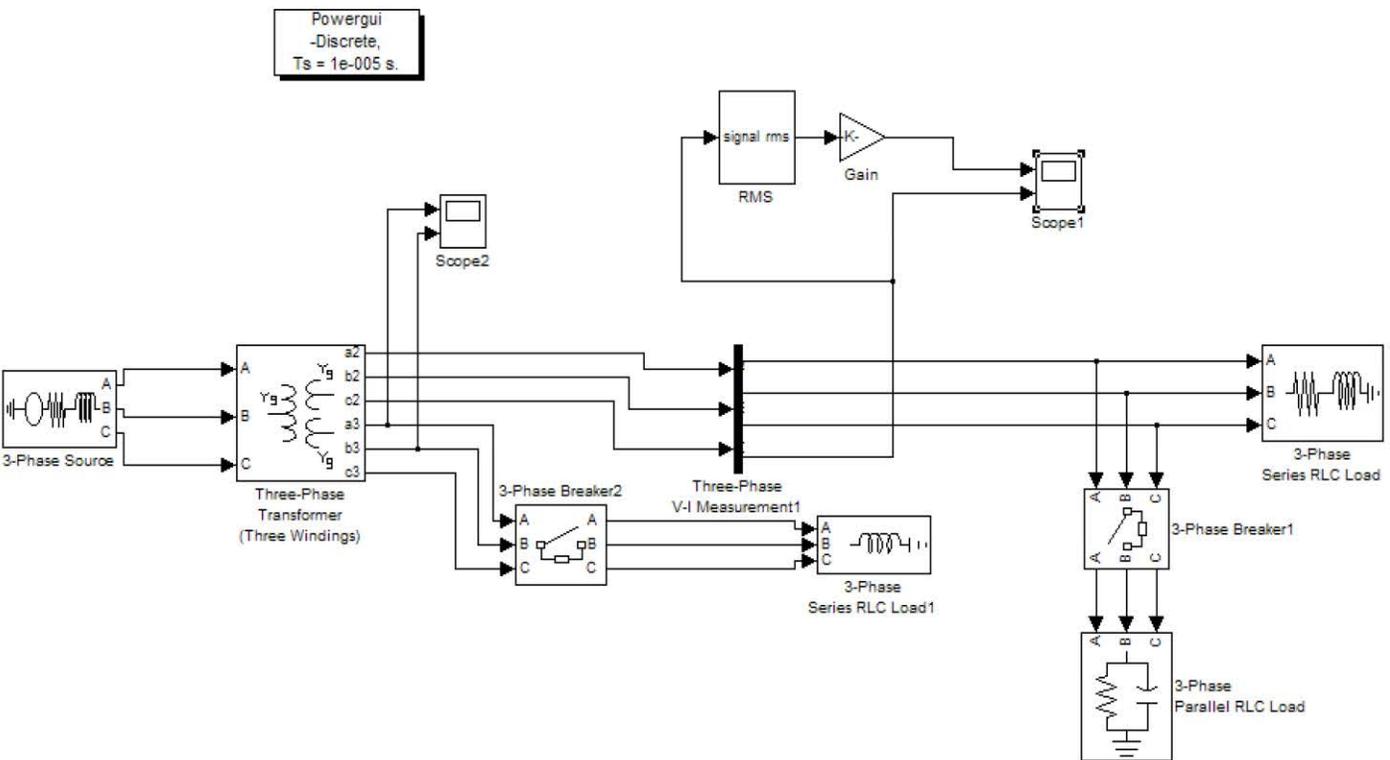


Figura 4.19. Red de Prueba con la Reactancia

En nuestra simulación, se observa en la figura 4.20, que al momento del cierre del interruptor 1 existe un incremento con respecto a nuestra señal de entrada en un periodo de $t = 0.0083$ s. Esto nos lo indica el transitorio formado por el cierre de nuestro interruptor.

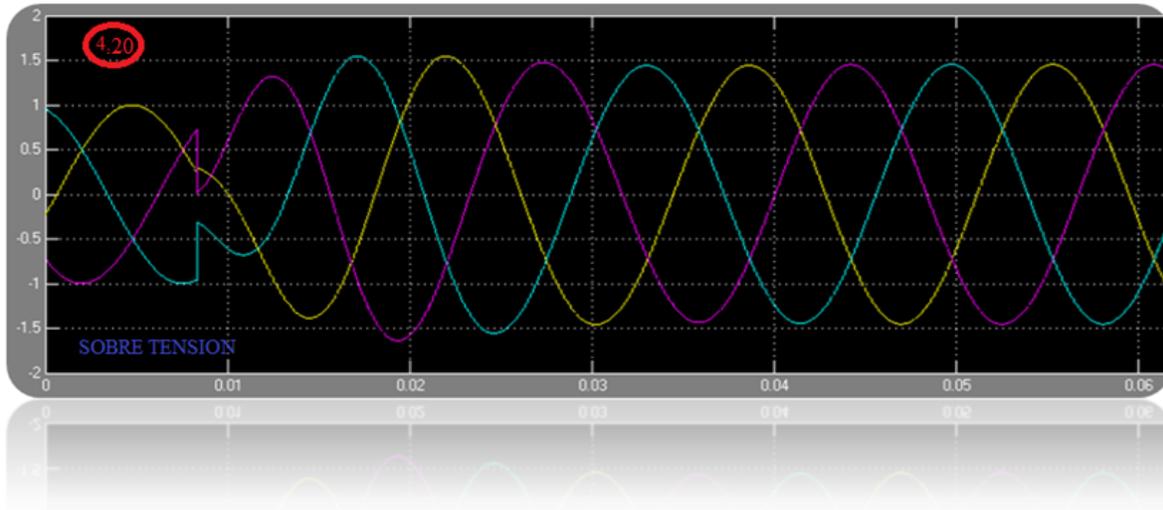


Figura 4.20. Re-cierre del Interruptor 1

En el instante en que se produce el re-cierre de nuestro segundo interruptor en el $t = 0.033$ s, la forma de onda se vuelve a restablecer gracias a las características de nuestra Reactancia; como se observa en la figura 4.21

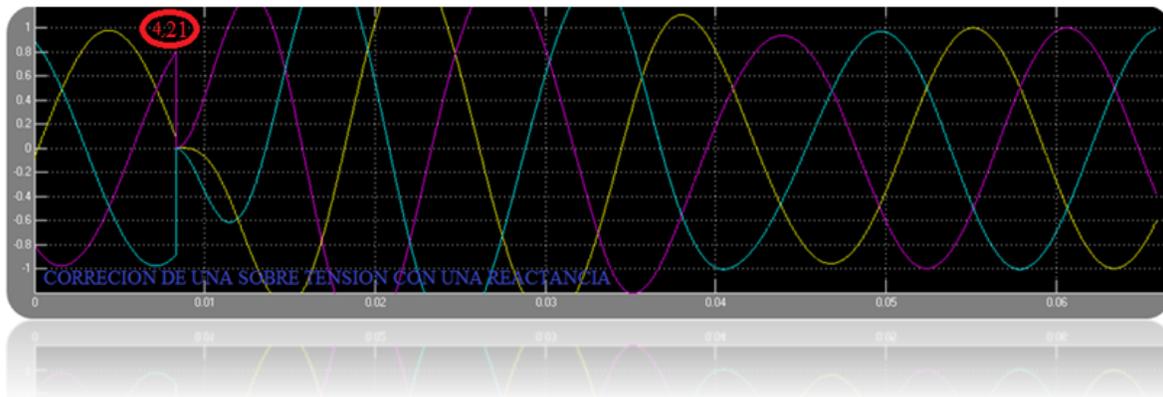


Figura 4.21. Re-cierre de los interruptores 1 y 2

4.5 Modelado Máquina Síncrona

Para el caso de nuestra figura 4.23, se implemento el modelo de una Máquina Síncrona. Éste dispositivo puede operar en modo de motor y generador, el modo de operación esta dictado por el signo de la potencia mecánica (positivo para el modo de generador y negativo para motor). El modelo toma a consideración la dinámica del estator, el campo y los devanados. El circuito equivalente del modelo se representa en el marco de referencia del rotor. Todos los parámetros del rotor y las cantidades eléctricas se ven desde el estator. Para implementar el modelo de la Máquina Síncrona se estableció la potencia nominal, el voltaje, la frecuencia y la corriente de campo.

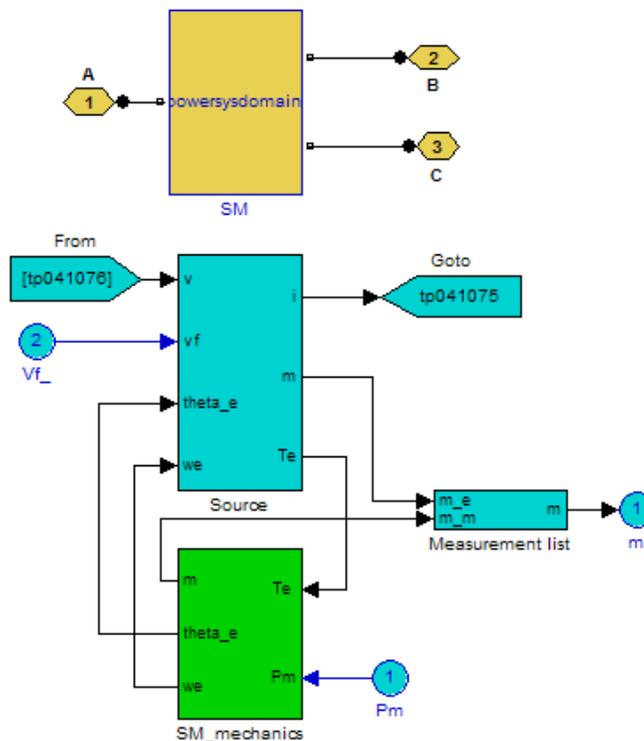


Figura 4.22. Diagrama Interno de la Máquina Síncrona.

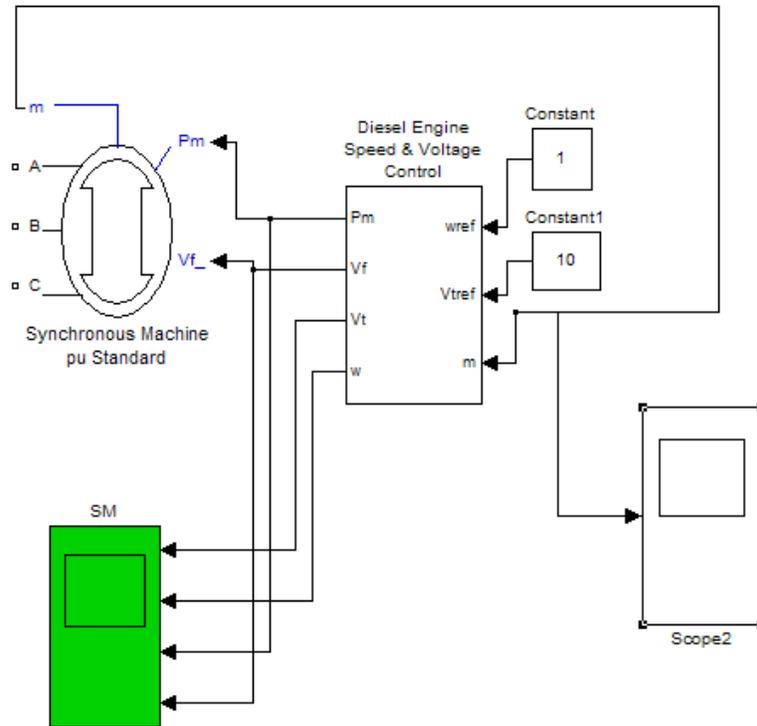


Figura 4.23. Modelado de una Máquina Síncrona

En el caso de la Máquina Síncrona se tuvieron que tomar diferentes valores de tiempo para el re-cierre de los interruptores. Durante la simulación, se observó que la máquina al momento de arrancar tarda un poco hasta estabilizarse, no puede mitigar los huecos de tensión y las caídas de voltaje de una forma tan rápida como lo hacen los demás dispositivos.

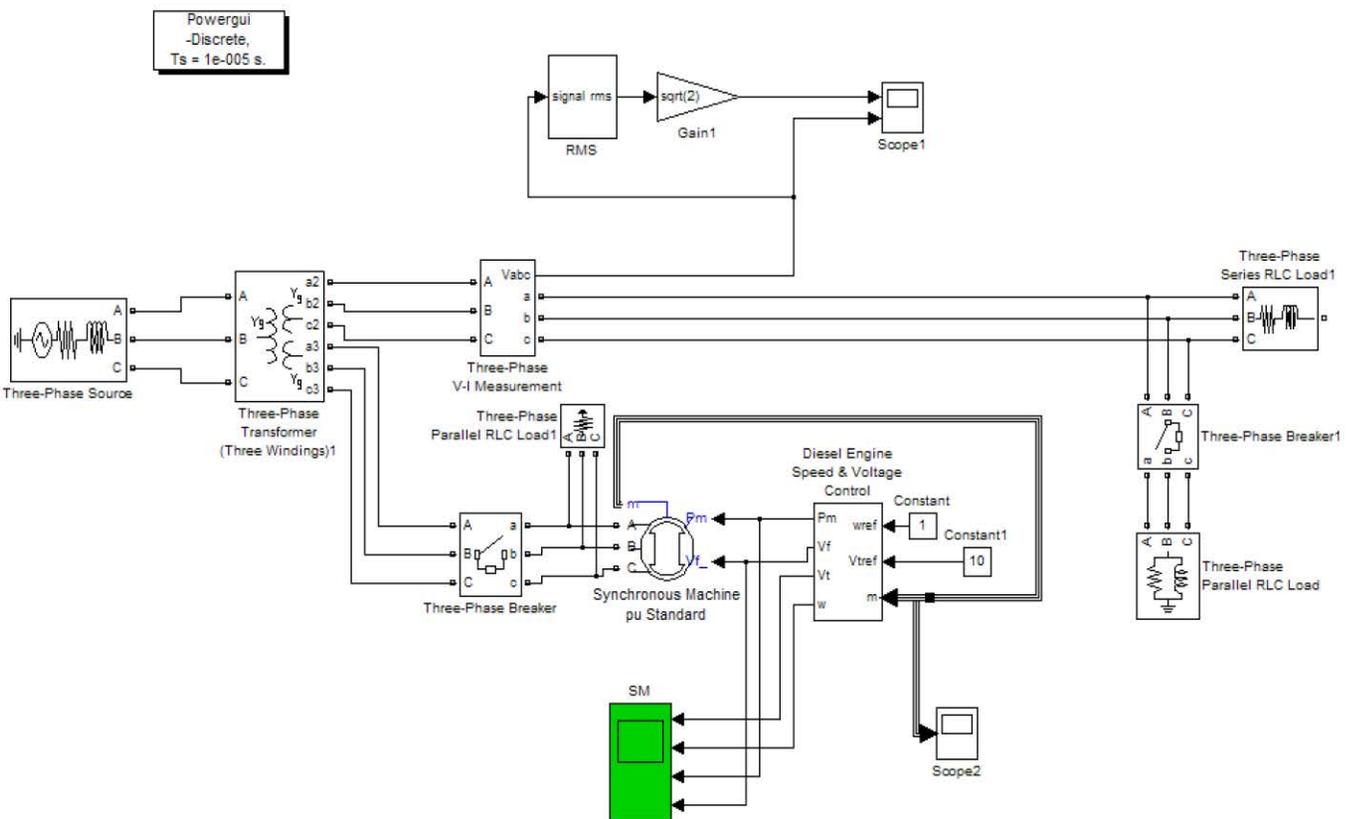


Figura 4.24. Red de Prueba con una Máquina Síncrona.

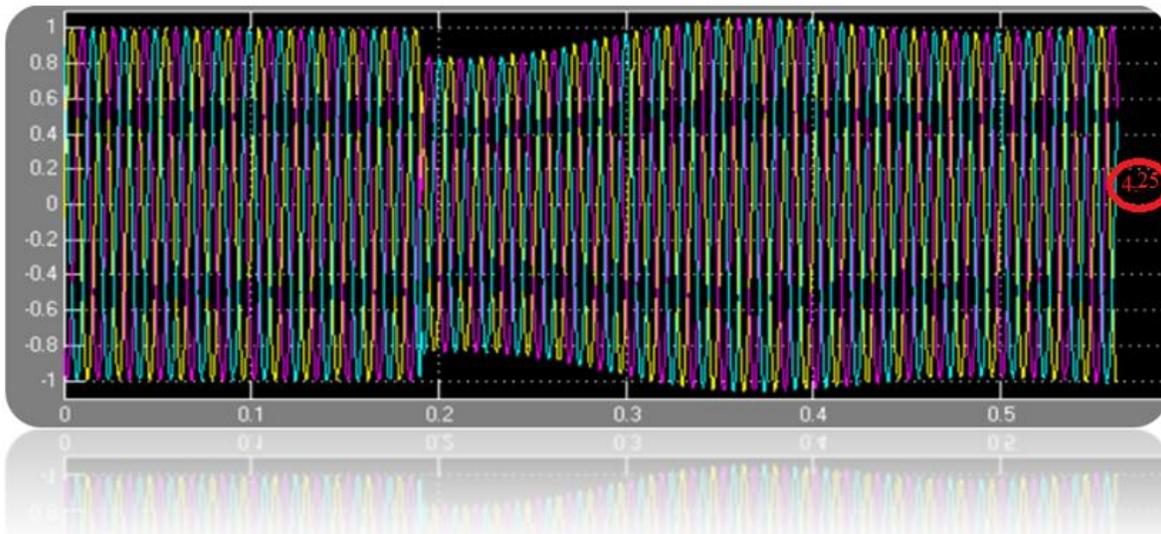


Figura 4.25. Modelado Máquina Síncrona

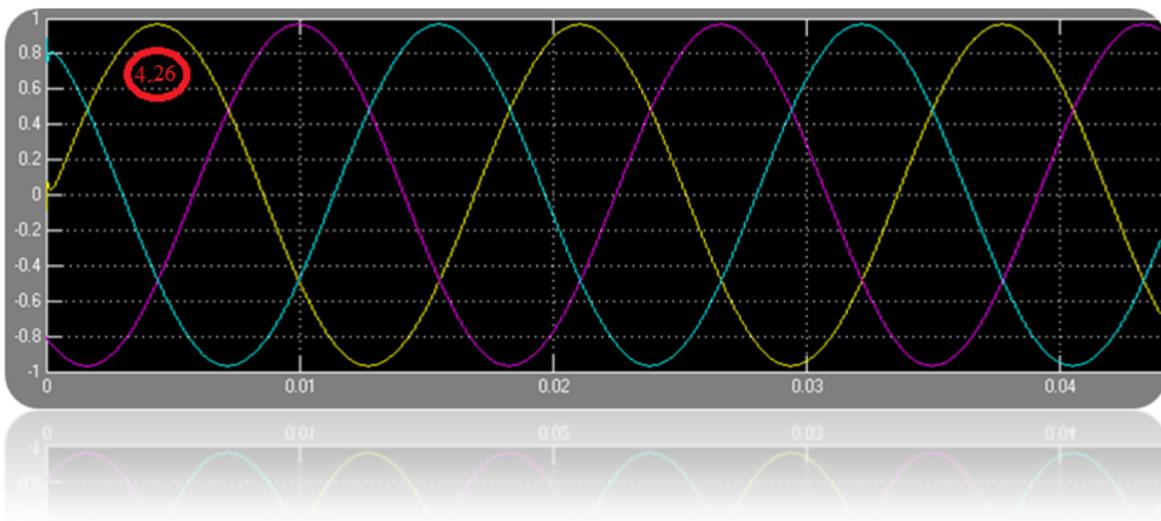


Figura 4.26. Vista de la Gráfica antes del Re-cierre del interruptor 1

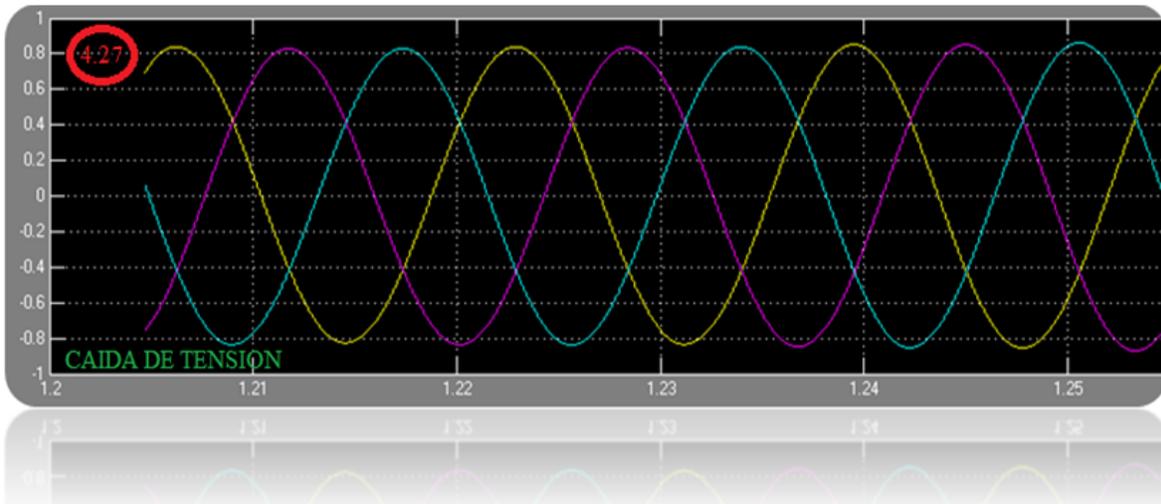


Figura 4.27. Vista de la Gráfica al momento del Re-cierre del interruptor 1

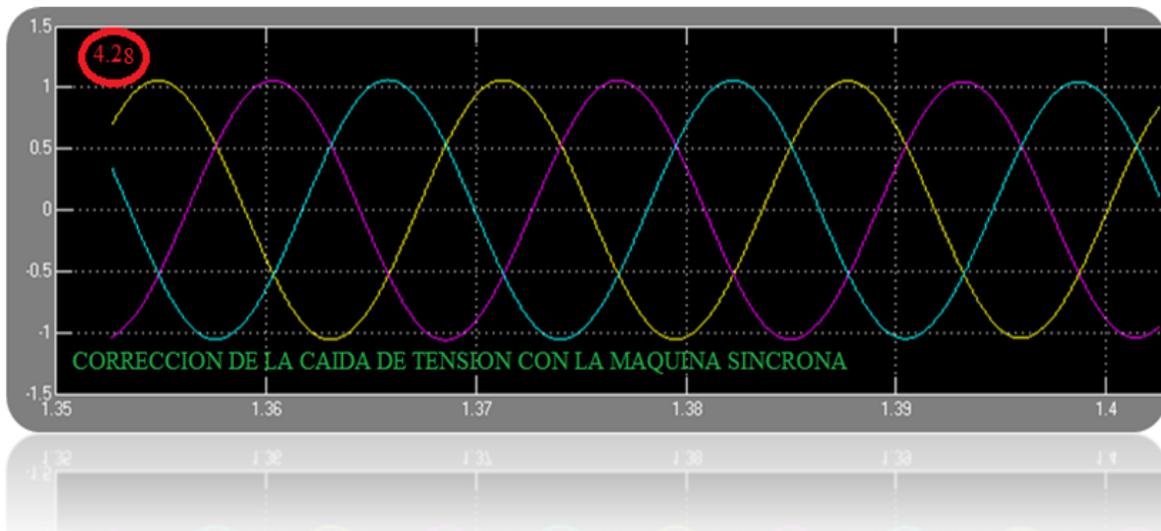


Figura 4.28. Vista de la Gráfica al momento del Re-cierre del interruptor 2

4.6 Modelado Transformador

Como se ha ido observando a lo largo del capítulo, el diagrama esquemático de cada uno de los modelados sigue siendo el mismo; obsérvese figura 4.30; con una ligera modificación para nuestro Transformador. Él diseño ocupado para nuestro Transformador, posee menos elementos que en los otros modelados; esto es gracias a que nuestro transformador contiene un cierto tipo de accesorio que le permite adaptarse a los cambios de tensión de la línea de alimentación llamado *cambiador de derivaciones*. Este cambiador de derivaciones, como ya se había mencionado, permite cambiar el número de espiras para elevar o reducir la tensión de salida del transformador y puede trabajar bajo carga o sin carga, el diagrama esquemático del transformador se muestra en la figura 4.29.

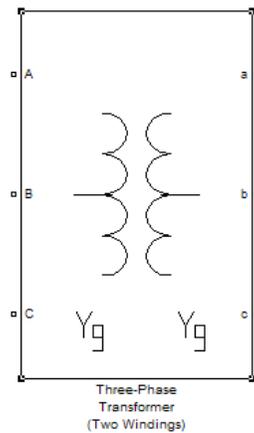


Figura 4.29. Esquema del Transformador

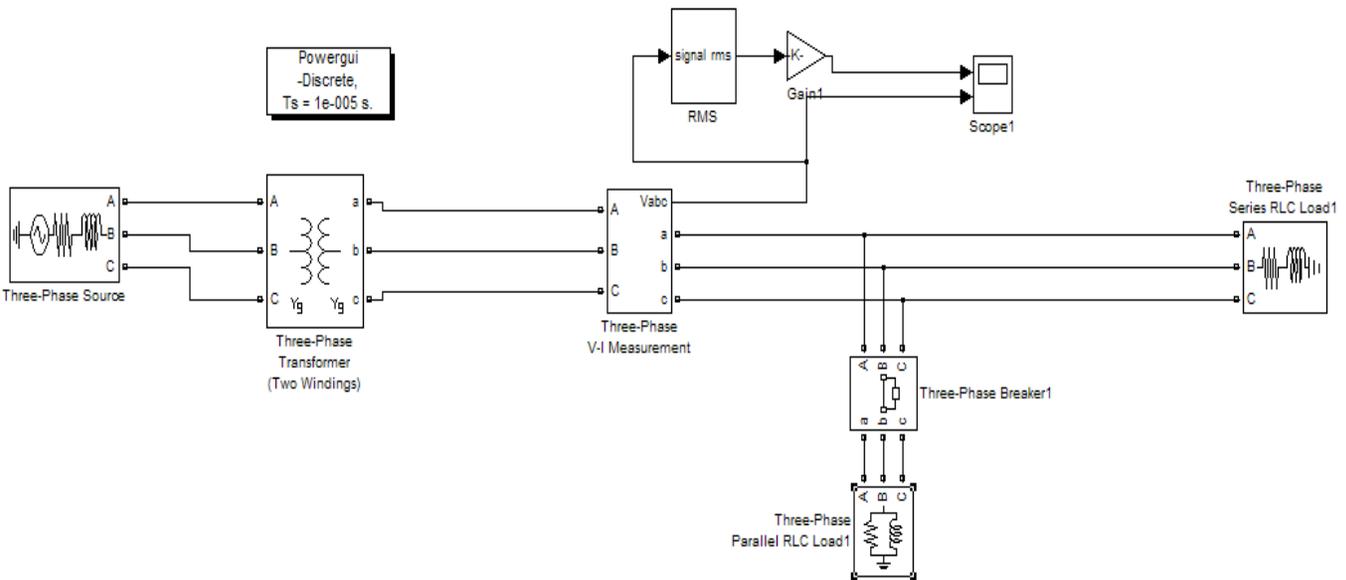


Figura 4.30. Red de Prueba con un Transformador

El transformador consiste de devanados montados en el mismo núcleo. Para implementar el modelo del transformado, establecemos la impedancia y voltaje de cada devanado y la impedancia de magnetización para el núcleo, además de la frecuencia y potencia nominal para cada fase como se muestra en la figura siguiente:

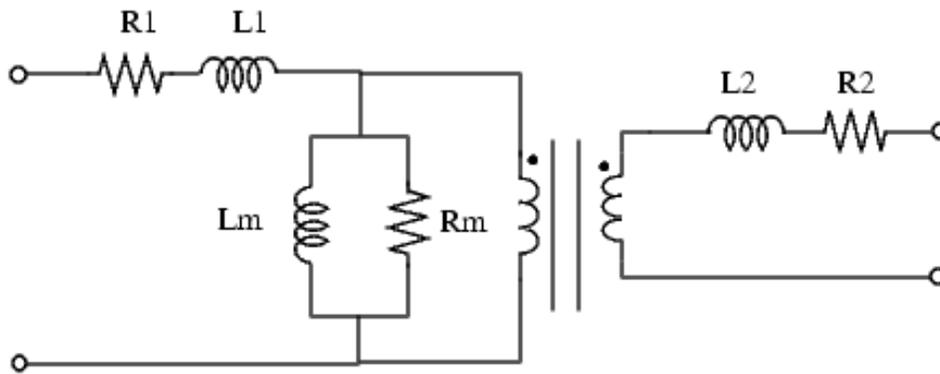


Figura 4.31. Arreglo del Transformador por Fase.

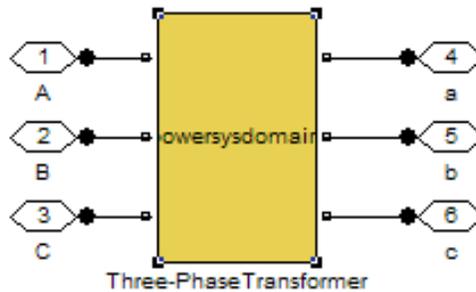


Figura 4.32. Diagrama Interno del Transformador.

En la gráfica de la figura 4.33 se observa el modelado del funcionamiento normal del Transformador.

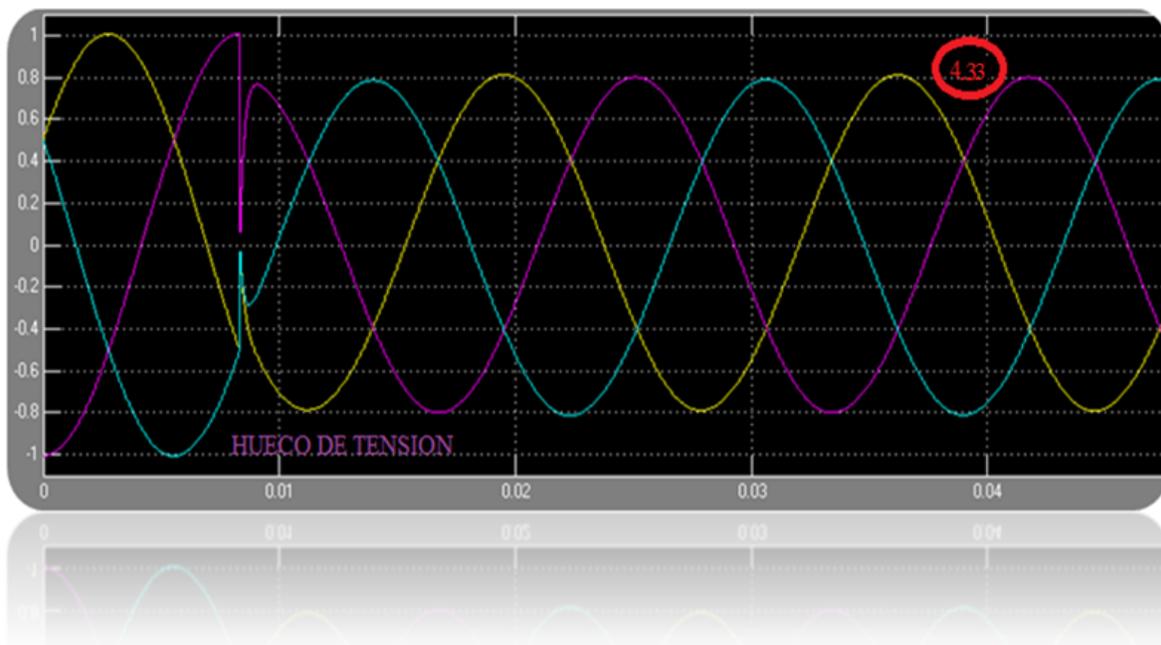


Figura 4.33. Modelado del Transformador sin Modificación del Cambiador de Derivaciones

Para poder corregir el problema de caída de tensión en nuestro modelo del Transformador se modificó el valor del cambiador de derivaciones, y el resultado obtenido se muestra en la figura 4.34.

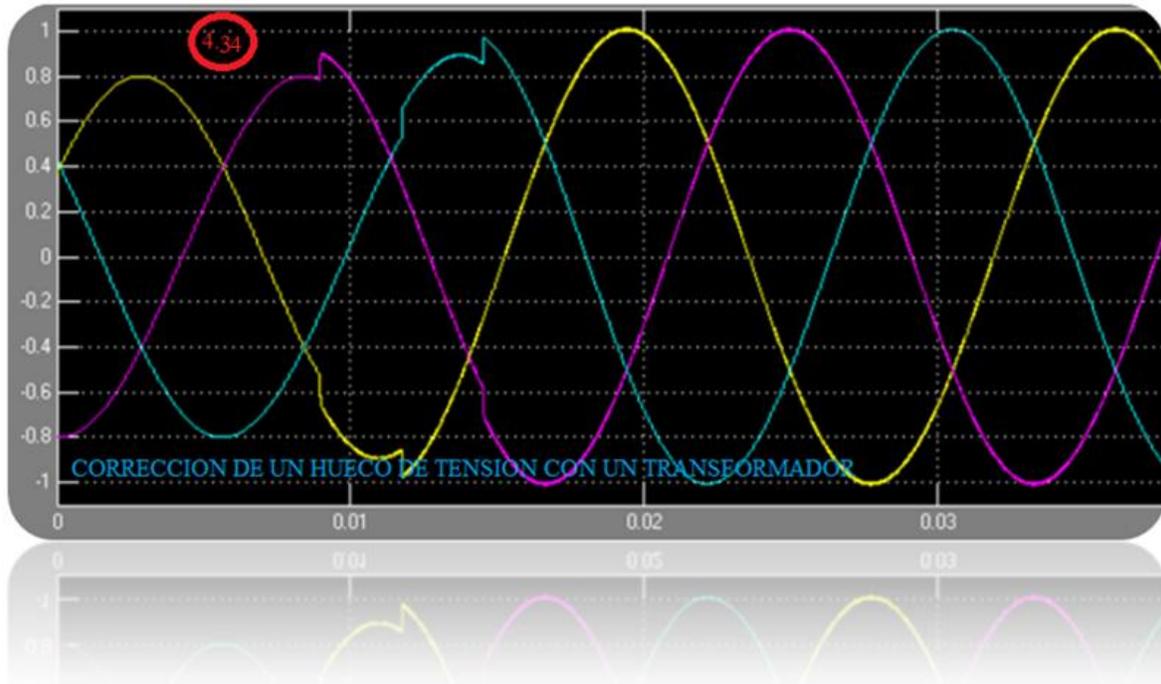


Figura 4.34. Modelado del Transformador al Modificar el Valor del Cambiador de Derivación

En la figura 4.35 se observa el funcionamiento del Transformador para corregir el evento de la tensión swell. En esta figura todavía no se cambia el valor del cambiador de derivaciones.

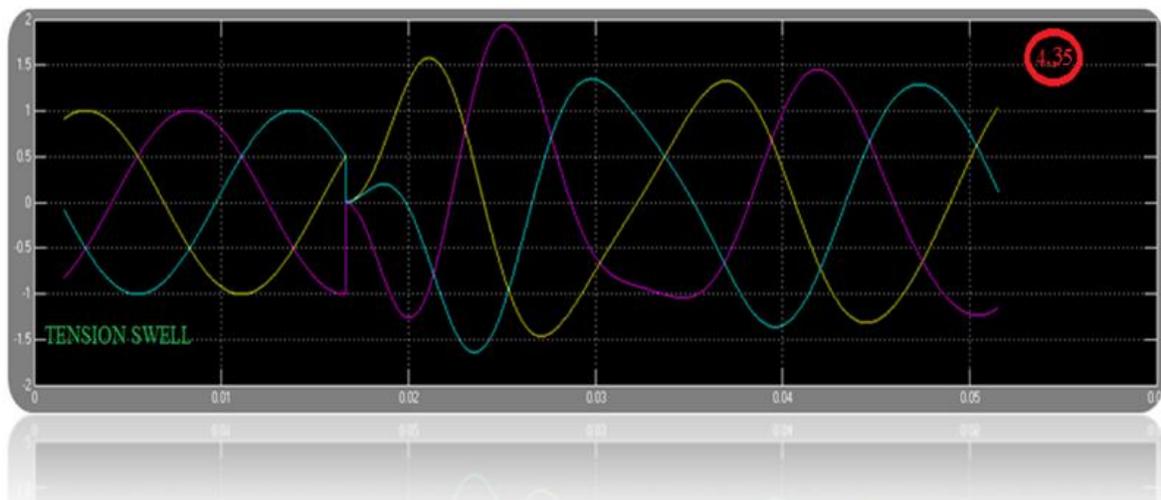


Figura 4.35. Modelado del Transformador Antes de Modificar el Cambiador de Tensión

Finalmente, en la figura 4.34 se observa la corrección de nuestro dispositivo modificando el valor del cambiador de derivaciones. Asimismo, se pueden observar algunos flickers debido a la rápida disminución de carga.

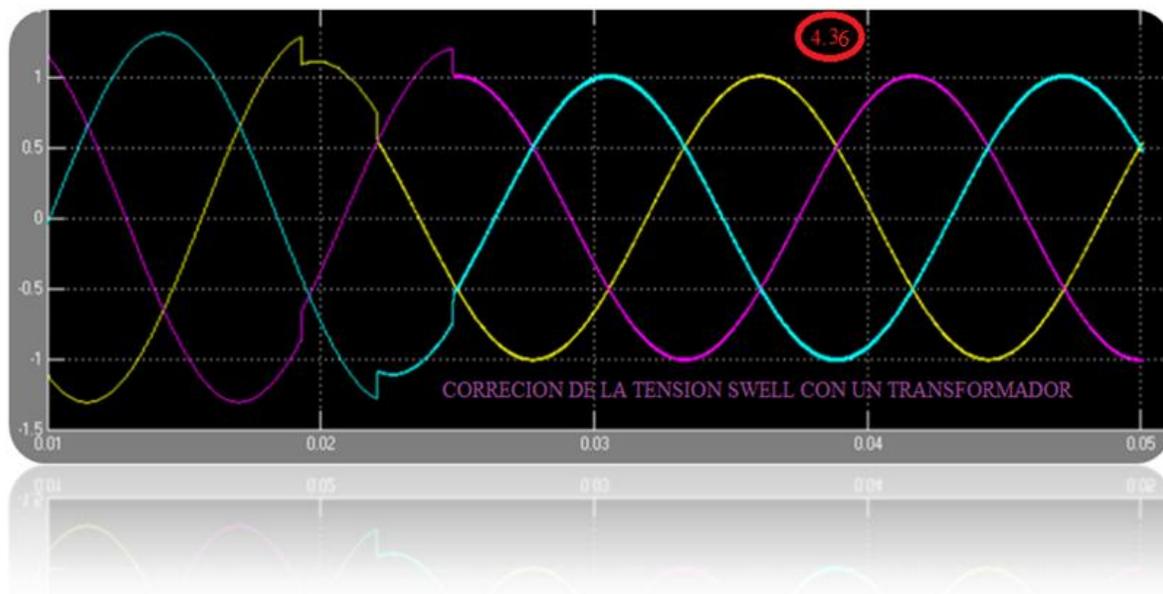


Figura 4.36. Modelado del Transformador al Corregir la Tensión Swell

Como se pudo observar a lo largo de las simulaciones, algunos de los problemas de variaciones de tensión siempre van a existir en nuestro sistema eléctrico como es el caso de los transitorios, flickers y armónicos. Sin embargo, pudimos percatarnos que estas variaciones sólo se dan por un periodo de tiempo muy corto, y son producidos por el cierre de los interruptores o por el incremento y decremento de la carga.

CONCLUSIONES

La calidad de la energía es muy importante, sobre todo en la parte de Distribución; debido a que en esta etapa se presentan disturbios que son causantes del mal funcionamiento de las cargas; e incluso interrumpen los procesos que resultan en pérdidas económicas sustanciales o datos.

Los disturbios eléctricos tienen que ser corregidos en el menor tiempo posible, porque si un disturbio tiene una duración mayor al valor esperado, daña los aparatos eléctricos o causa un mal funcionamiento en ellos. Cuando se produce una sobre tensión, por lo regular posee un tiempo de duración de medio ciclo a un minuto, si la sobre tensión llegara a durar más de el tiempo dado rebasando el valor pico, que en Distribución es de 127 [V] para casas habitación, los dispositivos eléctricos que tenemos en nuestros hogares tendrían una alta posibilidad de dañarse.

Gracias a la ayuda de Simulink®, se pudo analizar el comportamiento de cada disturbio eléctrico que se presenta en los Sistemas de Distribución, corroborando de esta manera lo presentado en los capítulos anteriores. Se observó que cada uno de los dispositivos correctores de tensión es el mejor para corregir cada unos de los disturbios para los que fueron creados y como algunos de ellos siempre van a estar presentes en un SEP.

Se comprobó que el D-STATCOM es uno de los dispositivos que corrige en muy poco tiempo sobre-tensiones y caídas de tensión, debido a que continuamente monitorea los voltajes de carga y corrientes puede determina la cantidad de compensación requerida por el sistema de CA para cualquier variación de tensión. El D-STATCOM posee muchas aplicaciones en los sistemas de distribución de baja tensión destinados a mejorar la calidad y confiabilidad de la energía suministrada a los usuarios finales.

Existen varios factores que se deben de tomar en cuenta para el diseño del D-STATCOM y que está relacionado con el control de circuitos. Los más importantes para nuestro sistema serían el enlace del capacitor por el lado de DC, la reactancia de acoplamiento del transformador, el ratio de transformación y el filtro de salida del equipo.

Estos elementos deben de estar debidamente seleccionados teniendo en cuenta los requisitos de las aplicaciones, regulación de tensión y compensación de energía. El capacitor de DC tiene una influencia directa sobre la distorsión armónica de la tensión de salida generada por el D-STATCOM y de la velocidad de respuesta de los controladores. Si el capacitor es de un tamaño inferior la respuesta de los controladores será rápida, pero la tensión del circuito intermedio tendrá ondulación excesiva y por lo tanto la tensión de salida va a contener altos niveles de distorsión armónica.

Por otra parte existirá un sobrepico transitorio. Sin embargo, un capacitor de gran tamaño mejorará la forma de onda de tensión de salida y reducirá el sobrepico transitorio, pero a expensas de una respuesta lenta en los controladores.

La selección de los parámetros de acoplamiento del transformador tiene un gran impacto en el rendimiento en el rendimiento del D-STATCOM. Desempeña un papel importante en el valor de regulación de voltaje y compensación de energía que el D-STATCOM puede proporcionar. En esencia, la amplitud y el ángulo de fase de la caída de tensión en la reactancia del transformador definen los flujos de potencia activa y reactiva entre el D-STATCOM y el sistema de AC.

Gracias a la capacidad de almacenamiento de energía que poseen los Capacitores, éstos pueden funcionar como fuentes de voltaje, proporcionando la energía necesaria para poder compensar los huecos de tensión y la caída de tensión. Su función es compensar los incrementos de demanda de potencia reactiva. Este tipo de dispositivo funciona muy bien para la corrección de eventos como los huecos de tensión, debido a que no genera armónicos como lo hace el D-STATCOM.

La reactancia nos ayudó en la corrección del evento de sobre-tensión y huecos de tensión, gracias a la capacidad que tienen, tanto de disipar como de almacenar energía. Al momento

de realizar la simulación se observó que al entrar en operación, este dispositivo ingresa de manera correcta y no genera armónicos.

Otro de los dispositivos que nos ayudaron en la corrección de los huecos de tensión fue la Máquina Síncrona, este dispositivo tiene las mismas características de un alternador, y por lo tanto, posee las mismas propiedades eléctricas. El circuito de una Máquina Síncrona se encuentra estructurado por una reactancia síncrona por fase y un voltaje inducido de CA, inducido por el flujo de CD proveniente de los polos del rotor en el estator. Esto nos ayuda a compensar el evento ya mencionado en párrafos anteriores, con el inconveniente, de que la corrección de los disturbios es más lenta en comparación con los demás dispositivos.

Debido a que los transformadores se equipan con un cierto tipo de accesorio que les permite adaptarse a los cambios de tensión de la línea de alimentación llamado cambiador de derivaciones; nos ayuda a corregir los huecos de tensión y la tensión swell. Con este tipo de accesorio se puede cambiar el número de espiras para elevar o reducir la tensión de salida del transformador. Sin embargo, no todos los transformadores pueden realizar esta operación bajo carga.

La simulación tanto de eventos no deseados, como del equipo que puede aplicarse para la corrección, nos permite entender mejor estos aspectos desde el punto de vista de la calidad de la energía. Asimismo, se comprobó que los factores determinantes para la aplicación de las técnicas para corregir problemas de variaciones de tensión son los siguientes:

- ✚ Espacio del Dispositivo.
- ✚ Capacidad.
- ✚ Tiempo de Respuesta.
- ✚ Efectos Secundarios.
- ✚ Costos.

Finalmente se plantea como trabajo futuro, analizar aspectos económicos y referentes a la planeación de un SEP; esto debido a que los costos son importantes a la hora de elegir la técnica.

BIBLIOGRAFIA

- 1- "Voltage Flicker and Voltage Drop", **EP UNIVERSITY**,
<<http://www.epuniversity.org/tech/emi5.html>>
- 2- "Power Quality ISSues-Standards and Guidelines", IEEE Transactions on Industry Applications, vol 32, num. 3, mayo/jun 1996, pp. 625-632, 18 refs.
<<http://jaimevp.tripod.com/Electricidad/calidad.HTM>>
- 3- "Calidad de la Energía"
<http://www.procobre.org/archivos/peru/calidad_de_energia.pdf>
- 4- Ramírez Castillo Diego Omar, "Análisis de colapso de voltaje por el método de continuación de flujos de potencia considerando zonas seguras de operación de generadores sincrónicos", Septiembre 2008, QUITO/ EPN/ 2008.
<<http://bieec.epn.edu.ec:8180/dspace/bitstream/.../4/T10974CAP3.pdf>>
- 5- <<http://www.regentsprep.org/Regents/.../phaseshift.htm>>
- 6- Fernando Perán, Juan Rivier, Tomás Gómez, F. Javier Rubio, "Visión Integral de la Regulación de la Continuidad del Suministro en el nuevo marco Regulatorio del Sector Eléctrico", *Instituto de Investigación Tecnológica, Universidad Pontificia Comillas c/ Santa Cruz de Marcenado n°26, 28015 Madrid* .
<<http://www.iit.upcomillas.es/docs/02.FLPM01.pdf> >
- 7- Quilumba Gudiño, Franklin Lenin, "Análisis de estabilidad de voltaje Capítulo 3",
Mar 2008.
<http://biee.epn.edu.ec:8180/dspace/bitstream/.../5/T11025_CAPITULO_3.pdf>
- 8- "Calidad de Energía Eléctrica"
<<http://www.fuzzycontrolsac.com/articulos/articulo1.htm>>
- 9- Thosifumi Ise.; Yusuke Hayashi.; Kiichiro Tsuji.; "Definitions of Power Quality Levels and the Simplest Approach for Unbundled Power Quality Services"
- 10- Hardi, S.; Daut, I.; "Sensitivity of low voltage consumer equipment to voltage sags," *Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), 2010 4th International*, vol., no., pp.396-401, 23-24 June 2010
- 11- Joorabian, M.; Mirabbasi, D.; Sina, A; "Voltage flicker compensation using STATCOM", *Industrial Electronics and Applications, 2009. ICIEA 2009, 4th IEEE Conference on*, vol., no., pp.2273-2278, 25-27 May 2009

-
- 12-Jurado, F.; Cano, A.; , "Discrimination between transient voltage stability and voltage sag," *Harmonics and Quality of Power, 2002. 10th International Conference on* , vol.2, no., pp. 670- 675 vol.2, 6-9 Oct. 2002
- 13-Marei, M.I.; Salama, M.M.A.; , "Advanced Techniques for Voltage Flicker Mitigation," *International Power Electronics Congress, 10th IEEE* , vol., no., pp.1-5, 16-18 Oct. 2006
- 14-David Llanos Rodríguez, "Sistemas de Corrección de Perturbaciones", 25 Marzo 2003
<http://www.eia.udg.es/.../curso_calidad_de_servicio_electrico_atenuaciones.pdf>
- 15-Babaei, E.; Kangarlu, M.F.; Sabahi, M.; , "Mitigation of Voltage Disturbances Using Dynamic Voltage Restorer Based on Direct Converters," *Power Delivery, IEEE Transactions on* , vol.25, no.4, pp.2676-2683, Oct. 2010
- 16-Ricardo J. Dávalos M.; Juan M. Ramírez A.; "Características Funcionales del DSTATCOM," *CINVESTAV-I.P.N.- UNIDAD GUADALAJARA*.
<<http://www.cigre.org.mx/uploads/media/14-06.PDF>>
- 17-N. Hazah; M. R. Muhamad; P. M. Arsad; "Investigation on the Effectiveness of Dynamic Voltage Restorer for Voltage Sag Mitigation", *Power Delivery, IEEE, The 5th Student Conference on Research and Development*, 11-12 December 2007, Malaysia.
- 18-Chi-Seng Lam; Man-Chung Wong; Ying-Duo Han; , "Voltage Swell and Overvoltage Compensation With Unidirectional Power Flow Controlled Dynamic Voltage Restorer," *Power Delivery, IEEE Transactions on* , vol.23, no.4, pp.2513-2521, Oct. 2008
- 19-Milanovic, J.V.; Yan Zhang; , "Modeling of FACTS Devices for Voltage Sag Mitigation Studies in Large Power Systems," *Power Delivery, IEEE Transactions on* , vol.25, no.4, pp.3044-3052, Oct. 2010
- 20- Masdi, H.; Mariun, N.; Mahmud, S.; Mohamed, A.; Yusuf, S.; , "Design of a prototype D-STATCOM for voltage sag mitigation," *Power and Energy Conference, 2004. PECon 2004. Proceedings. National* , vol., no., pp. 61- 66, 29-30 Nov. 2004
- 21-C. Radhakrishna.; M. Eshwardas.; Gokul Chebiyam; "Impact of Voltage Sags in Practical Power System Networks," *Power and Energy Conference, 2001 IEEE. REASA Power Quality*, "Opciones de Soluciones a Problemas Eléctricos"
<<http://www.reasa.com.mx/.../FTREA00610-Opciones-de-solucion-a-problemas-electricos.pdf>>
- 22- "Supresores de Voltajes Transitorios"
<http://www.mty.itesm.mx/etie/deptos/ie/profesores/.../4_supres.PDF>
- 23-E. Acha; V. G. Agelidis; Anaya Lara; T. J. Miller; "Power Electronic Control in Electrical Systems", *Newnes Power Engineering Series*, First Published 2002.
- 24-Muhammad H. Rashid, "Electrónica de Potencia", *Pearson Educación*, México 2006, Segunda Edición, págs. 94

25-Hui-Yung Chu; Hurng-Liahng Jou; Liang-Chuang Wang; Ching-Lien Huani; “A STEADYSTATE MODEL FOR PARAMETER DESIGN OF A NOVEL BIDIRECTIONAL UPS”, *Department of Electrical Engineering National Chen Kun University Tainan, Taiwan.*

26-Hui-Yung Chu; Hurng-Liahng Jou; Ching-Lien Huang; Liang-Chuang Wang; “A STEADY-STATE MODEL OF BIDIRECTIONAL UPS FOR PARAMETER DESIGN”, *Department of Electrical Engineering National Chen Kung University Tainan, TWIWAN.*

GLOSARIO

Armónicos: Es un componente sinusoidal de una señal.

Armónicos de tensión y corriente: Los armónicos son distorsiones de las ondas sinusoidales de tensión y/o corriente de los sistemas eléctricos, debido al uso de cargas con impedancia no lineal, a materiales ferro-magnéticos, y en general al uso de equipos que necesiten realizar conmutaciones en su operación normal.

Baja-tensión: Este término es usado para describir una variación de larga duración, se refiere a medidas de tensión que tienen valores de 10% por debajo del valor nominal de tensión por un periodo de tiempo mayor a un minuto.

Continuidad: Es cuando un sistema de potencia es capaz de llevar la tensión sin cortes e interrupciones.

Desequilibrios de corriente: Se producen cuando por las tres fases de un sistema trifásico no circulan las mismas intensidades de corriente, este tipo de desequilibrio provoca: sobrecalentamiento en los receptores, en cables de alimentación y protecciones que incluso podrían llegar a disparar.

Desequilibrio de Tensión: Son producidos cuando en un sistema trifásico existen diferencias entre los valores eficaces (rms) de las tensiones tenga o no distribuido el conductor neutro.

Distorsión en la forma de onda: Desviación en estado estable de una onda ideal senoidal a frecuencia del sistema, principalmente caracterizada por el contenido espectral de la desviación.

Duración de la Interrupción: Va desde el instante en que ocurre el cese de potencia hasta que el servicio es restaurado.

Estabilidad de Voltaje: Es la capacidad de un sistema de potencia de mantener un voltaje constante en un estado de equilibrio bajo condiciones normales de operación después de una perturbación.

Flickers: Son destellos a menudo no visibles que se presentan cuando hay una caída de tensión.

Frecuencia: Qué tan a menudo ocurren las interrupciones o fueros de servicio. Es decir, el número de ocasiones en que ocurre una falla durante el periodo de tiempo analizado.

Huecos de Tensión: Es la reducción en el nivel de voltaje de entre un 10% y un 90% de una duración de entre medio ciclo y un minuto.

Interrupción: Cese del servicio a uno o más usuarios y elementos del sistema que se encuentran fuera de servicio. Siendo la potencia utilizada en el momento o no.

Interrupción Momentánea: Un tipo de variación de corta duración. La pérdida completa de tensión (< 0.1 p.u) en una o más fases por un periodo de tiempo entre 30 ciclos y 3 segundos.

Interrupción Sostenida: Un tipo de variación de duración larga. La pérdida completa de tensión (< 0.1 p.u) en una o más fases por un periodo de tiempo mayor a un minuto.

Interrupción Temporal: Un tipo de variación de corta duración. La pérdida completa de tensión (< 0.1 p.u) en una o más fases por un periodo de tiempo entre 30 ciclos y 3 segundos.

Notching: Es una perturbación de polaridad opuesta a la forma de onda normal, de duración de menos de medio ciclo.

Transitorios: Son deformaciones en la forma de onda de tensión.

Tensión Swell: Es un incremento temporal en el valor de tensión de más de 10% de la tensión nominal a frecuencia del sistema, para duraciones entre medio ciclo y un minuto.

Sobre-tensión: Este término es usado para describir una variación de larga duración, se refiere a un valor de tensión mayor al valor nominal hasta un 10% por un periodo de tiempo mayor a un minuto.

Sobretensiones Transitorias: Son variaciones en la forma de onda de tensión, que dan como resultado condiciones de sobretensión durante una fracción de ciclo de la frecuencia fundamental. Las fuentes comunes de estos transitorios son los rayos, operación de los dispositivos de interrupción de los sistemas eléctricos y el arqueado de conexiones flojas o fallas intermitentes.