



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍAS Y APLICADAS

**CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE
POTENCIA**

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**“ANÁLISIS DE LAS PERTURBACIONES (SAGS Y SWELLS) DE LA RED DE
DISTRIBUCIÓN PARA MEJORAR LA CALIDAD DE ENERGÍA EN EL ALIMENTADOR
PRIMARIO “D” EN LA SUBESTACIÓN CHIMBACALLE – QUITO, BASADO EN EL
USO DE COMPENSADORES REACTIVOS”**

**Proyecto de investigación previo a la obtención del Título de Ingeniero Eléctrico en
Sistemas de Potencia**

AUTORES:

Barros Gualotuña Danny Xavier

Caiza Jacome Luis Fernando

TUTOR:

Ing. Rommel Eusebio Suárez Vinueza MSc.

LATACUNGA- ECUADOR

Marzo 2021



DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, **Barros Gualotuña Danny Xavier y Caiza Jacome Luis Fernando**, se declara ser autores del presente proyecto de investigación: **“ANÁLISIS DE LAS PERTURBACIONES (SAGS Y SWELLS) DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN PARA MEJORAR LA CALIDAD DE ENERGÍA EN EL ALIMENTADOR PRIMARIO “D” EN LA SUBESTACIÓN CHIMBACALLE – QUITO, BASADO EN EL USO DE COMPENSADORES REACTIVOS”**, siendo Ing. Suárez Vinuesa Rommel Eusebio tutor del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Latacunga, marzo, 2021

.....

Barros Gualotuña Danny Xavier

C.I. 172175910-6

.....

Caiza Jacome Luis Fernando

C.I. 172404621-2



AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN

En calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título:

“ANÁLISIS DE LAS PERTURBACIONES (SAGS Y SWELLS) DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN PARA MEJORAR LA CALIDAD DE ENERGÍA EN EL ALIMENTADOR PRIMARIO “D” EN LA SUBESTACIÓN CHIMBACALLE – QUITO, BASADO EN EL USO DE COMPENSADORES REACTIVOS”, de los señores **Barros Gualotuña Danny Xavier y Caiza Jacome Luis Fernando**, de la carrera de Ingeniería Eléctrica , considero que dicho Informe Investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyecto que el Consejo Directivo de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, 03 marzo, 2021

.....

Ing. Suárez Vinueza Rommel Eusebio MSc.

C.C. 180416535-3



APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la FACULTAD CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS; por cuanto, el o los postulantes **Barros Gualotuña Danny Xavier y Caiza Jacome Luis Fernando**, con el título de Proyecto de titulación “**ANÁLISIS DE LAS PERTURBACIONES (SAGS Y SWELLS) DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN PARA MEJORAR LA CALIDAD DE ENERGÍA EN EL ALIMENTADOR PRIMARIO “D” EN LA SUBESTACIÓN CHIMBACALLE – QUITO, BASADO EN EL USO DE COMPENSADORES REACTIVOS**”, han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Sustentación de Proyecto.

Por lo antes expuesto, se autoriza realizar los empastados correspondientes, según la normativa institucional.

Latacunga, marzo, 2021

Para constancia firman:

.....

Lector 1 (Presidente)

Ing. Iliana Antonia González Palau PhD.

C.C. 175707065-9

.....

Lector 2

Ing. José Efrén Barbosa Galarza MSc.

C.C. 050142072-3

.....

Lector 3

Ing. Jessica Nataly Castillo Fiallos MSc.

C.C. 060459021-6

AGRADECIMIENTO

Agradecemos principalmente a nuestro señor Dios por habernos permitido llegar hasta este punto y por habernos dado salud, fortaleza y valor para cumplir nuestros objetivos.

Además queremos agradecer a nuestros padres que por sus esfuerzos y sacrificios que han hecho lo posible para que podamos culminar nuestra meta propuesta.

Nuestro más sincero agradecimiento a la Universidad Técnica de Cotopaxi, por habernos abierto las puertas de tan prestigioso templo del saber, cuna de buenos profesionales, así mismo a nuestros distinguidos docentes de quienes nos llevamos sus mejores enseñanzas brindadas porque nos supieron guiar por el buen camino hasta el final..

AUTORES

DEDICATORIA

Este proyecto va dedicado en primera instancia a nuestro señor Dios quien nos ha brindado sabiduría, paciencia, esmero y salud. A nuestros queridos padres que con su apoyo incondicional, sacrificios y esfuerzos para con nosotros, ayuda que nos ha permitido elaborar con éxitos esta importante investigación la cual es la base de nuestras metas futuras

En especial está dedicado a cada uno de nuestros docentes que en el transcurso de todos estos años de estudio y dedicación nos han brindado parte de su sabiduría sin recompensa alguna, con tan solo ese sentimiento de enseñar, por sus sabios consejos constructivos regaños e inigualable paciencia hacia nosotros, por todo esto y muchas cosas más “Inmensamente Gracias”.

AUTORES

ÍNDICE DE CONTENIDO

1.	INFORMACIÓN GENERAL.....	1
2.	RESUMEN DEL PROYECTO.....	4
3.	JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO	4
4.	BENEFICIARIOS.....	5
5.	PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	5
5.1.	Situación Problemática:	5
5.2.	Formulación Del Problema	6
6.	OBJETIVOS	6
6.1.	Objetivo General.....	6
6.2.	Objetivos Específicos.....	6
7.	DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES Y TAREAS	7
8.	FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICA TÉCNICA	8
8.1.	Marco Teórico.....	13
8.1.1.	Redes De Distribución	13
8.1.2.	Concepto De Calidad De Energía Eléctrica	13
8.1.3.	Importancia De La Calidad De Energía Eléctrica	14
8.1.4.	Sistema De Evaluación De Calidad De La Energía	14
8.1.5.	Subestación N° 4 Chimbacalle.....	15
8.1.6.	Descripción Del Área De Servicio	15
8.1.7.	Alimentador Primario.....	16
8.1.8.	Factores a Considerar En El Alimentador Primario.....	16
8.1.8.	Tipos De Cargas	16
8.1.9.	Perturbaciones En Los Sistemas Eléctricos De Potencia	18
8.1.10.	Variaciones De Tensión De Corta Duración Sags y Swells.....	20
8.1.10.1.	Hueco De Tensión (Sag)	21
8.1.10.2.	Elevación De Tensión (Swell)	23
8.1.11.	Equipos Correctores	24
8.1.11.1.	Compensadores Reactivos (Facts)	24

8.1.11.2. SVC (Static Var Compensator).....	25
8.1.12. Software	26
8.1.13. Normativas	27
8.1.13.1. Regulación ARCONEL 005/18	27
8.1.13.2. IEEE Std 519.....	28
9. PREGUNTAS CIENTÍFICAS O HIPÓTESIS.....	29
10. METODOLOGÍAS Y DISEÑO EXPERIMENTAL.....	29
10.1. Tipos de investigación	29
10.2. Métodos de investigación	30
10.3. Técnicas de investigación	30
10.4. Instrumentos de investigación.....	31
11. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	31
11.1. Sistema del Alimentador Primario “D”	31
Área de Concesión EEQ S.A.	31
Descripción de la subestación.....	31
Descripción del alimentador	32
Sistema de distribución del Alimentador “D”	32
11.2. Análisis del Alimentador Primario “D”	32
11.2.1. Análisis y diagnóstico del Alimentador Primario “D”	32
11.2.2. Carga para generación de sag y swell	33
11.2.3. Resultados de eventos	34
11.2.4. Propuesta de compensador reactivo	37
11.2.5. Resultados	38
12. IMPACTOS (TÉCNICOS, SOCIALES, AMBIENTALES O ECONÓMICOS)	45
13. PRESUPUESTO PARA LA PROPUESTA DEL PROYECTO	45
14. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	46
15. BIBLIOGRAFÍA	48

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Perturbaciones en los Sistemas Eléctricos de Potencia.....	19
Tabla 2. Variaciones de tensión de corta duración.....	21
Tabla 3. Límites de variaciones de voltaje	28
Tabla 4. Límites de distorsión de voltaje	29
Tabla 5. Datos generales de la Subestación	31
Tabla 6. Datos del Alimentador Primario “D”	32
Tabla 7. Incremento de carga para Sag	33
Tabla 8. Salida de carga para Swell	34
Tabla 9. Tabla de resultados.....	44
Tabla 10. Calculo financiero de SVC.....	46
Tabla 11. Tabla de cargas del Alimentador Primario “D”	51
Tabla 12. Cálculo de variación de tensión	62
Tabla 13. Cálculo de Presupuesto	63
Tabla 14. Cálculo de Flujo de Ingresos	63
Tabla 15. Cálculo de Flujo de Egresos.....	63
Tabla 16. Cálculo de Flujo de Efectivo Neto	64
Tabla 17. Cálculo de Recuperación inversión.....	64
Tabla 18. Cálculo Financiero	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ondas de Corriente y Voltaje de una carga lineal	17
Figura 2. Distorsión de Voltaje provocada por una carga no lineal.....	17
Figura 3. Hueco de tensión (sag o dip) en la señal de tensión	22
Figura 4. Elevación de tensión (swell) en la señal de tensión.....	24
Figura 5. Diagrama unifilar de un SVC basado en Tiristores	26
Figura 6. Red de distribución del Alimentador Primario D.....	32
Figura 7. Diagrama unifilar del Alimentador.....	33
Figura 8. Grafica de Sag en DigSILENT	34
Figura 9. Grafica onda Sag en Simulink	35
Figura 10. Variación de Potencia Reactiva debido a un Sag.	35
Figura 11. Grafica de Swell en DigSILENT.....	36
Figura 12. Grafica de Swell en Simulink.....	36
Figura 13. Variación de Potencia Reactiva debido a un Swell	37
Figura 14. Ubicación de SVC	37
Figura 15. Mitigación de sag en la fase A mediante un SVC	38
Figura 16. Potencia reactiva de la red al mitigar un sag en la fase A mediante un SVC.....	39
Figura 17. Mitigación de sag en la fase A y B mediante un SVC.....	39
Figura 18. Potencia reactiva de la red al mitigar un sag en la fase A y B mediante un SVC	40
Figura 19. Mitigación de sag en las tres fases mediante un SVC	40
Figura 20. Potencia reactiva de la red al mitigar un sag en las tres fases mediante un SVC.....	41
Figura 21. Mitigación de swell en la fase A mediante un SVC	41
Figura 22. Potencia reactiva de la red al mitigar un swell en la fase A mediante un SVC.....	42
Figura 23. Mitigación de sag en las fases A y B mediante un SVC	42
Figura 24. Potencia reactiva de la red al mitigar un swell en las fases A y B mediante un SVC	43
Figura 25. Mitigación del swell en las tres fases mediante un SVC.....	43
Figura 26. Potencia reactiva de la red al mitigar un swell en las tres fases mediante un SVC..	44
Figura 27. Diagrama de generación de un sag	54
Figura 28. Cuadro de parámetros de Resistencia	54
Figura 29. Cuadro de parámetros de fuente de tensión.....	55
Figura 30. Cuadro de parámetros del Breaker	55

Figura 31. Cuadro parámetros de Stair generator	56
Figura 32. Diagrama de generación de un swell	57
Figura 33. Cuadro de parámetros de resistencia	57
Figura 34. Cuadro de parámetros de fuente de tensión.....	58
Figura 35. Cuadro de parámetros de Breaker.....	58
Figura 36. Cuadro de parámetros de Stair Generator.....	59
Figura 37. Modelo de red conectado un SVC	60
Figura 38. Modelo control manual con Capacitores	61
Figura 39. Cuadro de parámetros de control manual con Capacitores	61

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A. Datos Alimentador	51
ANEXO B. Configuración de evento de Sag en Simulink	54
ANEXO C. Configuración de evento de Swell en Simulink.....	57
ANEXO D. Modelo de red con un compensador SVC en Simulink.....	60
ANEXO E. Accionamiento de control manual	61
ANEXO F. Cálculo del porcentaje de variación de voltaje.....	62
ANEXO G. Calculo financiero del Compensador Reactivo SVC.....	63

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

TITULO: “ANÁLISIS DE LAS PERTURBACIONES (SAGS Y SWELLS) DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN PARA MEJORAR LA CALIDAD DE ENERGÍA EN EL ALIMENTADOR PRIMARIO “D” EN LA SUBESTACIÓN CHIMBACALLE – QUITO, BASADO EN EL USO DE COMPENSADORES REACTIVOS”

Autores: Barros Gualotuña Danny Xavier
Caiza Jacome Luis Fernando

RESUMEN

El presente trabajo de investigación analiza las variaciones de tensión de corta duración denominadas sag y swell presentes en una red de distribución. Estos eventos causan daños a equipos eléctricos y dispositivos electrónicos, el análisis va enfocado al alimentador Primario “D” de la subestación Chimbacalle - Quito, con el propósito de minimizar dichas perturbaciones se realizó el modelado (uso de software) de un tipo de compensador reactivo que permita mantener la tensión en valores aceptables de acuerdo a la normativa de calidad de energía. Para el desarrollo del sistema de datos se empleó el enfoque cualitativo y cuantitativo, la investigación experimental ha permitido utilizar método analítico y deductivo, para el desarrollo del trabajo se hace necesario recopilar información de las magnitudes eléctricas. El uso de compensadores reactivos como el compensador SVC, permite mitigar perturbaciones de tensión mediante inyección o absorción de potencia reactiva. Para el análisis se realizó eventos de variaciones de tensión de corta duración, donde se observó un sag de 0.876 p.u. aumentando carga en la zona 4. Seguidamente se visualizó un swell de 1.217 p.u. mediante la desconexión de carga en la zona 3. Posteriormente se observó que el alimentador tiene niveles permisibles de THD y HD de acuerdo a las normativas. Se pudo concluir que mediante un SVC (compensador estático de potencia reactiva) se realizó la compensación de dichas perturbaciones generadas en el alimentador primario D, el cual permitió mitigar las mismas comprobando su efectividad. Es así que se efectuó el cálculo financiero de dicho compensador reactivo para su factibilidad.

Palabras clave: Subestación, Variaciones, Perturbaciones, Energía, Electricidad, Tensión, Distribución, Reactivos, Software.

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI

ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES SCHOOL

THEME: "ANALYSIS OF PERTURBATIONS (SAGS AND SWELLS) IN THE DISTRIBUTION NETWORK TO IMPROVE POWER QUALITY IN THE PRIMARY FEEDER "D" IN THE CHIMBACALLE - QUITO SUBSTATION, BASED ON THE USE OF REACTIVE COMPENSATORS".

Authors: Barros Gualotuña Danny Xavier
Caiza Jacome Luis Fernando

ABSTRACT

This research work analyzes the short duration voltage variations called sag and swell present in a distribution network devices. These events cause damage to electrical equipment and electronic ones. The analysis is focused on the primary feeder line "D" at Chimbacalle - Quito substation, with the purpose to minimize these perturbations the modeling (use of software) of a type of reactive compensator was carried out that allows the voltage to be maintained at acceptable values according to the power quality regulations. For the development of the data system, the qualitative and quantitative method was used, the experimental research has allowed the use of an analytical and deductive method to the development of the work it was necessary to collect information on electrical magnitudes. The use of reactive compensators such as the SVC compensator, that allows to mitigate voltage perturbations by injection or absorption of reactive power. For the analysis, short duration voltage variation events were performed, where a sag of 0.876 p.u. was observed by increasing the load in zone 4. Then a swell of 1.217 p.u. was visualized by disconnecting the load in zone 3. Next, it was observed that the feeder has permissible levels of THD and HD according to the regulations. It was concluded by means of a SVC (static reactive power compensator) the compensation of such disturbances generated in the primary feeder line D was carried out, which allowed mitigating such disturbances, proving its effectiveness. So, the financial calculation of such reactive compensator was made for its feasibility.

Keywords: Substation, Variations, Disturbances, Energy, Electricity, Voltage, Distribution, Reagents, Software



AVAL DE TRADUCCIÓN

En calidad de Docente del Centro de Idiomas de la Universidad Técnica de Cotopaxi; en forma legal **CERTIFICO** que: La traducción del resumen del proyecto de investigación al Idioma Inglés presentado por el estudiante **BARROS GUALOTUÑA DANNY XAVIER** y **CAIZA JACOME LUIS FERNANDO** egresados de la Carrera de **INGENIERÍA ELÉCTRICA**, de la **FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS**, cuyo título versa **“ANÁLISIS DE LAS PERTURBACIONES (SAGS Y SWELLS) DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN PARA MEJORAR LA CALIDAD DE ENERGÍA EN EL ALIMENTADOR PRIMARIO “D” EN LA SUBESTACIÓN CHIMBACALLE – QUITO, BASADO EN EL USO DE COPESADORES REACTIVOS”**, lo realizó bajo mi supervisión y cumple con una correcta estructura gramatical del idioma.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad y autorizo los peticionarios hacer uso del presente certificado de la manera ética que estimare conveniente.

Latacunga, marzo 2021

Atentamente,

Lic. Marcelo Pacheco
DOCENTE CENTRO DE IDIOMAS
C.C. 0502617350



Universidad
Técnica de
Cotopaxi



Ingeniería
Eléctrica

AVAL DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Quito, 08 de marzo del 2021

PhD. Secundino Marrero

DIRECTOR DE LA CARRERA “INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD”

Presente. –

Quien suscribe, en disposición de Jefe departamento de control de calidad de producto y pérdidas técnicas de la Empresa Eléctrica Quito, **CERTIFICO** que los postulantes **Barros Gualotuña Danny Xavier** con CI: 172175910-6 y **Caiza Jacome Luis Fernando** con CI: 172404621-2, estudiantes de Décimo Ciclo de la Carrera de Ingeniería Eléctrica en Sistemas Eléctricos de Potencia, adquirieron los datos necesarios para la indagación del proyecto de investigación titulado: **“ANÁLISIS DE LAS PERTURBACIONES (SAGS Y SWELLS) DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN PARA MEJORAR LA CALIDAD DE ENERGÍA EN EL ALIMENTADOR PRIMARIO “D” EN LA SUBESTACIÓN CHIMBACALLE – QUITO, BASADO EN EL USO DE COMPENSADORES REACTIVOS”**. Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad y autorizo a los interesados dar uso a este documento como estimen conveniente.

Atentamente;


EMPRESA ELÉCTRICA QUITO S.A. DPTO. CONTROL DE CALIDAD DE PRODUCTO Y PERDIDAS TÉCNICAS
Ing. Santiago Peñafiel
Telf.: 254 2613 • Ext.: 4111

Ing. Santiago Javier Peñafiel Guerrero.

C.I.: 171085418-1

1. INFORMACIÓN GENERAL

Título del Proyecto:

Análisis de las perturbaciones (sags y swells) de la red de distribución para mejorar la calidad de energía en el alimentador primario “D” en la subestación Chimbacalle – Quito, basado en el uso de compensadores reactivos.

Fecha de inicio:

Octubre 2020

Fecha de Finalización:

Marzo 2021

Lugar de ejecución:

Chimbacalle, Quito, Pichincha, Universidad Técnica de Cotopaxi

Facultad que auspicia

Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas

Carrera que auspicia:

Carrera de Ingeniería Eléctrica

Proyecto de investigación vinculado:

Estudio de la calidad de energía eléctrica a nivel de usuario en el primario No 1 de la subestación salcedo (69/13.8 kv) de la empresa eléctrica Cotopaxi.

Equipo de Trabajo:

Ing. Rommel Eusebio Suárez Vinueza

Barros Gualotuña Danny Xavier

Caiza Jacome Luis Fernando

Tutor de titulación:**Nombres y apellidos:** Ing. Rommel Eusebio Suárez Vinuesa**Fecha de Nacimiento:** 20 de agosto de 1986**Estado Civil:** Soltero**Nacionalidad:** Ecuatoriana**Cédula de ciudadanía:** 180416535-3**Dirección:** Ambato, Calle Rio de Janeiro y Bogotá**Teléfono:** 0984535832**Email:** rommel.suarez@utc.edu.ec**Nivel primario:** Escuela Liceo Juan Montalvo Ambato**Nivel secundario:** Instituto Tecnológico Superior Rumiñahui Ambato**Nivel superior:** Escuela Superior Politécnica del Chimborazo Riobamba**Datos personales (Postulante 1)****Nombres y apellidos:** Danny Xavier Barros Gualotuña**Fecha de Nacimiento:** 19 de febrero de 1996**Estado Civil:** Soltero**Nacionalidad:** Ecuatoriana**Cédula de ciudadanía:** 172175910-6**Dirección:** Quito - Guamani – La Venecia 1 - Calle S58B - E3G**Teléfono:** 0995266524**Email:** danny.barros6@utc.edu.ec

Nivel primario: Escuela Particular “ARISTÓTELES”, Quito - Ecuador

Nivel secundario: Unidad Educativa Técnica “VIDA NUEVA”, Quito - Ecuador

Datos personales (Postulante 2)

Nombres y apellidos: Luis Fernando Caiza Jacome

Fecha de Nacimiento: 4 de abril de 1995

Estado Civil: Soltero

Nacionalidad: Ecuatoriana

Cédula de ciudadanía: 172404621-2

Dirección: Machachi, Barrio los Eucaliptos

Teléfono: 0967576707

Email: luis.caiza6212@utc.edu.ec

Nivel primario: Escuela fiscal “Luis Felipe Borja”.

Nivel secundario: Instituto Tecnológico Superior “Aloasi”

Área de Conocimiento:

Calidad de Energía

Sistemas de control

Electrónica de Potencia

Línea de investigación:

Energías alternativas y Renovables, Eficiencia energética y Protección Ambiental.

Sub líneas de investigación de la Carrera:

Conversión y uso racional de la energía eléctrica

2. RESUMEN DEL PROYECTO

A través de la investigación de variaciones de tensión de corta duración denominadas sag y swell que se pueden presentar en una red de distribución. Con el fin de evitar los efectos que causan a equipos eléctricos y dispositivos electrónicos, el análisis se lo realizó al alimentador Primario “D” de la subestación Chimbacalle - Quito, con el propósito de mitigar estas perturbaciones para esto se realizó el modelado mediante un software, además de la comprobación con un método de compensador reactivo comprobando su efectividad.

Para el desarrollo del sistema de datos se empleó un enfoque mixto es decir cualitativo y cuantitativo, la investigación experimental ha permitido utilizar método analítico y deductivo, para el desarrollo del trabajo se hizo necesario recopilar datos necesarios como las magnitudes eléctricas. El uso del compensador reactivo SVC permite mitigar las variaciones de tensión de corta duración mediante inyección o absorción de potencia reactiva.

Para el análisis se realizó eventos de variaciones de tensión de corta duración, donde se observó un sag de 0.876 p.u. aumentando carga en la zona 4. Seguidamente se visualizó un swell de 1.217 p.u. mediante la desconexión de carga en la zona 3. Posteriormente se observó que el alimentador tiene niveles permisibles de THD y HD de acuerdo a las normativas.

Se pudo concluir que las variaciones de tensión sag y swell fueron mitigados mediante un SVC (compensador estático de potencia reactiva) en la simulación del alimentador primario D, comprobando la efectividad del mismo. Es así que se efectuó el cálculo financiero de dicho compensador reactivo para su factibilidad.

3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

En las redes de distribución la calidad de energía es de gran importancia en lo referente al estándar de disposición que debe tener el suministro de energía eléctrica en términos de tensión y frecuencia constante, así como la forma de onda sinusoidal, por lo tanto, es fundamental realizar esta investigación debido a que la misma tiene un amplio campo de estudio en ingeniería eléctrica debido al aumento de la demanda eléctrica y uso de equipos (cargas no lineales) que degradan la forma de onda de tensión.

Mediante un software realizar la modelación del sistema del alimentador Primario “D”, observar el comportamiento actual del mismo y posteriormente de una propuesta de

compensador reactivo, para visualizar la disminución de las variaciones de tensión de corta duración (sag y swell) y de esta forma mejorar la calidad energética.

El análisis busca mitigar las variaciones de tensión de corta duración (sag y swell), lo cual permitirá reducir daños en los equipos eléctricos y los dispositivos electrónicos. Entonces mantener el nivel de tensión constante y la forma de onda sinusoidal, donde los usuarios se beneficiarán con un eficiente servicio de energía eléctrica.

4. BENEFICIARIOS

Directos: Los estudiantes de la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Técnica de Cotopaxi, con ayuda de esta investigación podrán proponer nuevos métodos que relacionen la calidad energética de una red de distribución y puedan dar mejores soluciones a los problemas causados por las variaciones de tensión de corta duración.

Indirectos: La Empresa Eléctrica de distribución con el uso de esta investigación podrán mantener los niveles de tensión constantes y brindar un mejor servicio eléctrico.

5. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

5.1. Situación Problemática:

En un sistema de potencia un swell se conoce como el incremento del voltaje, porque su magnitud se encuentra entre 110% y 180% a 1 p.u y su duración se encuentra entre medio ciclo y un minuto. Este fenómeno es ocasionado por las fases cuando ocurre un cortocircuito monofásico o cuando ha ocurrido un disparo de generación, se plantean deslastres de carga. Además un sag también conocido como dip es distinguido como la disminución de tensión entre el 10% y el 90% durante un tiempo situado entre 10ms y 1s. Las causas son por fallas en la fuente de alimentación del sistema de potencia o del sistema eléctrico propio, así también como cortocircuitos en el sistema de alimentación y del mismo modo por arranque de motores.

La calidad de energía a nivel de distribución considera los tipos de carga industrial, comercial o residencial, por lo tanto contempla aspectos como: la regulación de voltaje, factor de potencia y distorsión armónica. Las variaciones de tensión de corta duración (sag y swell) son provocadas por fallas o disparos en equipos de seccionamiento automático y de protección, donde existen daños por sobrecalentamiento en el aislamiento de los transformadores de potencia.

Un aumento de voltaje (swell) o una disminución de tensión (sag) provocan un mal funcionamiento en los equipos e incluso el daño de los mismos, así como la interrupción de procesos, el apagado del sistema de iluminación, la salida y reinicio de sistemas. Uno de los motivos principales de realizar la investigación es mitigar las variaciones de tensión de corta duración, que se presentan en las Zonas 3 y 4 del modelamiento de eventos en el Alimentador Primario “D” realizado por los autores, así también mantener el nivel de tensión constante y de esta manera prevenir daños en los equipos eléctricos y los dispositivos electrónicos.

5.2. Formulación Del Problema

¿De qué manera los compensadores reactivos pueden mitigar las variaciones de tensión de corta duración (sag y swell) en la red de distribución y de esta manera mejorar la calidad de energía en el alimentador primario “D” de la subestación Chimbacalle – Quito?

6. OBJETIVOS

6.1. Objetivo General

Analizar las variaciones de tensión de corta duración (sag y swell) en la red de distribución basado en el uso de compensadores reactivos para mejorar la calidad de energía en el alimentador primario “D” en la subestación Chimbacalle – Quito, en el periodo 2021.

6.2. Objetivos Específicos

- Efectuar una investigación bibliográfica sobre las variaciones de tensión en la red de distribución del alimentador primario “D” de la subestación Chimbacalle - Quito
- Desarrollar el análisis de datos en la red de distribución del alimentador primario “D” de la subestación Chimbacalle – Quito.
- Modelar el sistema y perturbaciones del alimentador primario “D” de la subestación Chimbacalle - Quito
- Realizar un análisis técnico económico de la propuesta para la verificación de factibilidad.

7. DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES Y TAREAS

Objetivo específico 1	Actividad (tareas)	Resultado	Descripción de la actividad
<ul style="list-style-type: none"> Efectuar una investigación bibliográfica sobre las variaciones de tensión en la red de distribución del alimentador primario “D” de la subestación Chimbacalle - Quito 	<ul style="list-style-type: none"> Investigación de las fuentes bibliográficas y archivos, síntesis de los contenidos. Redacción del marco teórico de la investigación. 	<ul style="list-style-type: none"> Validación del marco teórico con información de fuentes bibliográficas. 	<p>Técnica: Análisis documental de textos, artículos, tesis y normativas.</p> <p>Instrumento: Fuentes de almacenamiento de datos.</p>
Objetivo específico 2	Actividad (tareas)	Resultado	Descripción de la actividad
<ul style="list-style-type: none"> Desarrollar el análisis de datos en la red de distribución del alimentador primario “D” de la subestación Chimbacalle – Quito. 	<ul style="list-style-type: none"> Obtención de datos del alimentador primario “D” de la subestación Chimbacalle - Quito Identificación las normativas relacionadas a la calidad de energía. 	<ul style="list-style-type: none"> Base de datos con mediciones de voltajes y carga del Alimentador Primario “D”. Normas IEEE 519-2014 y Arconel 005-18 	<p>Técnica: Medición, base de datos</p> <p>Instrumento: Analizador de red y Microsoft Office</p>

Objetivo específico 3	Actividad (tareas)	Resultado	Descripción de la actividad
<ul style="list-style-type: none"> Modelar el sistema y perturbaciones del alimentador primario “D” de la subestación Chimbacalle - Quito 	<ul style="list-style-type: none"> Modelación del sistema del Alimentador Primario “D” de la subestación Chimbacalle - Quito mediante un software. Simulación de un caso de estudio. Comprobación de un método de compensación 	<ul style="list-style-type: none"> Demostración del estado actual del sistema Visualización de las variaciones de tensión de corta duración (sag y swell). Determinación de la efectividad del compensador reactivo 	<p>Técnica: base de datos y software</p> <p>Instrumento: Simulator digisilent power factory y Simulink Matlab</p>
Objetivo específico 4	Actividad (tareas)	Resultado	Descripción de la actividad
<ul style="list-style-type: none"> Realizar un análisis técnico económico de la propuesta para la verificación de factibilidad 	<ul style="list-style-type: none"> Adquisición de los costos de materiales y equipos. Efectuar los cálculos financieros 	<ul style="list-style-type: none"> Factibilidad con el uso de indicadores económicos. 	<p>Técnica: Análisis financiero (ecuaciones)</p> <p>Instrumento: hojas de calculo</p>

8. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICA TÉCNICA

La presentación de perturbaciones en la onda de tensión: huecos (sags) y sobretensiones (swells) analizado por Mora en [1] presenta temas donde habla sobre la calidad del servicio eléctrico, las características de las variaciones de tensión, así también como la relación que

existe entre las fallas y los sags. A pesar de ello no hace referencia a la solución para reducir las perturbaciones, aunque es muy útil la información para identificar y saber dónde se encuentra la falla en el sistema.

El estudio preliminar de calidad eléctrica en sistemas de distribución en El Salvador indagado por Portillo y Sánchez en [2] da énfasis a la medición, adquisición y análisis de las perturbaciones de corta y larga duración pero especificando a las variaciones como son los sags y swells. Aunque no da la solución para reducir las variaciones de tensión en el sistema de distribución pero es de gran utilidad para conocer fundamentos teóricos para la investigación.

Las causas y efectos de las perturbaciones y la calidad de onda en el servicio eléctrico donde Meléndez, Herraiz y Colomer en [3] dan a conocer los diferentes tipos de perturbaciones que afectan la calidad de la onda eléctrica, siendo así muy importantes en la industria. Además se da soluciones a las variaciones de tensión teniendo en cuenta los problemas que estos causan en una red de distribución. Pese a que no hace énfasis en los compensadores reactivos, el informe detalla tanto sags como swells que son de gran utilidad para la investigación.

El análisis de huecos de tensión en redes de distribución realizado por Real de la Barrera en [4] explica el comportamiento de los sags en redes de distribución, también permite evaluar el nivel esperado de la disminución de tensión en los nudos del sistema. Así también, el análisis en redes de distribución resulta de especial interés debido que la mayor cantidad de cargas se conectan en este nivel. A pesar de que no hace referencia a las elevaciones de tensión (swells), además de no dar soluciones a las perturbaciones, pero nos ayuda en conocimiento sobre las perturbaciones.

La reducción de la caída de voltaje y mejora de la calidad de energía mediante DVR por Kishore, Kumar, Abirami y George en [5] describe diversos métodos de compensadores, se refiere al análisis mediante la inyección de potencia activa o real para el control de caídas o sobrevoltajes en una determinada zona, también utilizando potencia reactiva en caso de requerir hacerlo, la técnica se refiere a uso en rangos pequeños de caída de tensión,

Una caracterización de huecos de tensión para localización de fallas en sistemas de distribución investigada por Mora y Meléndez en [6] mencionan los huecos de tensión y su asociación con la posible localización del fenómeno que los origina, también trata sobre como localizar el sitio de la falla, así como la identificación de secciones del sistema que son propensos a fallas. Se insiste en que no hace referencia a las elevaciones de tensión (swells) y a los compensadores

reactivos, pero es importante la fundamentación teórica sobre los sags.

La evaluación de los sags en usuarios industriales en un sistema de distribución examinado por Salamanca, Cadena y Ramos en [7] exponen los equipos que se utilizan en las industrias son sensibles a las variaciones en la tensión de suministro conocidas como sags que contribuyen en fallas. Es conveniente adoptar una metodología que ayude a identificar y evaluar los sags en industrias. Con todo no hace referencia a los swells que son las caídas de tensión que puede tener el sistema, pero es útil la información sobre los huecos de tensión en la industria.

Al revisar el Análisis de calidad energética con diseño banco de condensadores para la corrección del factor de potencia en la subestación de la universidad tecnológica de Bolívar sede Ternerá por Crismatt y Barón en [8] describen fundamentos teóricos sobre perturbaciones de la calidad de energía, causas y efectos. De tal manera no hace énfasis en usar compensadores reactivos para disminuir dichas variaciones de tensión de corta duración, pero es de gran utilidad para conocer como se producen las mismas.

En la metodología para el análisis de sags de tensión en redes de distribución con el fin de obtener mapas de hundimientos en tensión para las barras de 220 kV y 115 kV de la ciudad de Bogotá analizada por Romero en [9] hallaron las zonas perturbadoras donde ocurren fallas que ocasionan hundimientos en tensión. Además se desarrolló una herramienta de software de gestión con el fin de administrar y evaluar indicadores de hundimientos en tensión. De cualquier manera no hace referencia a las variaciones de energía cuando se instale más carga en el sistema, pero ayuda en conocimiento sobre los sags.

La calidad del suministro de la energía eléctrica por Electro Industria en [10] menciona su definición así mismo la clasificación de perturbaciones de la red. Además no hace énfasis en el uso de compensadores reactivos para disminuir las mismas. Por lo tanto esta bibliografía es utilizada de manera específica para tener una idea más clara sobre las variaciones de tensión que afectan a un sistema eléctrico.

El análisis de la compensación de hundimientos de tensión en sistemas de distribución usando un variante de compensador reactivos multinivel en ATP/EMTP por Rojas E., Cruz A. y Rojas D. en [11] describen el uso de un compensador estático de distribución el cual puede compensar sags inyectando potencia reactiva al sistema. De tal manera es de gran utilidad porque está haciendo énfasis en una propuesta basada en compensadores reactivos para disminuir los huecos de tensión.

Plataforma de bajo costo para la evaluación de fenómenos electromagnéticos monofásicos de calidad de la energía según el estándar IEEE 1159 por Díaz, Pabón y Contreras en [12] presenta el estudio de fenómenos electromagnéticos relacionados con el proyecto de investigación se realiza un análisis en las perturbaciones de sags y swells, los cuales presentan un incremento en el voltaje y corriente en un instante, pudiendo interferir en equipos que utilizan la onda senoidal como referencia para efectuar una acción.

Una mitigación de sags y swells de una red de distribución IEEE de 30 nodos mediante la ubicación de facts (svc) hecha por Roa y Caicedo en [13] identifican las variaciones de corta duración de tensión sags swells que afectan la calidad de energía en tensión. Para esto se implementó compensadores de reactivos, los cuales ayudan a mejorar los perfiles de tensión previniendo daños en los equipos de los usuarios y de la propia red. Por lo tanto es de gran ayuda ya que tiene implementos y fundamentación teórica requerida para la investigación.

La mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido hecha por Ducuara Valenzuela en [14] identifican las perturbaciones que afectan la calidad de energía en el presente proyecto. Para esto se implementó modelos del sistema de control y simulación de los nodos de estudio. Así mismo es muy útil para conocer información teórica para la indagación. Por lo demás no hace énfasis en cómo se puede disminuir las variaciones de corta duración (sag y swell).

Un análisis armónico de sistemas eléctricos de potencia por Nieto y Alvarado en [15] realiza el estudio del comportamiento, los efectos de corrientes y voltajes armónicos, las fuentes que las originan, sus efectos en los equipos y la red. Así también como las mediciones y estándares para la indagación. Aun así no hace referencia a los compensadores de reactivos y a las variaciones de tensión que se necesita para la investigación.

Un análisis de calidad de energía eléctrica en el nuevo campus de la universidad politécnica salesiana realizada por Holguin y Gomezcoello en [16] encontró soluciones afectivas para corregir los disturbios y variaciones de voltaje para corregir las fallas o problemas que se presenten en el sistema eléctrico. Sin embargo no hace relato a los compensadores de reactivos que se puede instalar para reducir las perturbaciones en la red de distribución.

La resolución inmediata de las deficiencias operativas del sistema existente, así como también las restricciones, las necesidades de carga eléctrica de los clientes impuesta por el Plan de expansión en [17] muestra datos estadísticos, además de un plan de expansión que garantice la

seguridad y confiabilidad del sistema eléctrico. Es por eso que la información adquirida es muy necesaria para la investigación ya que ayuda en el conocimiento del lugar donde se va a realizar dicho análisis de las variaciones de tensión.

La reconfiguración del sistema primario de 6.3 kV de las subestaciones 2,3,4,6,7 y 8 de la Empresa Eléctrica Quito realizada por Cañizares y Moreno en [18] hace énfasis a datos generales de la subestación 4 Chimbacalle, juntamente con la operación de las subestaciones antes mencionadas y sus respectivos primarios teniendo en cuenta los niveles de voltaje. Por supuesto que los datos son de mucha utilidad para continuar con la investigación y llevar a buenos resultados el análisis de las perturbaciones.

La Reconfiguración y optimización de los alimentadores primarios de la subestación obrapia y San Cayetano a la EERSSA por Peña y Ramirez En [19] Los alimentadores primarios poseen sus protecciones para evitar daños o averías de los mismos, también se realiza mediciones de la calidad de energía suministrada por los mismo con el fin de mantenerse dentro de los valores admisibles por lo cual están interconectados a un banco de condensadores.

El análisis de armónicos en las unidades de generación de las centrales hidroeléctricas Illuchi 1 e Illuchi 2 de ELEPCO S.A por Navarro en [20] describe la causas que provocan estas perturbaciones y del mismo modo presenta filtros para mitigar las mismas. Por lo tanto esta bibliografía es de gran utilidad para la guía en el análisis posterior a realizar.

El análisis, diseño e implementación de un restaurador dinámico de voltaje (DVR) basado en un convertidor trifásico PWM con modulación sinusoidal controlado por un DSP por Acosta, Rodríguez y Romero en [21] describe la fundamentación teórica del mismo para mitigar problemas de armónicos. Además presenta el dimensionamiento de un filtro LC, también la implementación de control en lazo cerrado. De tal manera es muy útil la información porque presenta una solución a las variaciones de tensión de corta duración.

Diseño e implementación de un módulo que permita la generación de perturbaciones eléctricas y su corrección, para el análisis y monitoreo utilizando un analizador de red por Cuamacás y Guaman en [22] se refiere a las normas internacionales de calidad de energía los cuales marcan un límite admisible de valores inferiores o superiores al valor nominal de transmisión de una línea, también dando el periodo de tiempo en los cuales estos ocurren con ello clasificar los mismo, las normas intervienen en los parámetros de calidad de energía al momento que una red de distribución entra en funcionamiento.

8.1. Marco Teórico

En la investigación se exponen los conceptos teóricos necesarios para la comprensión del posterior análisis de sag y swell en el alimentador Primario “D” de la subestación Chimbacalle – Quito, e indagar las causas y efectos de dichas perturbaciones en la red de distribución. También definir que es calidad de energía y que es una red de distribución por lo tanto se investigará sobre los compensadores de potencia reactiva.

8.1.1. Redes De Distribución

Las redes de distribución tienen como función principal el suministro de energía desde la subestación de distribución hasta los usuarios finales. Sin embargo, hoy en día se ha alterado la estructura tradicional de las redes de distribución, donde la energía se transmitía desde los centros de producción hasta los consumidores finales de manera unidireccional. Ha surgido un nuevo concepto denominado generación distribuida, que se define como una fuente de pequeña potencia de generación eléctrica, conectada a las redes de distribución en puntos cercanos al consumo [4].

8.1.2. Concepto De Calidad De Energía Eléctrica

En [10] muestra su definición pero la calidad de energía eléctrica en [2] se refiere a los disturbios (eventos) que afectan desfavorablemente al equipo eléctrico y electrónico utilizado por los consumidores de energía o clientes de las distribuidoras de electricidad. Un estudio de calidad debería caracterizar los fenómenos electromagnéticos que tiene mayor influencia sobre la calidad de la electricidad por ejemplo:

- Fenómenos de estado estable
- Interrupciones sostenidas
- Perturbaciones
- Armónicos
- Transitorios

Además un estudio de calidad de energía eléctrica en sistemas de distribución debe incluir: medición, adquisición y análisis de los siguientes fenómenos electromagnéticos:

- Sags/ dips de voltaje
- Swells de voltaje

- Interrupciones de corta duración
- Bajo voltaje de estado estable
- Sobre voltaje de estado estable
- Desbalance de voltaje en sistemas industriales
- Interrupciones de larga duración
- Armónicos de estado estable
- Flicker
- Transitorios

8.1.3. Importancia De La Calidad De Energía Eléctrica

Una gran condición consiste en que una gran parte de las cargas no lineales, responsables de los grandes logros en la industria debido a la automatización, son cargas electrónicas altamente sensibles a las variaciones en el suministro eléctrico que está siendo perturbado por su propia presencia. Los problemas se presentan al existir disturbios de la calidad de energía eléctrica en el suministro [16].

La mayoría de las veces resultan en una detención temporaria de los procesos industriales, a esta interrupción están asociados altos costos, una vez que es la causa de pérdidas significativas de producción y descarte de materiales debido a la necesidad de limpiar las máquinas, reiniciar el proceso en la secuencia que se encontraba y recalibrar las secuencia de producción acorde a especificaciones de proceso requeridas o por concluir con productos defectuosos [16].

8.1.4. Sistema De Evaluación De Calidad De La Energía

En [12] el estándar IEEE 1159-1995 la clasificación de fenómenos electromagnéticos que detallan problemas de la calidad energética, presencia de fenómenos en sistemas eléctricos como: sags, swells, sobretensiones, bajos voltajes, interrupciones, offset de CD (corriente directa), armónicos, Flicker, y variaciones de frecuencia.

Estándares internacionales que definen a la calidad de energía [22]:

- IEEE 1159-1995 el cual define a la calidad de energía como “un conjunto de fenómenos electromagnéticos que caracterizan la tensión y corriente en un instante dado y en un punto determinado de la red eléctrica”.

- IEC 61000-4-30 este estándar “garantiza que los instrumento de calidad de energía se encuentren aptos para la medición de varios parámetros de calidad energética”, además define a la calidad de energía como “ciertas características de la electricidad en un punto dado de una red de energía eléctrica, evaluadas con relación a un conjunto de parámetros técnicos de referencia”.
- EN 50160 es una norma que describe “en el punto de entrega al cliente, las características principales de la tensión suministrada por una red general de distribución en baja tensión y en media tensión en condiciones normales de explotación.

Estos parámetros permiten clasificar las diferentes perturbaciones o fenómenos electromagnéticos que lleguen a aparecer por distintos factores en la red de transmisión o distribución, los mismos se distribuyen dependiendo del tiempo de duración del mismo como la variación en el parámetro de voltaje al cual está referido la medición.

8.1.5. Subestación N° 4 Chimbacalle:

Se menciona la existencia de un transformador de 12/16/20 MVA, 46/6.3 KV, cinco alimentadores primarios, un banco de condensadores reactivos de 3,0 MVAR y un alimentador primario expreso para el trolebus. Sus cargas coincidentes a las 19h30, cuya demanda máxima de esta S/E es: 4-A 240.96 A, 4-B 253.44 A, 4-C 239.04 A, 4-D363.84 A, 4-E 267.84 A y Trole 48.2 A. La demanda analizada al pico del año es de 14.7 MVA, en conclusión la subestación no tiene problemas de sobrecarga, si bien, el primario 4-D está al límite de su carga.

Al 2018 se instaló un segundo transformador de 12/16/20 MVA, 46/6.3, para descargar al transformador existente, aumentar la reserva en MVA, atender el crecimiento de sus cargas y recibir transferencias de otras subestaciones.

Al 2021 su capacidad instalada seria de 40.0 MVA y alcanzaría los 21.4 MVA de demanda, considerando que la tasa de crecimiento promedio anual variaría entre el 3.0% y el 3.5% durante el periodo y no se ha previsto transferencias de carga definitivas de subestaciones vecinas, que puedan comprometer la reserva en su capacidad instalada [17].

8.1.6. Descripción Del Área De Servicio

Ubicada en la calle Alamor y Av. Napo posee 5 alimentadores primarios de servicio a nivel de 6.3 kV, destinados a servicio urbano (4A, 4B, 4C, 4D y 4E) que cubren una superficie

aproximada de 5.9 km². El alimentador primario 4A se encuentra en la zona oriental, llegando a sectores como Pio XII y la Forestal Alta, los alimentadores primarios 4B, 4C y 4E solventan la gran parte del área de influencia, extendiéndose hacia el sur para abastecer con servicio eléctrico a importantes barrios tales como Chiriyacu y La Forestal (4E), La Ferroviaria Media y Alta (4B) y El Camal y la Ferroviaria (4C). El alimentador primario 4D que cubre la mayor superficie de entre los 5 primarios, se encuentra en la zona con una superior densidad de carga, alrededor de los sectores de Santa Ana y Los Dos Puentes [18].

8.1.7. Alimentador Primario

Los alimentadores primarios son los encargados de transportar la energía eléctrica desde la subestación hasta los transformadores de distribución. Los conductores van soportados en poste cuando se trata de instalaciones aéreas y en ductos cuando se trata de instalaciones subterráneas [19].

Los alimentadores primarios en una subestación cumplen la función de transmitir media tensión con el fin de distribuir a los transformadores y alimentadores Secundarios del sistema de distribución, los mismos poseen protecciones para tener una rápida conexión o desconexión según sea el caso para evitar suspender el servicio a los consumidores.

8.1.8. Factores a Considerar En El Alimentador Primario.

Los factores a relacionados son: caída de voltaje, proyección de la carga, perdidas de potencia, costo de disponibilidad del equipo, voltaje de sub-transmisión, longitud de los alimentadores, políticas de la empresa, subestaciones adyacentes y voltajes en los alimentadores [19].

Los alimentadores primarios poseen sus protecciones para evitar daños o averías de los mismos, también se realiza mediciones de la calidad de energía suministrada por los mismo con el fin de mantenerse dentro de los valores admisibles por lo cual están interconectados a un banco de condensadores.

8.1.8. Tipos De Cargas

- **Cargas Lineales**

Esto ocurre cuando en la carga posee elementos como resistencias, inductancias y condensadores de valores fijos con estas características en el sistema se tiene un voltaje sinusoidal, un corriente también sinusoidal y por lo general existe un desfase entre ellos. La

iluminación incandescente y las cargas de calefacción son lineales en naturaleza. Esto es la impedancia de la carga es esencialmente constante independientemente del voltaje aplicado. Como se ve en la Figura 1, en los circuitos AC la corriente se incrementa proporcionalmente al incremento del voltaje y disminuye proporcionalmente del voltaje [16].

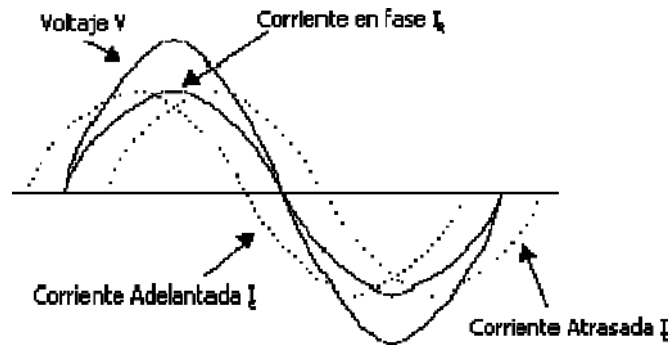


Figura 1. Ondas de Corriente y Voltaje de una carga lineal

Fuente.[16]

- **Cargas No Lineales**

Las cargas no lineales son aquellas que demandan una corriente no senoidal, al paso por la impedancia del sistema provoca una caída de voltaje no senoidal, mostrando una distorsión de voltaje en terminales de la carga, como se ve en la Figura 2. Entre las cargas no lineales más comunes tenemos los convertidores estáticos, dispositivos magnéticos saturados y hornos de arco, [16].

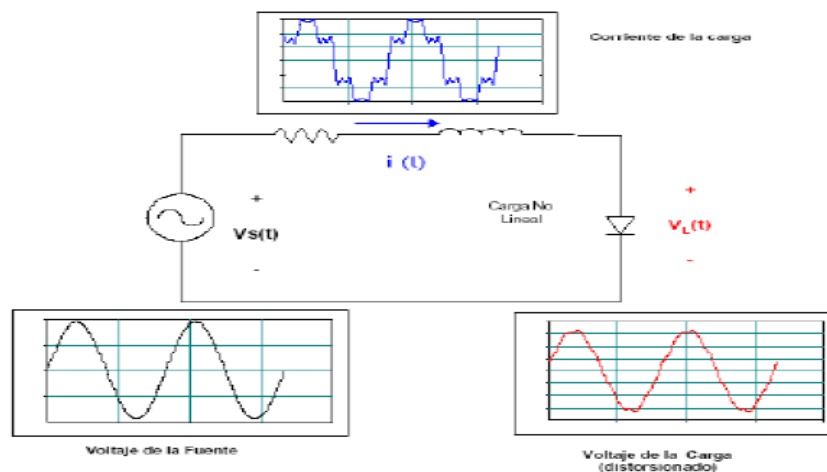


Figura 2. Distorsión de Voltaje provocada por una carga no lineal

Fuente. [16]

Los efectos de las cargas no lineales en los sistemas eléctricos son:

- Distorsión de voltaje en el sistema eléctrico
- Interrupción de procesos productivos
- Altos niveles de voltaje de neutro a tierra
- Sobrecalentamiento en los transformadores y elevados campos magnéticos
- Disminución en la capacidad de los equipos de distribución
- Penalizaciones tarifarias debido al bajo factor de potencia

El uso de las cargas no lineales se ha incrementado considerablemente en los últimos años. Los convertidores estáticos son las cargas no lineales más utilizadas en la industria se las usa para una gran variedad de aplicaciones, tales como fuentes de poder para procesos electroquímicos, variadores de velocidad y fuentes interrumpibles de poder (UPS) [16].

8.1.9. Perturbaciones En Los Sistemas Eléctricos De Potencia

En [16] se detallan las siguientes perturbaciones en los sistemas eléctricos de potencia:

- ❖ **Transitorios:** El término transitorio caracteriza a aquellos eventos indeseables en el sistema que son de naturaleza momentánea, se clasifican en:
 - Transitorio impulsivo.
 - Transitorio oscilatorio.

- ❖ **Variaciones de Corta Duración:** Generalmente se originan por las fallas de un sistema eléctrico, energización de grandes bloques de carga. Dependiendo de la localización de la falla y de las condiciones de operación del sistema, la falla puede ocasionar elevación de tensión (swell), depresión de tensión (sag) o una interrupción. Además se clasifican en:
 - Interrupción.
 - Elevación de tensión (swell).
 - Depresión de tensión (sag).

- ❖ **Variaciones de Larga Duración:** Engloban variaciones del valor eficaz de la tensión durante un tiempo superior a 1 minuto, por lo tanto son consideradas como disturbios de régimen permanente, y se clasifican en:
 - Interrupción sostenida.
 - Subtensión.

- Sobretensión
- ❖ Desequilibrio de Tensión: Definido como la razón entre la componente de secuencia negativa y la componente de secuencia positiva. Una de las principales fuentes de desequilibrio de tensión es la conexión de cargas monofásicas en circuitos trifásicos, fenómenos con bancos de capacitores.
- ❖ Distorsión de la Forma de Onda: La distorsión de la forma de onda es un desvío, en régimen permanente, de la forma de onda de corriente o tensión en relación a la señal sinusoidal pura, es decir que se clasifican en:
- Armónicos.
 - Corte.
 - Ruido.
- ❖ Fluctuación de Tensión (Flicker): Son variaciones sistemáticas del perfil de la tensión o una serie de variaciones aleatorias de la magnitud de la tensión, las cuales normalmente exceden el límite específico de 0,95 a 1,05 p.u.

Tabla 1. Perturbaciones en los Sistemas Eléctricos de Potencia.

CATEGORÍA	DURACIÓN TÍPICA	MAGNITUD TÍPICA DEL VOLTAJE
1. Transitorios		
Transitorio Impulsivo	< 0.5 ciclos	
Transitorio Oscilatorio	< 0.5 ciclos	0 – 8 p.u
2. Corta Duración		
Interrupción	0.5 ciclos – 1 min	< 0.1 p.u
Depresión de Tensión (sag)	0.5 ciclos – 1 min	0.1 – 0.9 p.u
Salto de Tensión (swell)	0.5 ciclos – 1 min	1.1 – 1.8 p.u
3. Larga Duración		
Interrupción Sostenida	> 1 min	0 p.u
Subtensión	> 1 min	0.8 – 0.9 p.u
Sobretensión	> 1 min	1.1 – 1.2 p.u
4. Desequilibrio de Tensión	Estado Estable	0.5 – 2 %
5. Distorsión de la Forma De Onda		
Armónicos	Estado Estable	0 – 20 %
Corte	Estado Estable	
Ruido	Estado Estable	0 – 1 %
6. Fluctuación de Tensión (Flicker)	Intermitente	0.1 – 7 %

Fuente. [16]

Definición De Armónicos

En [20] los armónicos son señales de voltaje o corriente de frecuencias múltiplos enteros de la frecuencia nominal del sistema, cuya amplitud va decreciendo conforme aumenta el múltiplo, ver figura 2.1. Los armónicos más frecuentes en las redes de distribución trifásicas son los impares, es decir que en las instalaciones supervisan los armónicos de orden 1, 3, 5, 7, 11, 13.

La presencia de armónicos muestra una onda de voltaje o corriente distorsionada, es decir que se obtiene una distorsión, esto significa que la distribución de la energía eléctrica sufre perturbaciones y que la calidad energética no es óptima.

Causas de los armónicos

Los dispositivos que generan armónicos se observan presentes en todos los sectores, es decir, industrias, comercios, residencias. Los armónicos se producen por cargas no lineales. Por lo tanto a estas cargas se las considera como fuentes de corrientes armónicas [20].

Fuentes principales de armónicos.

Según la norma IEEE Std 519.1992 los principales generadores de armónicos se los puede ubicar de la siguiente manera:

- Dispositivos del tipo electrónica de potencia.
- Convertidores
- Compensadores estáticos de vares
- Inversores para generación distribuida
- Controladores electrónicos de fase
- Cicloconvertidores
- Fuentes conmutadas de alimentación
- Variador de modulación por ancho de pulso

8.1.10. Variaciones De Tensión De Corta Duración Sags y Swells

En [13] las variaciones de tensión de corta duración se definen como la variación en magnitud de la tensión nominal que pueden estar entre un rango de tiempo de medio ciclo a 1 min y normalmente son causadas por condiciones de falla, corrientes de arranque altas que se requieren para la energización de grandes cargas.

Dependiendo de la ubicación de la falla y las condiciones del sistema, el fallo puede causar aumentos temporales de tensión (swells), huecos de tensión (sags) o una pérdida de la tensión (interrupciones) que se clasifican en instantáneas, momentáneas, temporales y se pueden observar en la tabla 2.

Tabla 2. Variaciones de tensión de corta duración.

Categoría		Duración Típica	Magnitud típica de la tensión
Instantáneas	Sag	0.5-30 ciclos	0.1-0.9 p.u.
	Swell	0.5-30 ciclos	1.1-1.8 p.u.
Momentáneas	Interrupción	0.5 ciclos – 3 seg	<0. P.u.
	Sag	30 ciclos – 3 seg	0.1 – 0.9 p.u.
	Swell	30 ciclos – 3 seg	1.1 – 1.4 p.u.
Temporales	Interrupción	>3 seg – 1 min	<0.1 p.u.
	Sag	>3 seg – 1 min	0.1 – 0.9 p.u.
	Swell	>3 seg – 1 min	1.1 – 1.2 p.u.

Fuente. [13]

8.1.10.1. Hueco De Tensión (Sag)

Es también conocido como sag o dip que es la disminución del valor eficaz de la tensión entre el 0,9 y el 0.1 p.u de la tensión de funcionamiento normal y con una duración desde medio ciclo a un minuto [1]. Como se ve en la Figura 3.

En [7], [9] y [14] este tipo de perturbación puede ser originado bajo los siguientes casos:

- Contacto de las redes eléctricas con árboles.
- Descargas atmosféricas.
- Contacto de animales con partes energizadas del sistema en líneas aéreas (aves) y en líneas subterráneas (roedores).
- Falla simple monofásica a tierra.
- Arranque de motores de inducción.
- Maniobras efectuadas sobre la red eléctrica por parte de la empresa distribuidora.
- Incrementos de corriente de corta duración.
- Conmutación de cargas de gran potencia que se conectan al sistema.
- Fallas en sistemas alimentadores paralelos que se encuentren conectados al mismo barraje.
- Energización o conexión de transformadores.
- Por causa de terceros tal como vandalismo, construcciones y accidentes vehiculares.

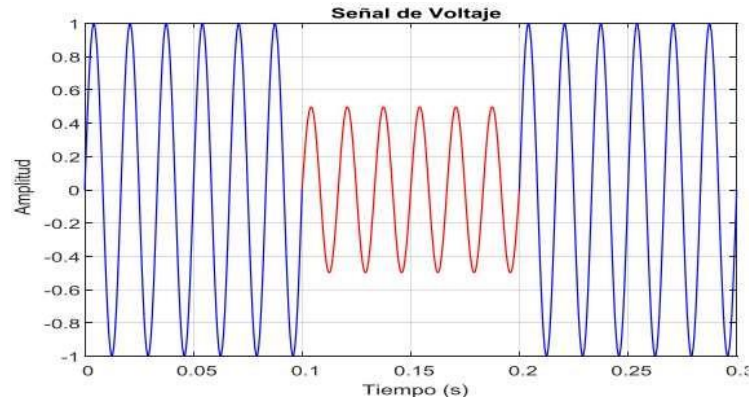


Figura 3. Hueco de tensión (sag o dip) en la señal de tensión

Fuente. [14]

En [13] los huecos de tensión de corta duración son clasificados según en el lugar donde se origine el evento del sistemas eléctrico de potencia (transmisión y distribución). En la parte de transmisión el origen de estos eventos son asociados a fallas eléctricas, mientras que en distribución están asociados a la conexión de cargas pesadas que requieren una corriente alta de arranque. La clasificación de los huecos o sags se ha definido por Bollen, para el estudio del comportamiento de motores de inducción sometidos a huecos de tensión. La definición de cada uno de los tipos de huecos está asociada en un contexto trifásico de la respuesta fasorial (simétricos o asimétricos) y se clasifican en 7 tipos (tipo A a tipo G), los cuales son explicados a continuación:

- Tipo A: Se denominan huecos simétricos debido a la reducción en las 3 fases, y en el cual su ángulo de desfase permanece igual. Este tipo de hueco está asociado más que todo a fallas trifásicas y es uno de los más severos y menos comunes en el sistema eléctrico.
- Tipo B : Este es un hueco de tensión tipo asimétrico producido por una falla monofásica, donde solo se ve afectada una de las fases mientras que las otras dos no muestran disminuciones dentro de los límites por ello no son consideradas huecos de tensión, los mismos con normalmente producidas en transformadores con conexión Δ/Y .
- Tipo C: Se caracteriza por la disminución de la tensión rms en dos fases, y que debido al cambio de ángulo de fases la magnitud de las dos no son iguales. Este tipo de hueco se genera por fallas bifásicas o contribución de conexión de la carga conectada a un transformador.

- Tipo D: Es también producido por una falla bifásica, pero en este tipo de hueco hay disminución de la tensión rms, en donde una de las fases se verá más afectada que las otras.
- Tipo E: Esta es producida por una falla bifásica a tierra donde hay un considerable aumento de la corriente de secuencia cero, produciendo una severa disminución de dos fases, mientras que en la otra fase no existe una disminución importante, y no se produce un desfase entre los ángulos.
- Tipo F: Este tipo de hueco es similar al tipo D, la diferencia radica en que la profundidad del hueco de tensión es menor en la de tipo F de la fase con mayor severidad de afectación.
- Tipo G: Este tipo de hueco es producido por fallas fase-fase a tierra y es similar a la de tipo C de falla bifásica, la diferencia está en que los niveles de profundidad son mayores en los de Tipo G que los de C, también viéndose afectada la tercera fase.

8.1.10.2. Elevación De Tensión (Swell)

Es también conocido como swell que es el incremento del valor eficaz de la tensión entre el 1.1 y el 1.8 p.u de la tensión de funcionamiento normal y con una duración desde medio ciclo a un minuto, Como se ve en la Figura 4, se observa un evento de swell [1].

En [7], [9] y [14] este tipo de evento se puede presentar bajo los siguientes casos:

- Falla simple monofásica a tierra puede causar que las fases no falladas tengan un incremento en su valor de tensión eficaz.
- Descargas atmosféricas.
- Conmutación de cargas de gran potencia que se descuentan del sistema.
- Ajustes incorrectos de los taps de los transformadores.
- Deslastre de carga en el sistema de potencia.

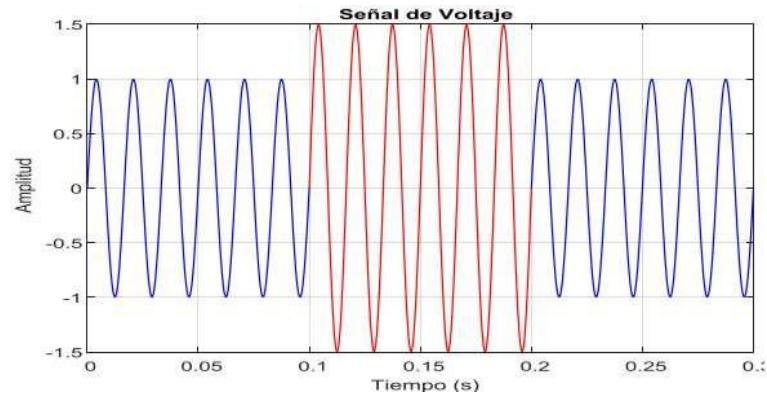


Figura 4. Elevación de tensión (swell) en la señal de tensión.

Fuente. [14]

En [13] la clasificación de los swells se denota con la letra H e I, que al igual que los huecos de tensión, su definición y tipo está asociada a un comportamiento fasorial, tal como se explica a continuación:

- Tipo H: Es visto por el sistema como una falla monofásica a tierra, que según la IEEE1159-2009, en un sistema las tensiones de las fases sin falla serán de 1,73 p.u durante una condición de falla de línea a tierra, mientras la otra fase disminuirá su tensión.
- Tipo I: Es una elevación de tensión que es vista por el sistema como una falla bifásica a tierra, donde las magnitudes de las tres fases aumentan y existe un desfase entre dos de las fases.

8.1.11. Equipos Correctores

En [3], [6], [8], [9], y [15] dan a conocer más causas, efectos y las características de las variaciones de tensión de corta duración (sag y swell). Además en [5], [11] y [21] muestran diferentes maneras de mitigar estas perturbaciones sin embargo se hará énfasis en [13] para la comprobación de un compensador reactivo y se detalla lo siguiente:

8.1.11.1. Compensadores Reactivos (Facts)

Los sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna (FACTS – Flexible AC Transmission System) tienen como función principal aumentar la capacidad de control y transferencia de potencia en sistemas de corriente alterna. La tecnología FACTS utilizada en la conmutación juntamente con electrónica de potencia para comprobar el flujo de potencia [13].

Existe gran variedad de controladores FACTS, estos se clasifican de acuerdo al tipo de conexión que tengan con la red y al tipo de compensación que realizan, sin embargo algunos autores los clasifican de acuerdo a la tecnología de electrónica de potencia utilizada. Se hará referencia a la clasificación de acuerdo al tipo de conexión que tengan con la red y al tipo de compensación que realizan, los cuales se clasifican en:

- **Compensadores serie:** Se emplean para disminuir la reactancia de transferencia de una línea. Permiten entregar la compensación serie reactiva requerida por cada línea, pero también permite el flujo de potencia activa entre las líneas involucradas. Esto se conoce como Controlador de flujo de potencia interlíneas que hace posible balancear el flujo de las potencias activas y reactivas en las líneas de transmisión. Por ejemplo el SSSC (Static Synchronous Series Compensator).
- **Compensadores paralelo (o derivación):** Se inyectan señales de corriente al sistema en el punto de conexión. Suministran potencia reactiva, manteniendo los niveles de tensión dentro de los rangos aceptables. Así tenemos por ejemplo el compensador STATCOM (Static Synchronous Compensator).
- **Compensadores combinados serie-serie:** La función es igual que las compensadoras en serie, solo que esta se hace de manera coordinada entre múltiples líneas.
- **Compensadores combinados serie-paralelo:** Es una combinación de los controladores serie y paralelo controlados coordinadamente como el UPFC (Unified Power Flow Controller).

8.1.11.2. SVC (Static Var Compensator)

Con sus siglas en inglés (Static Var Compensator). Es un compensador estático de potencia reactiva cuya salida se ajusta para intercambiar corriente capacitiva o inductiva o controlar parámetros específicos del sistema de energía eléctrica, es decir la acción básica de un SVC es generar o absorber potencia reactiva rápidamente en respuesta a una señal de control. En gran parte de las aplicaciones, la acción se realiza en función de controlar la tensión de los barrajes y contribuir directamente al equilibrio de potencia reactiva en un punto particular en un sistema eléctrico, por lo tanto el SVC puede mejorar diversos aspectos de la calidad del sistema de potencia por acción de un control adecuado [13].

- **Modelo de Compensador SVC Basado en Tiristores**

En [23] se ve apuntes de la herramienta Simulink Matlab donde se puede encontrar el modelo del SVC y mediante el código “power_svc_1tcr3tsc” acceder al mismo. El SVC consta de un transformador de acoplamiento de 735 kV / 16 kV, 333 MVA, un banco TCR de 109 Mvar y tres bancos TSC de 94 Mvar (TSC1 TSC2 TSC3) conectados en el lado secundario del transformador y se lo puede ver en la Figura 5.

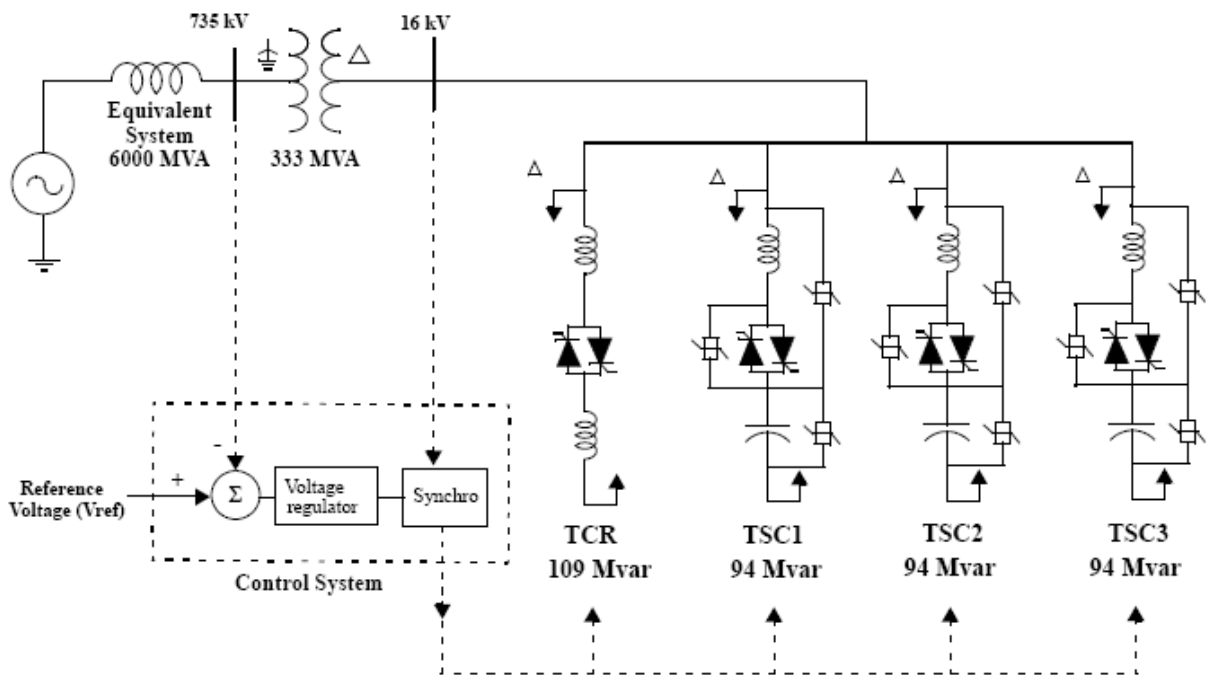


Figura 5. Diagrama unifilar de un SVC basado en Tiristores

Fuente. [23]

8.1.12. Software

PowerFactory DIgSILENT

En [24] el software DIgSILENT ha marcado estándares y tendencias en el campo de modelación, análisis y simulación de sistemas de potencia en más de 25 años. Tiene ventajas establecidas como su integración funcional, su aplicabilidad al modelado de redes de generación, transmisión, distribución e industriales, y el análisis de las interacciones de estas redes.

El software dispone de las siguientes funciones:

- Análisis del Flujo de Carga
- Análisis de Fallas

- Reducción de la Red
- Análisis de la Estabilidad de la Tensión
- Sensitividad del Flujo de Carga
- Análisis de Contingencia
- Cálculo de los Parámetros de la Lí y del Cable Aéreo
- Análisis de la Red de Distribución

Simulink de Matlab

En [23] describe a Simulink como una herramienta interactiva del software Matlab la cual permite simular, modelar y analizar sistemas dinámicos mediante diagramas de bloques, es decir que Simulink posee un editor gráfico, librerías donde se encuentran bloques editables para un entorno de diseño y simulación en diversos campos de la ingeniería.

Algunas características principales:

- Fácil uso
- Ayuda para aplicaciones más grande
- Ayuda computacional
- Acelerador de Simulink
- Generador de Códigos-C en Simulink
- Construcción de modelos

8.1.13. Normativas

8.1.13.1. Regulación ARCONEL 005/18

En [25] la regulación tiene como objetivo es establecer los indicadores, índices y límites de calidad del servicio en una red de distribución, comercialización de energía eléctrica y también se encarga de definir los procedimientos para medición, registro y evaluación que deben ser cumplidos por las empresas eléctricas de distribución y consumidores según corresponda. La evaluación de la calidad de la prestación del servicio de energía eléctrica se efectuará considerando los siguientes índices e indicadores:

- ❖ Calidad del producto.
 - Nivel de voltaje.
 - Perturbaciones rápidas de voltaje (Flicker).

- Distorsión armónica de voltaje.
- Desequilibrio de voltaje.
- ❖ Calidad del servicio técnico
- ❖ Calidad del servicio comercial.

Tabla 3. Límites de variaciones de voltaje

Nivel de Voltaje	Rango admisible (%)
Alto Voltaje (Grupo 1 y 2)	+/-5
Medio Voltaje	+/-6
Bajo Voltaje	+/-8

Fuente: [24]

8.1.13.2. IEEE Std 519

En [26] encontramos las “Recomendaciones Prácticas y Requerimientos para el Control de Armónicas en Sistemas Eléctricos de Potencia”. Existe un efecto combinado de todas las cargas no lineales sobre el sistema de distribución la cual tienen una capacidad limitada para absorber corrientes armónicas. Los operadores de red de energía eléctrica, tienen la responsabilidad de suministrar óptimo nivel de tensión y forma de onda.

La IEEE 519 hace referencia no solo a nivel absoluto de armónicos producido por una fuente individual sino también a su magnitud con respecto a la red de abastecimiento.

Donde existen problemas, a causa de la inyección excesiva de corriente armónica o distorsión de tensión, es obligatorio para el suministrador y el consumidor, resolver estos problemas. Por tal motivo el propósito de esta norma es el recomendar límites en la distorsión armónica de acuerdo básicamente a dos criterios:

- Existe una limitación sobre la cantidad de corriente armónica que un consumidor puede inyectar en la red de distribución eléctrica.
- Se establece una limitación en el nivel de voltaje armónico que una compañía de distribución de electricidad puede suministrar al consumidor.

En la IEEE 519 por un lado se recomiendan los niveles máximos de distorsión armónica en función del valor de la relación de corto circuito (SCR) y el orden de la armónica, por otro lado también identifica niveles totales de distorsión armónica.

El segundo conjunto de parámetros eléctricos establecidos por la norma IEEE 519 se refiere a los límites de distorsión de la tensión. Los límites armónicos de tensión recomendados se basan en niveles lo suficientemente pequeños como para garantizar que el equipo de los suscriptores opere satisfactoriamente. La tabla 4 contempla los límites de distorsión armónica de voltaje según IEEE 519.

Tabla 4. Límites de distorsión de voltaje

Voltaje de barra V en PCC	Individual armónico (%)	Armónico total distorsión THD (%)
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5.0	8.0
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$161 \text{ kV} < V$	1.0	1.5

Fuente: [25]

9. PREGUNTAS CIENTÍFICAS O HIPÓTESIS

¿Será factible el uso de compensadores reactivos, con el fin de mitigar las variaciones de tensión de corta duración Sag y swell y la mejora en la calidad de energía en el alimentador primario “D” en la subestación Chimbacalle – Quito?

10. METODOLOGÍAS Y DISEÑO EXPERIMENTAL

La presente investigación tendrá un enfoque cualitativo y cuantitativo ya que estos se basan en llevar a cabo un estudio para la obtención y el proceso de información que emplean magnitudes numéricas, técnicas y/o estadísticas, entonces se debe iniciar desde casos concretos para llegar a una descripción general o para verificar una hipótesis, así también como para llevar a cabo su análisis, pero a su vez siempre enfocándonos en una relación de causa y efecto. Por lo tanto se obtendrá una base de datos por medio de una simulación del alimentador Primario “D” mediante un software, conjuntamente con un caso de estudio de una propuesta de compensador reactivo y posteriormente hacer el respectivo análisis donde se examinará la mitigación de las variaciones de corta duración sag y swell, para concluir se podrá observar una eficiencia en la calidad de energía.

10.1. Tipos de investigación

Investigación Descriptiva:

Para la investigación se utiliza este alcance, ya que los datos obtenidos antes y después de introducir un compensador reactivo mediante un caso de estudio en la simulación del

alimentador Primario “D” estos datos son útiles para poder realizar el análisis pertinente.

Investigación Explicativa:

Para este proyecto se emplea este alcance, el cual permite analizar los resultados que se obtienen mediante un caso de estudio en la simulación del alimentador Primario “D” para observar si se ha suscitado una disminución de las variaciones de corta duración sag y swell.

Investigación Experimental:

Se escoge este alcance ya que se realizará la simulación de un caso de estudio del alimentador Primario “D” en un software, el mismo que permite simular un método de compensador reactivo.

10.2. Métodos de investigación

Método Analítico:

Con la ayuda de este método se realizará un análisis de la simulación de un caso de estudio del alimentador Primario “D”, la cual genera resultados que permiten conocer el comportamiento de un compensador reactivo.

Método Deductivo:

Describe la investigación que se llevará a cabo desde lo general a lo particular, esto se refiere a que se realizará un análisis que parta de conocer lo que ocasionan las variaciones de tensión de corta duración en un sistema eléctrico de potencia hacia el alimentador Primario “D” de la subestación.

10.3. Técnicas de investigación

Observación Cuantitativa:

No es participativa, es decir que no hay interacción entre el observador y los objetos de estudio, por lo tanto se utiliza esta técnica para realizar un análisis de los datos obtenidos antes y después de introducir un compensador reactivo en un caso de estudio del alimentador Primario “D” mediante la simulación en un software.

10.4. Instrumentos de investigación

Observación Estructurada:

Se hace observaciones cuidadosas de uno o más comportamientos específicos, es decir que se utiliza este instrumento para apreciar la disminución de las variaciones de tensión de corta duración (sag y swell) en un caso de estudio del alimentador Primario “D”.

11. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

11.1. Sistema del Alimentador Primario “D”

Área de Concesión EEQ S.A.

La Empresa Eléctrica Quito S.A. como una Empresa de Distribución y Comercialización tiene su área de concesión (reconocida por los organismos de Regulación) comprendida por la provincia de Pichincha con los cantones: Quito, Mejía, Rumiñahui, Cayambe, San miguel de los bancos, Puerto Quito, Pedro Vicente Maldonado, Por razones técnico-económicas la provincia de Napo: Quijos, Chaco, la provincia de Imbabura: García Moreno y la provincia de Cotopaxi: Clirsen (zona norte del cantón Latacunga, sector Chasqui).

Descripción de la subestación

La subestación Chimbacalle posee 5 alimentadores primarios (A, B, C, D y E), los mismos suministran de energía eléctrica a sur de la ciudad de Quito. En la tabla 5, se muestran datos de la misma.

Tabla 5. Datos generales de la Subestación

UBICACIÓN	CHIMBACALLE
NIVEL DE TENSIÓN	46 KV
TIPO	TRANSFORMACIÓN- REDUCTORA
ALIMENTADORES PRIMARIOS	5
TRANSFORMADOR	
MARCA	NISSIN ELECTRIC
CAPACIDAD	12/16/20 MVA
TIPO DE REFRIGERACION	OA/FA/FOA
RELACION	46/6.3 KV

Descripción del alimentador

El alimentador primario “D” con un nivel de voltaje nominal 6.3 kV, tienen una topología tipo radial, la longitud de la red es aproximadamente de 12 Km, está ubicado en el sector sur de la ciudad de Quito, recorre la Av. Rodrigo de Chávez, entre los sectores de Chimbacalle, Santa Ana y los Dos Puentes. En la tabla 6, se muestran datos del mismo y de igual manera los datos necesarios otorgados por la Empresa Eléctrica Quito S.A. ver anexo A.

Tabla 6. Datos del Alimentador Primario “D”

CALIBRE DEL CONDUCTOR	3X500 MCM
CAPACIDAD DE CONDUCCION	480 A
TC	600/5
FACTOR DE POTENCIA	0.95
TENSIÓN	6.3 KV

Sistema de distribución del Alimentador “D”

El sistema de análisis es del Alimentador Primario “D” de la subestación Chimbacalle de Quito. De donde se obtuvieron los respectivos datos de los elementos involucrados para el desarrollo de la modelación del mismo. En la figura 6 se muestra la red de distribución utilizada para el análisis.



Figura 6. Red de distribución del Alimentador Primario D

Fuente: E.E.Q

11.2. Análisis del Alimentador Primario “D”

11.2.1. Análisis y diagnóstico del Alimentador Primario “D”

Mediante el software DigSILENT PowerFactory se realizó el modelamiento del sistema del Alimentador Primario “D” teniendo en cuenta los valores técnicos anteriormente mencionados

y de igual manera la tabla de cargas otorgada por la Empresa Eléctrica Quito S.A. ver anexo A.

Durante el análisis de la simulación del alimentador primario “D” se determinó que presenta condiciones para realizar eventos de variación de tensión de corta duración sag y swell mediante variaciones de cargas, es por esto que se dividió la red en 9 zonas hechas por la concentración de carga que presenta el mismo, en la figura 7 se muestra el diagrama.

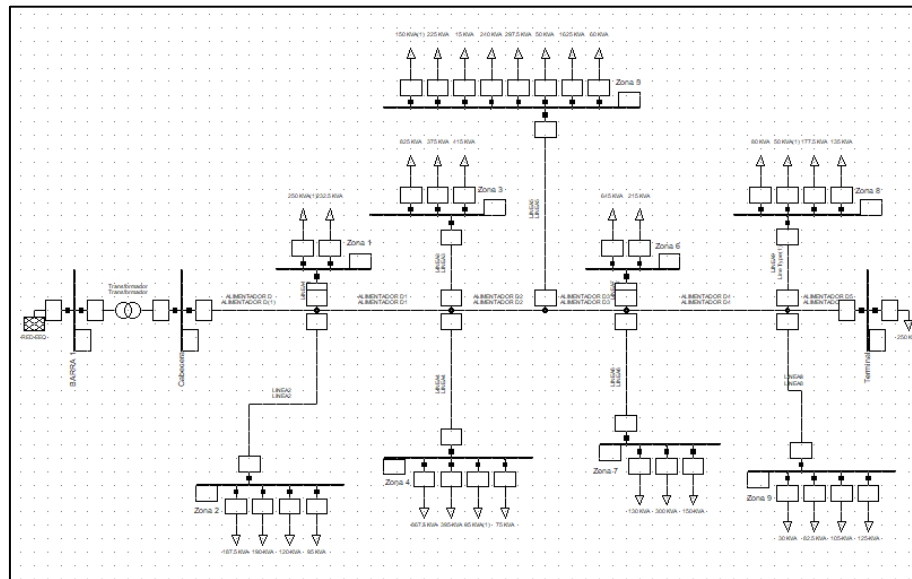


Figura 7. Diagrama unifilar del Alimentador

11.2.2. Carga para generación de sag y swell

Para generar sag o swell, en la zona 3 y 4 respectivamente, se realiza eventos de entrada y salida de carga provocando que la tensión aumente o disminuya, según sea el caso.

Tabla 7. Incremento de carga para Sag

MW	MVAR	%MW	MW	%MVAR	MVAR	SAG (p.u.)
0.37525	0.1	300	1.2	50	0.1	0.876
0.07125	0.0	300	0.2	50	0	
0.82413	0.3	300	2.6	50	0.3	
0.09025	0.0	300	0.3	50	0	
0.25 (20)	0.3					

En la tabla 7 se muestran los incrementos de cargas que se realizó para visualizar un Sag a un valor mínimo de 0.876 p.u. en 0.1 segundos, realizado con la herramienta de incremento porcentual en las cargas y adicionalmente una carga industrial.

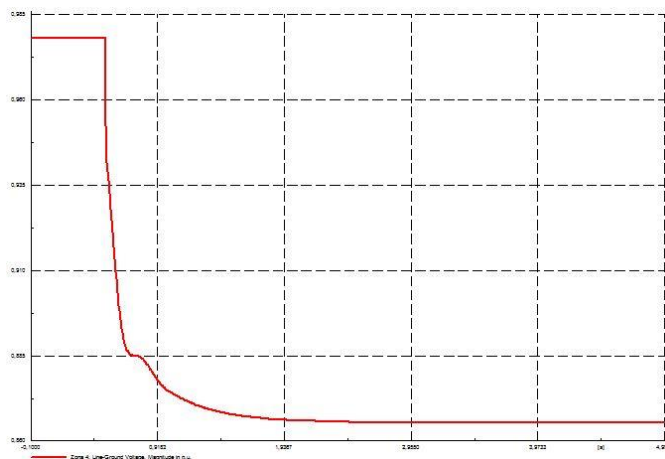
Tabla 8. Salida de carga para Swell

MW	MVAR	SWELL (p.u.)
0.25 (20)	0.3	1.217
0.35625	0.1	

En la tabla 8 se muestran la salida de cargas que se realizó para visualizar un Swell a un valor máximo de 1.217 p.u. en 0.1 segundos, realizado con la herramienta de desconexión de cargas y adicionalmente la salida de una carga industrial.

11.2.3. Resultados de eventos

Estos datos son importantes para analizar el comportamiento de la red. Las siguientes figuras muestran las variaciones de tensión de corta duración sag y swell en las zonas seleccionadas.

**Figura 8.** Grafica de Sag en DigSILENT

En la figura 8 se observa los datos en DigSILENT realizados en la zona 3 que muestra la presencia de un sag al incrementar carga, la caída de voltaje debido a la perturbación es de 0.866 p.u. en 0.1 segundos.

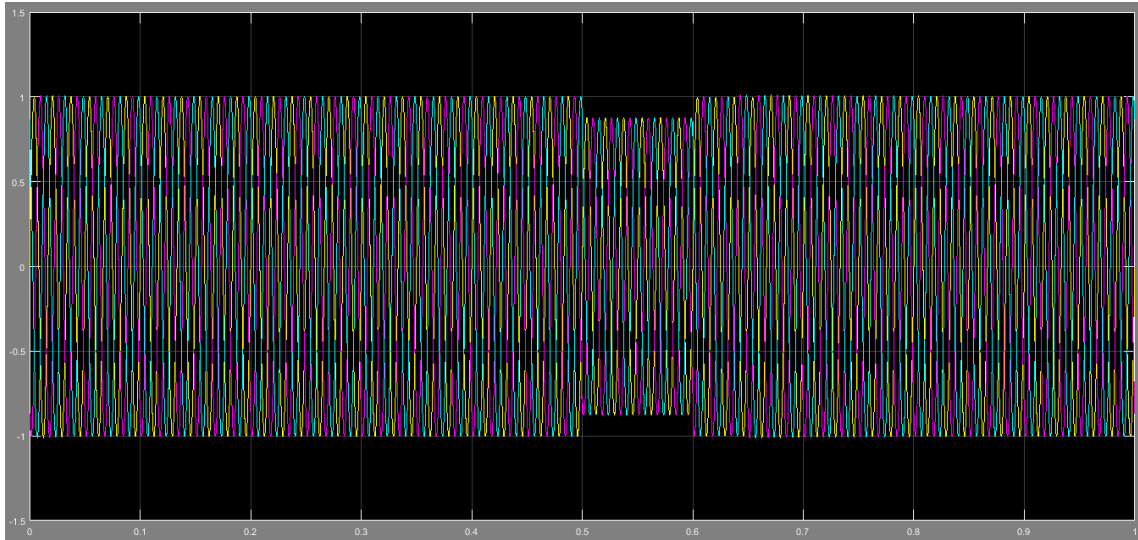


Figura 9. Grafica onda Sag en Simulink

En la figura 9, se observa la forma de onda en Simulink realizado con los valores obtenidos del software DigSILENT, que muestra la presencia de un sag al incrementar carga, la caída de voltaje debido a la perturbación es de 0.866 p.u. en 0.1 segundos y en la Figura 10 se observa la disminución de la potencia reactiva a valores mínimo de caída de -700 Mvar.

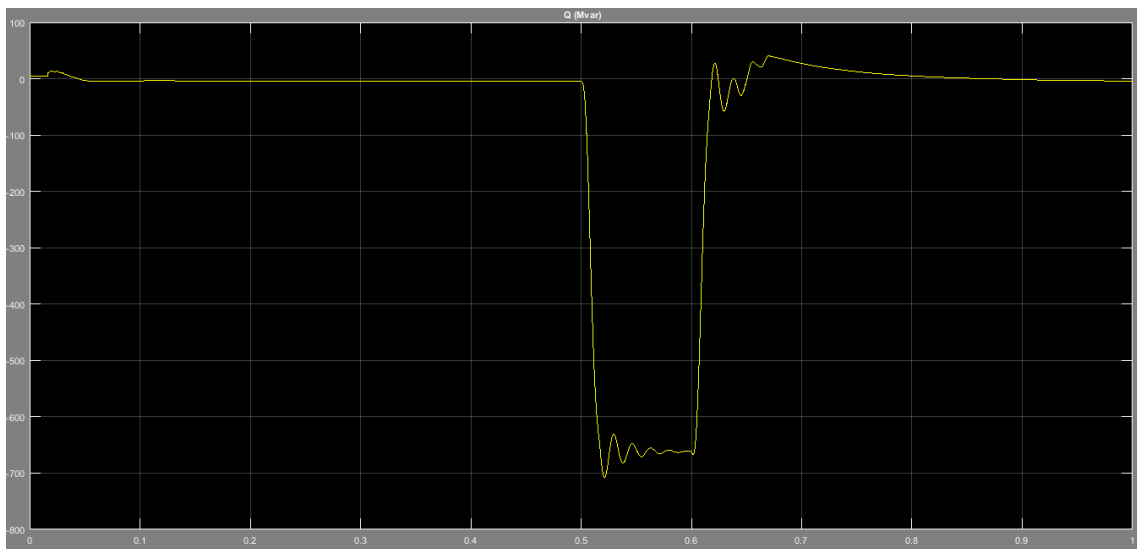


Figura 10. Variación de Potencia Reactiva debido a un Sag.

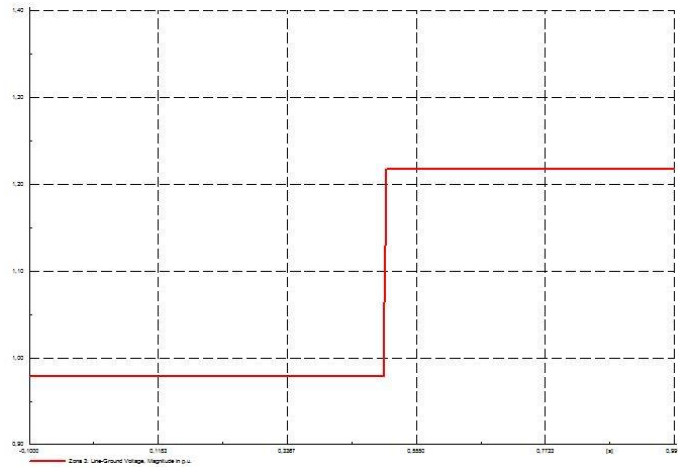


Figura 11. Grafica de Swell en DigSILENT

En la figura 11, se observa los datos en DigSILENT en la zona 4 que muestra la presencia de un swell al disminuir carga, la elevación de voltaje debido a la perturbación es de 1.217 p.u. en 0.1 segundos

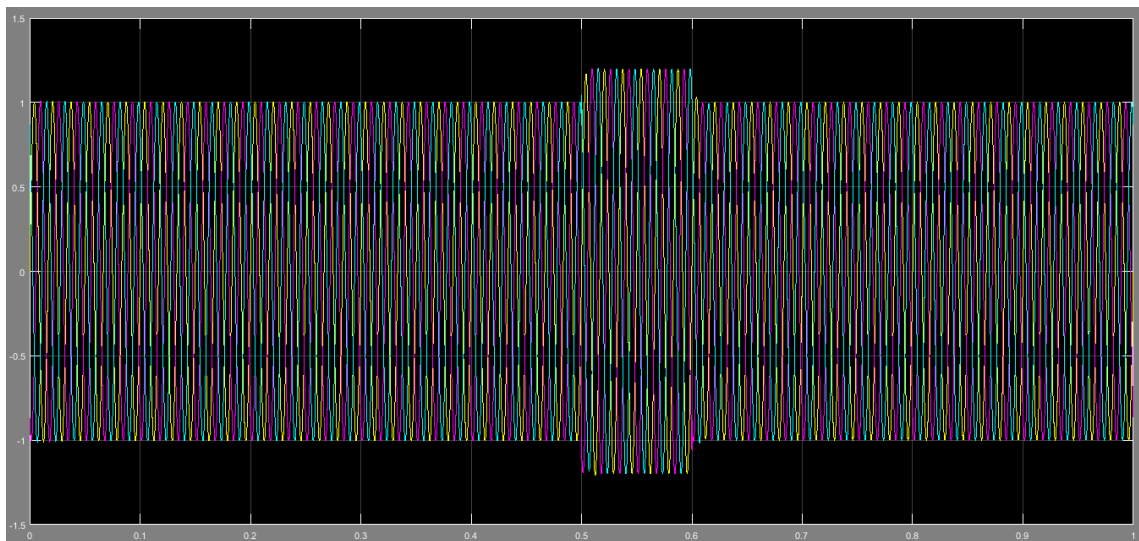


Figura 12. Grafica de Swell en Simulink

En la figura 12, se observa la forma de onda en Simulink realizado con los valores obtenidos del software DigSILENT, que muestra la presencia de un swell al disminuir carga, la elevación de voltaje debido a la perturbación es de 1.217 p.u. en 0.1 segundos. Y en la figura 13 se observa un aumento de la potencia reactiva a valor pico de 1450 Mvar.

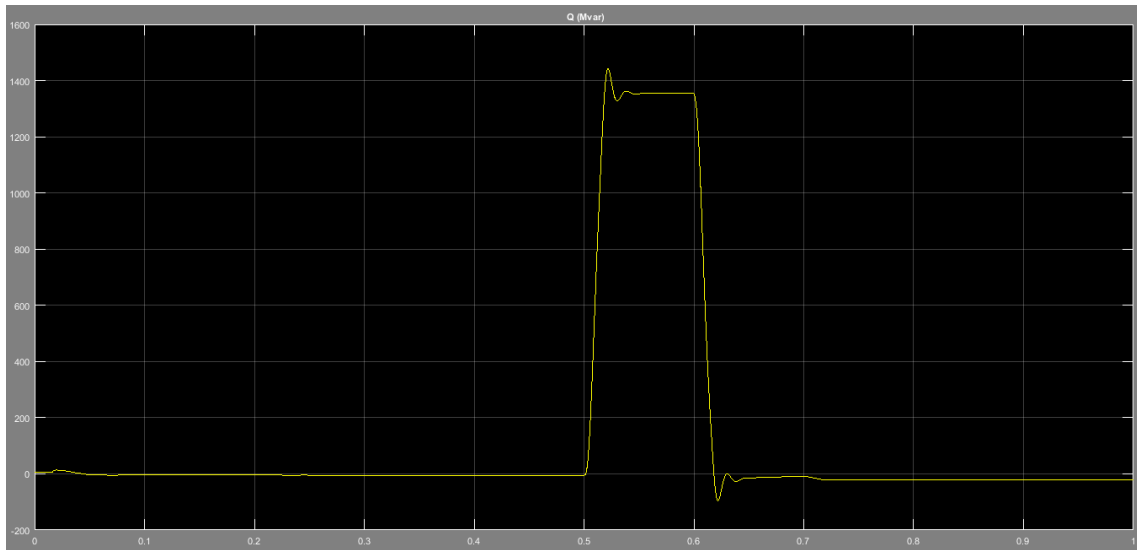


Figura 13. Variación de Potencia Reactiva debido a un Swell

11.2.4. Propuesta de compensador reactivo

Para el modelamiento del compensador reactivo se lo realizó mediante la herramienta Simulink de Matlab, la misma que permite simular el comportamiento de sistemas dinámicos, se tomó los datos de los eventos de sag y swell obtenidos en el software DigSILENT y mediante Simulink se modeló el sistema en estudio, además se utilizó la librería de los compensadores SVC.

Compensador Reactivo SVC (compensador Estático de Potencia Reactiva)

La simulación del SVC se realiza mediante la librería de Simulink -Matlab, ejecutando el código “power_svc_1tcr3tsc” en la ventana de comando de Matlab que contiene el modelo del mismo que se observa en el Anexo D, en la figura 13 muestra la ubicación del dispositivo SVC en el inicio del alimentador.

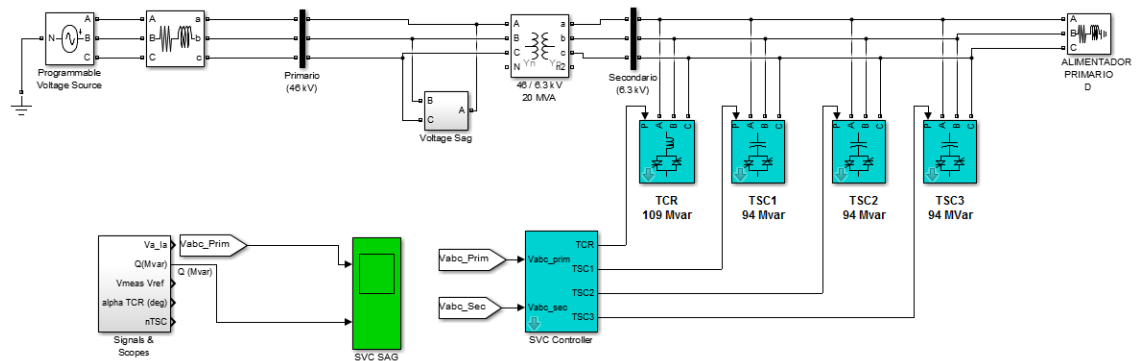


Figura 14. Ubicación de SVC

11.2.5. Resultados

Al momento de realizar la simulación del Compensador Reactivo para mitigar las variaciones tensión de corta duración sag y swell mediante la herramienta Simulink de Matlab, se encontró inconvenientes con el sistema de control del compensador reactivo a utilizar, por lo tanto se realizó una alternativa de accionamiento manual (ver Anexo E) para ayudar a comprobar su correcto funcionamiento. Teniendo una respuesta favorable con el SVC.

Resultados Sag con SVC

A continuación se muestran las gráficas que se obtuvieron al momento de utilizar el compensador reactivo SVC para mitigar un sag, de tal manera que mediante la alternativa de accionamiento manual ver anexo E se observó la compensación potencia reactiva con ello regresando el voltaje a valores dentro del rango permisible.

Se observa la mitigación de un sag mediante un compensador SVC con la alternativa del accionamiento manual en la fase A. En la Figura 15 se muestra la variación de la onda de tensión y en la Figura 16 se muestra la compensación de la potencia reactiva en el sistema.

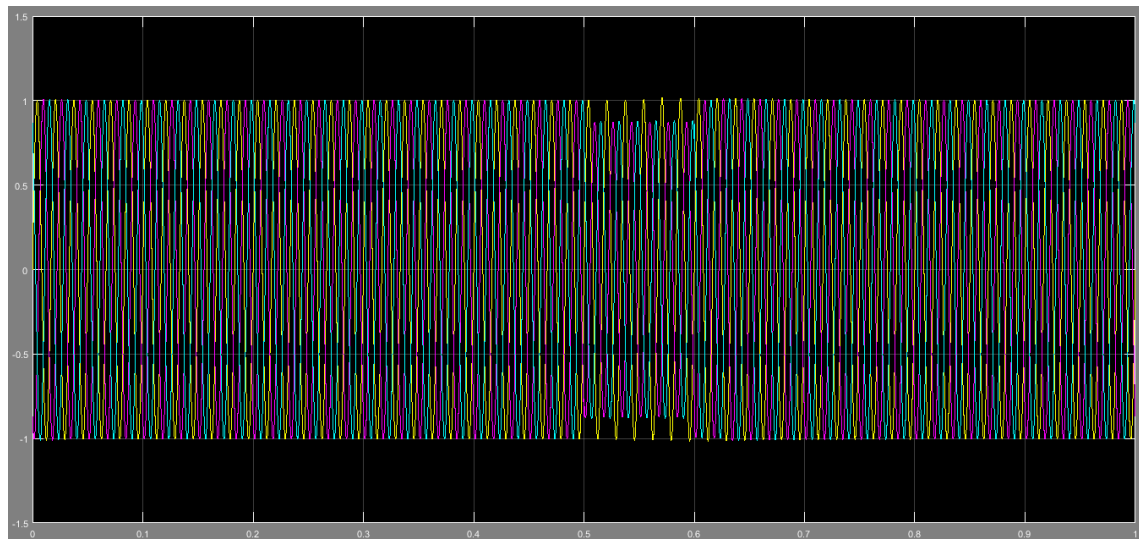


Figura 15. Mitigación de sag en la fase A mediante un SVC

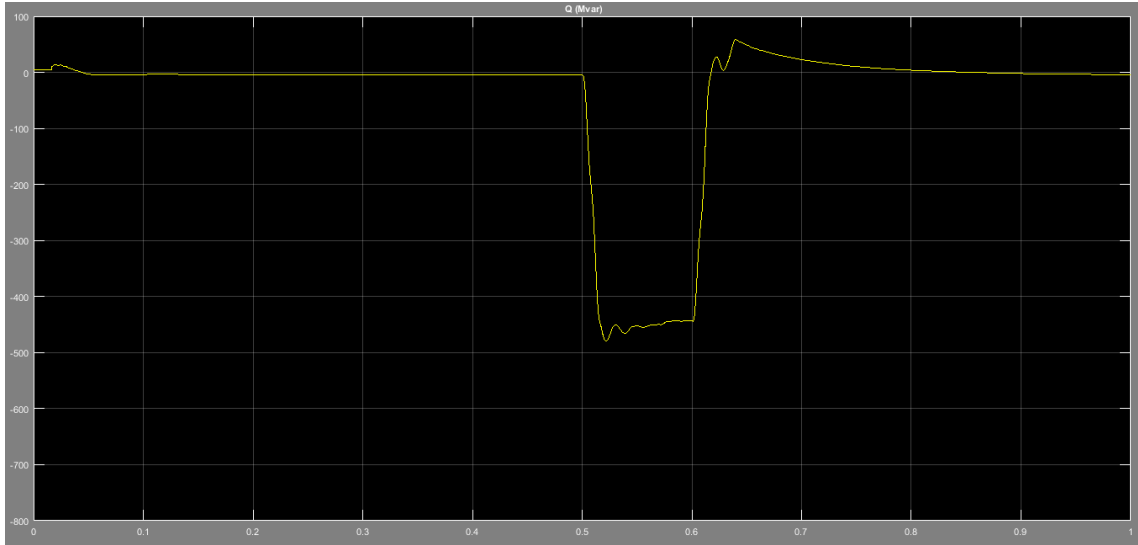


Figura 16. Potencia reactiva de la red al mitigar un sag en la fase A mediante un SVC

Se observa la mitigación de un sag mediante un compensador SVC con la alternativa del accionamiento manual en las fases A y B. En la Figura 17 se muestra la variación de la onda de tensión y en la Figura 18 se muestra la compensación de la potencia reactiva en el sistema.

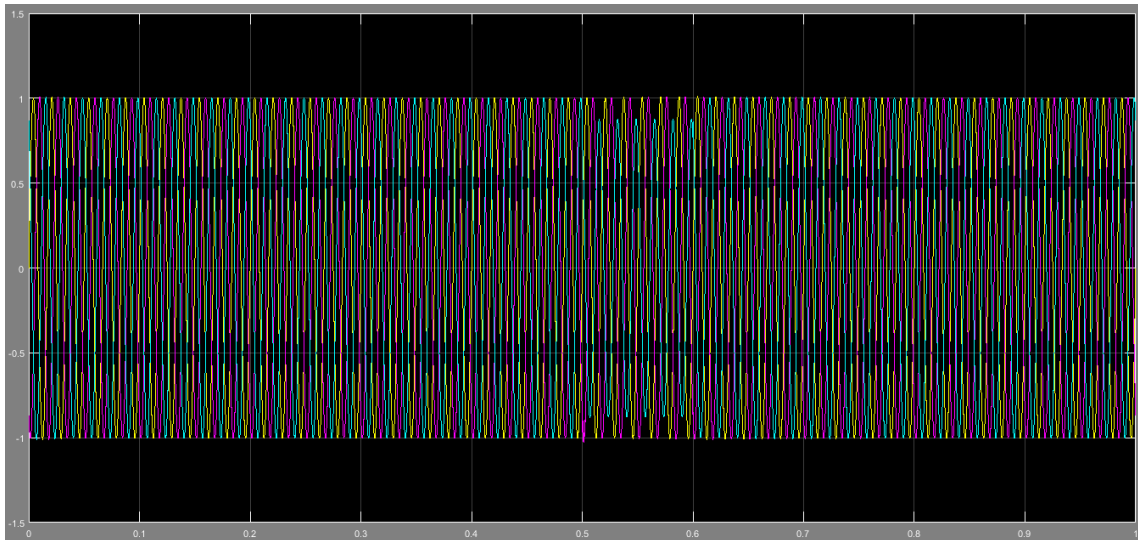


Figura 17. Mitigación de sag en la fase A y B mediante un SVC

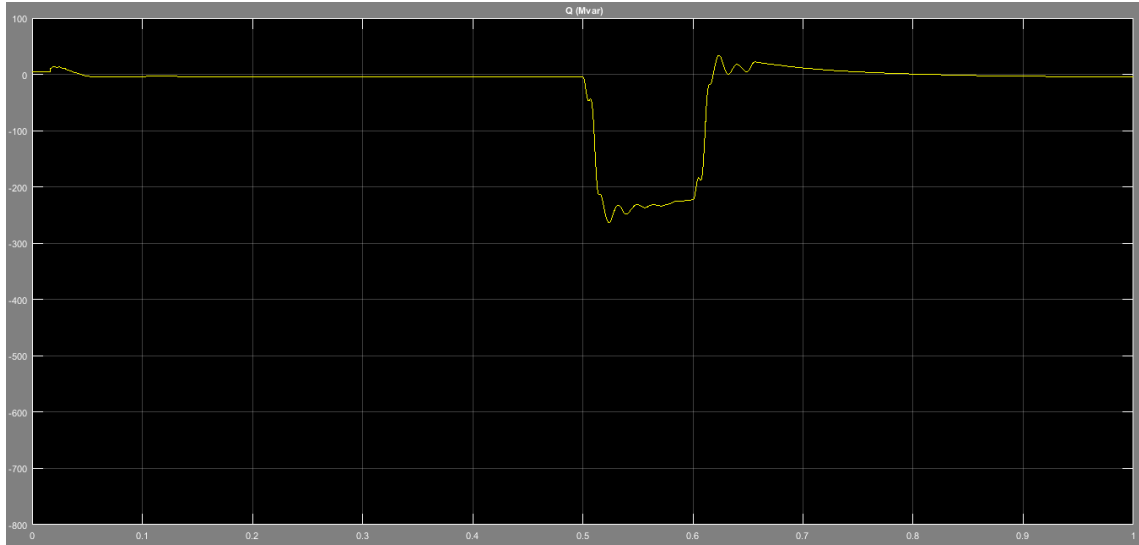


Figura 18. Potencia reactiva de la red al mitigar un sag en la fase A y B mediante un SVC

Se observa la mitigación de un sag mediante un compensador SVC con la alternativa del accionamiento manual en las tres fases. En la Figura 19 se muestra la variación de la onda de tensión y en la Figura 20 se muestra la compensación de la potencia reactiva en el sistema.

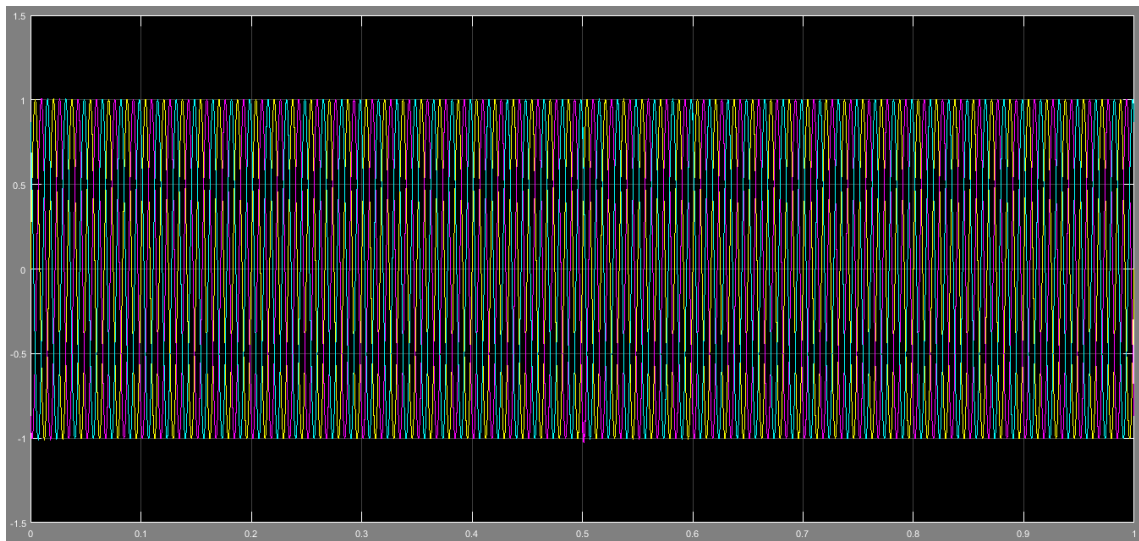


Figura 19. Mitigación de sag en las tres fases mediante un SVC

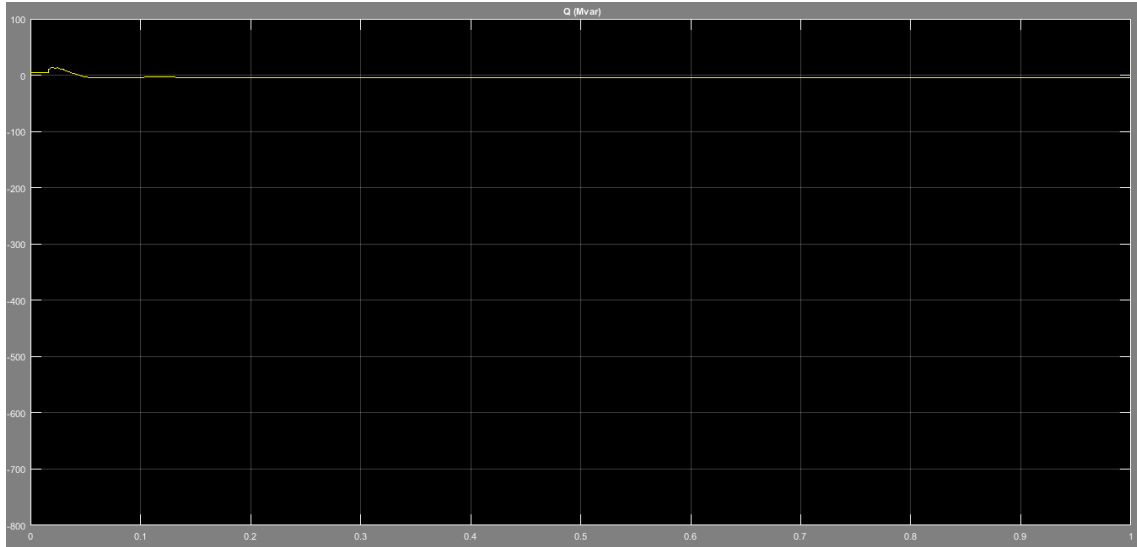


Figura 20. Potencia reactiva de la red al mitigar un sag en las tres fases mediante un SVC

Resultados Swell con SVC

Se observa la mitigación de un swell mediante un compensador SVC con la alternativa del accionamiento manual en las fases A. En la Figura 21 se muestra la elevación de la onda de tensión y en la Figura 22 se muestra la compensación de la potencia reactiva en el sistema.

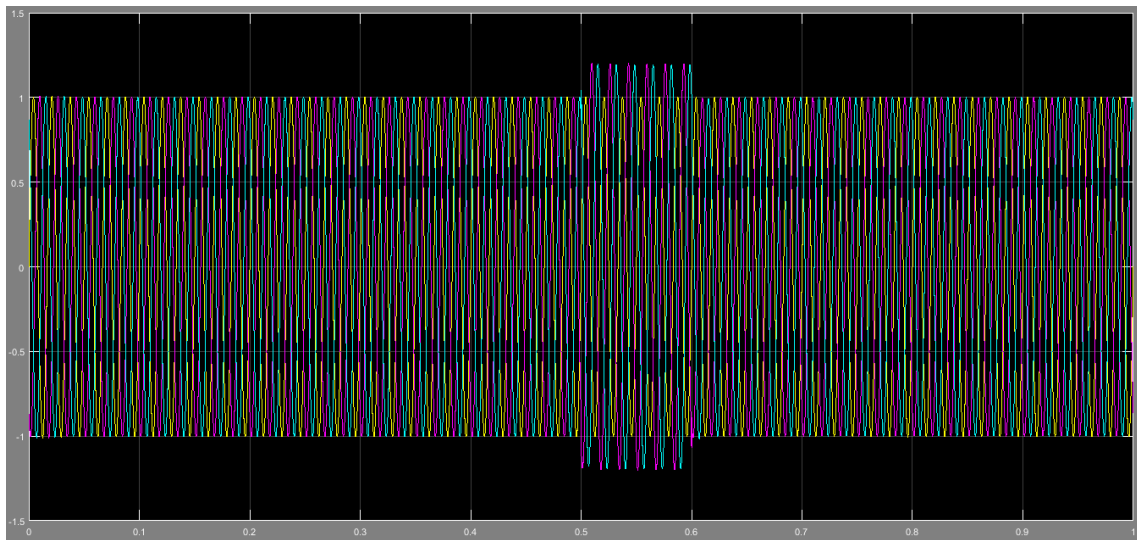


Figura 21. Mitigación de swell en la fase A mediante un SVC

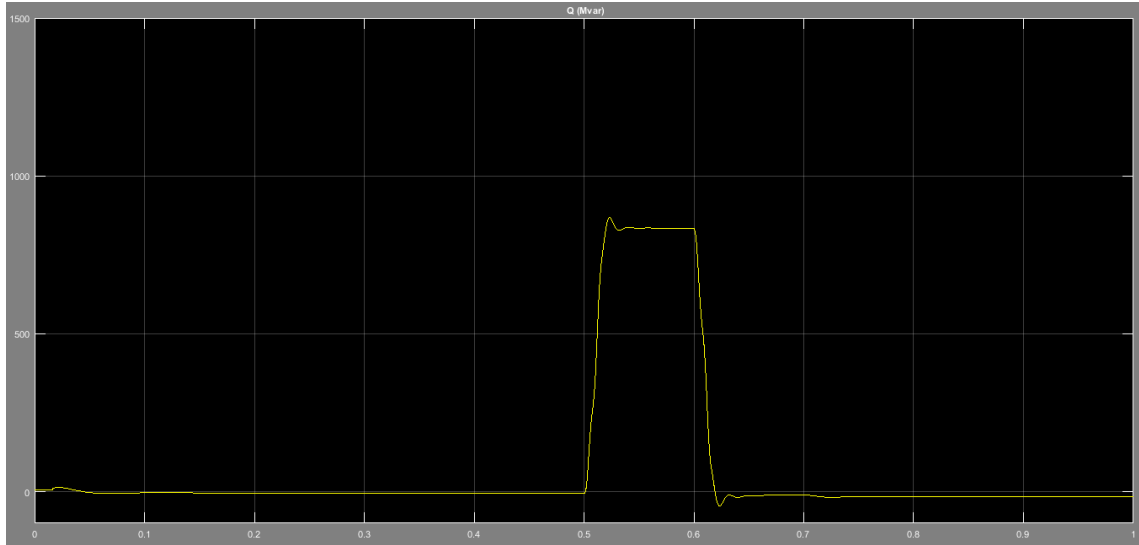


Figura 22. Potencia reactiva de la red al mitigar un swell en la fase A mediante un SVC

Se observa la mitigación de un swell mediante un compensador SVC con la alternativa del accionamiento manual en las fases A y B. En la Figura 23 se muestra la elevación de la onda de tensión y en la Figura 24 se muestra la compensación de la potencia reactiva en el sistema.

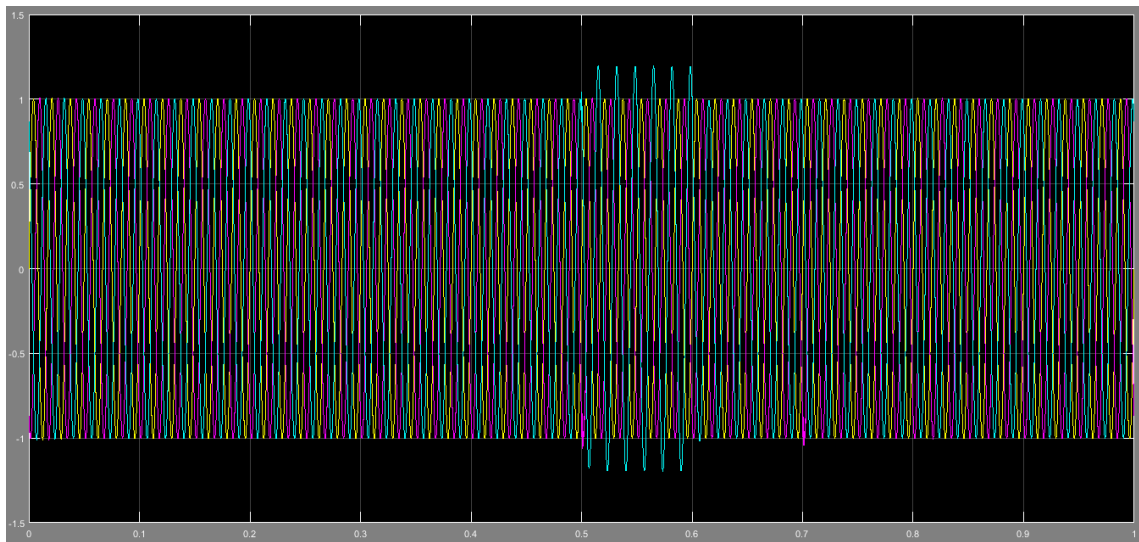


Figura 23. Mitigación de sag en las fases A y B mediante un SVC

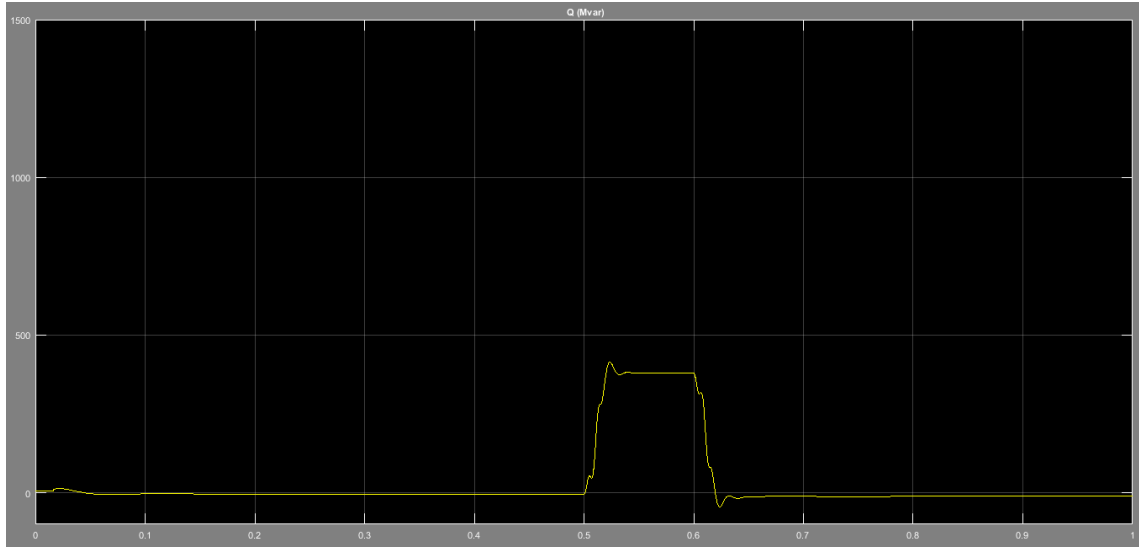


Figura 24. Potencia reactiva de la red al mitigar un swell en las fases A y B mediante un SVC

Se observa la mitigación de un swell mediante un compensador SVC con la alternativa del accionamiento manual en las 3 fases. En la Figura 25 se muestra la elevación de la onda de tensión y en la Figura 26 se muestra la compensación de la potencia reactiva en el sistema.

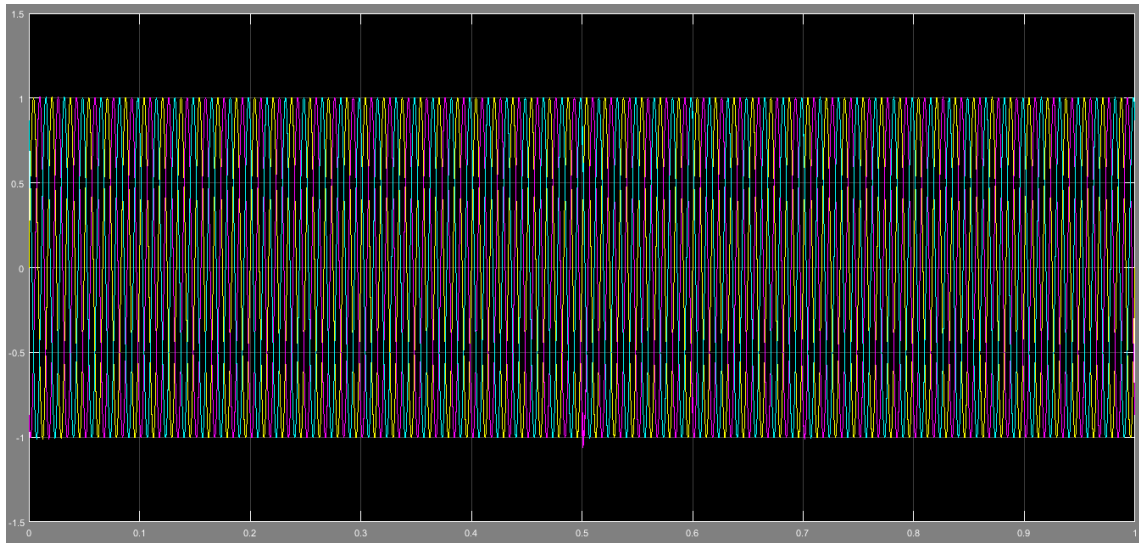


Figura 25. Mitigación del swell en las tres fases mediante un SVC

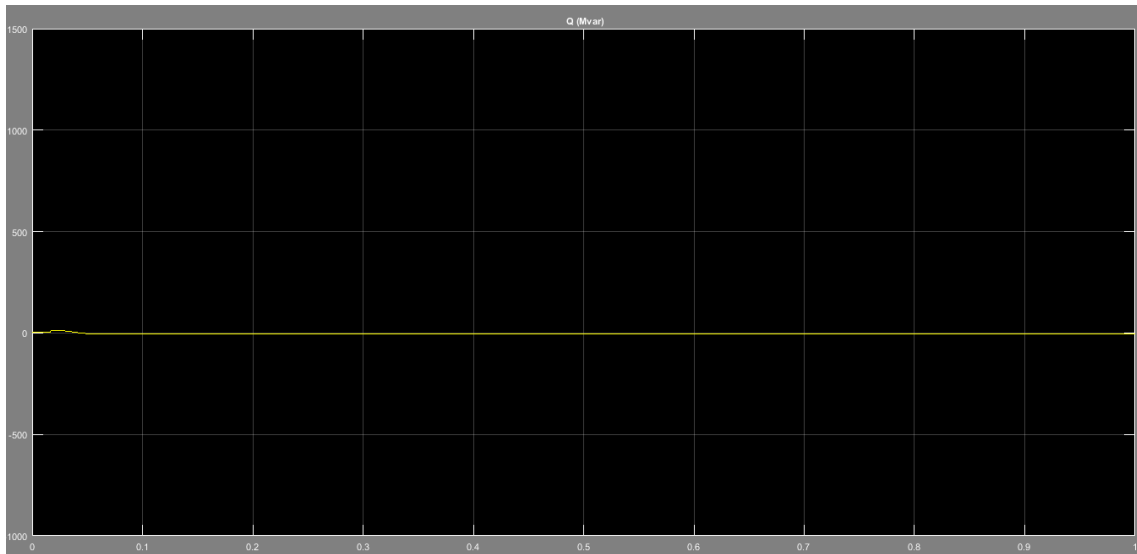


Figura 26. Potencia reactiva de la red al mitigar un swell en las tres fases mediante un SVC

Al tener los diferentes valores en los eventos de sag y swell se determinó que el compensador SVC cumple con los requerimientos para mitigar la variación de incremento o disminución de la tensión según sea el caso, así como inyectar o absorber potencia reactiva al sistema de distribución en estudio. Ver tabla 9.

Tabla 9. Tabla de resultados

SAG				SWELL			
Evento	Compensación del SVC			Evento	Compensación del SVC		
	1 FASE	2 FASE	3 FASE		1 FASE	2 FASE	3 FASE
0.876 p.u.	0.92 p.u.	0.96 p.u.	1.004 p.u.	1.217 p.u.	1.14 p.u.	1.07 p.u.	1.004 p.u.
-700 MVAR	220 MVAR	420 MVAR	700 MVAR	1500 MVAR	-700 MVAR	-1100 MVAR	-1500 MVAR

En la tabla 9. Se detalla que al presentarse un evento de sag la potencia reactiva disminuye a un valor de -700 MVAR es decir que el SVC tiene que inyectar reactivos. Y de igual manera al ocurrir un evento de swell la potencia reactiva se eleva a 1500 MVAR siendo así que el SVC tiene que absorber reactivos.

Posteriormente una vez realizada la comprobación del método de compensación reactiva con un SVC se observa la efectividad del mismo en las zonas 3 y 4 del Alimentador Primario “D”, al momento de mitigar un sag y swell de tal manera que la tensión vuelva a rangos estables.

Un vez realizado las perturbaciones se observó mediante la herramienta Harmonic/Power Quality del software DigSILENT que la red tiene valores del THD de 2% y un HD de 0.5 % tolerancias aceptables por la norma IEEE 519. Además se determinó que la variación de tensión durante un sag y swell fue considerable respectivamente pero al ser eventos de corta duración se hace valido los datos facilitados por la EEQ S.A. donde se observó que la subestación posee un -3.17 %, lo cual es un rango admisible por la regulación Arconel 005/18. Ver anexo F

12. IMPACTOS (TÉCNICOS, SOCIALES, AMBIENTALES O ECONÓMICOS)

Impacto Técnico

El compensador reactivo a emplear en el presente estudio reunirá las condiciones requeridas por la normativa vigente referida al control armónico y calidad del servicio de distribución, planteando alternativas que sean de uso adecuado y beneficio para el presente proyecto.

Impacto Social

El compensador reactivo puede presentar una mejora en el servicio de energía eléctrica, manteniendo el nivel de tensión constante así también como la forma de onda sinusoidal previniendo daños en los equipos eléctricos y dispositivos electrónicos.

Impacto Económico

La inversión inicial de la propuesta es de \$ 79.034,45 dólares americanos que mediante el estudio técnico económico se estima recuperar esta inversión en 3 años

13. PRESUPUESTO PARA LA PROPUESTA DEL PROYECTO

Factibilidad Técnica

Mediante el análisis técnico realizado, el SVC cumple efectivamente la compensación de reactivos mitigando las variaciones de corta duración sag y swell, además de contribuir eficazmente para el control de tensión eléctrica a valores aceptables por normativa, Por tal motivo el análisis económico servirá para determinar el presupuesto del compensador

reactivo, es decir que se debe considerar los costos del equipo, así como los valores para determinar si es o no conveniente su ejecución.

Análisis técnico-económico

VAN: Valor Actual Neto, es un criterio económico el cual se utiliza al momento de analizar un proyecto. Con lo mismo se demuestra los beneficios o pérdidas de la inversión, el VAN expresa una medida de rentabilidad y valorizar distintas opciones.

- Si el $VAN > 0$: se realiza el proyecto genera beneficios.
- Si el $VAN = 0$: la ejecución del proyecto no es necesaria.
- Si el $VAN < 0$: se rechaza el proyecto por generar pérdidas

TIR: Tasa Interna de Retorno, es un indicador financiero de rentabilidad de una inversión expresado por un porcentaje de beneficio o pérdida de los fondos que se pretenden invertir en un proyecto.

Tabla 10. Calculo financiero de SVC

AÑOS	5
INVERSION INICIAL	\$ 79.034,45
PRESUPUESTO	\$ 40.000,00
VAN	\$ 10.931,02
TIR	17%

Realizando los cálculos financieros se pudo concluir que la recuperación de la inversión inicial se la recupera en un periodo de 3 años. Ver Anexo G.

14. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- Mediante la indagación sobre las variaciones de tensión de corta duración se pudo conocer de mejor manera y ampliamente el tema, así también de las posibles soluciones para mejorar la calidad de energía en una red de distribución teniendo en cuenta los límites permitidos por la normativa
- En el sistema del alimentador primario “D” al momento de realizar los eventos de sag y swell, se concluyó que la red tiene valores tolerables de THD y HD, sin embargo para

la variación de voltaje existieron niveles de tensión considerables pero por lo indicado en la regulación Arconel 005/18 no son tomados en cuenta debido al tiempo de medición y duración de los eventos.

- Para la simulación se realizó eventos de generación de sag en la zona 4 donde se necesitó valores con mayor proporción de carga y para la generación de swell en la zona 3 fue necesario la desconexión de carga, siendo así los nodos críticos del sistema lo cual estaría acorde a lo investigado.
- Al momento de generar sag y swell en las zonas 3 y 4 se determinó que en los ramales más cercanos también se presentaban estas variaciones de tensión de corta duración, así determinamos que dichas perturbaciones afectarían a equipos eléctricos y electrónicos que estén cerca del lugar que se producen estos eventos.
- Para efectuar la simulación del sistema del alimentador Primario “D” se utilizó el software DigSILENT y debido a que en el mismo no fue factible realizar la comprobación de un compensador reactivo, por lo tanto se utilizó la herramienta Simulink de Matlab, para comprobar la efectividad del SVC y posteriormente observar la mitigación de variaciones de tensión de corta duración sag y swell.
- El sistema presento una mejora en el nivel de tensión en las zonas 3 y 4 mediante la simulación de un compensador reactivo SVC realizado en la herramienta Simulink de Matlab con ayuda de un accionamiento manual se comprobó la efectividad del mismo, siendo así se observó que al ocurrir un sag el SVC inyecta potencia reactiva y al generarse un swell adsorbe potencia reactiva de esta manera el sistema vuelve a condiciones normales de funcionamiento.
- Para realizar una mejor evaluación de los compensadores se debe realizar un análisis del sistema de control del SVC, con el fin de proporcionar una mejor respuesta al momento de detectar la variación de tensión. El mismo que es un tema amplio y complejo que puede ser tomado como un trabajo a futuro.

RECOMENDACIONES

- Es recomendable tener claramente los conceptos de las variaciones de tensión de corta duración y así mismo los límites de tensión admisibles, además conocer las limitaciones y tiempos para que pueda ser considerado un sag y un swell.
- Indagar respecto a las normativas nacionales e internacionales vigentes para un mejor conocimiento de las mismas y del mismo modo aplicarlas para obtener un servicio de

energía eficiente.

- Se recomienda realizar el modelamiento de la red de distribución usando datos de correcto funcionamiento de la misma, para determinar los nodos o zonas críticas del mismo.
- Se realizar el estudio del sistema de control de los compensadores reactivos, ya que el mismo es necesario para comprobar su efectividad teniendo en cuenta que es un sistema muy amplio y complejo para poder mitigar un sag o swell en una red de medio voltaje, es decir que con el tiempo apropiado puede ser tomado como un trabajo a futuro.
- Para el diseño e implementación en la vida real de un SVC con los valores de potencia necesarios, se requiere un estudio detallado del sistema de control, ya que este envía una señal de activación para inyectar o absorber potencia reactiva al sistema.

15. BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. MORA, «Perturbaciones en la onda de tensión: Huecos (sags) y Sobretensiones (Swells),» España, 2003.
- [2] M. PORTILLO y R. SANCHEZ, «Estudio preliminar de calidad eléctrica en sistemas de distribución en El Salvador,» El Salvador, 2005.
- [3] J. MELÉNDEZ, S. HERRAIZ y J. COLOMER, «Causas y Efectos de las Perturbaciones y La Calidad de Onda en el Servicio Eléctrico,» España, 2005.
- [4] I. REAL DE LA BARREDA, «Análisis de Huecos de Tensión en Redes de Distribución,» España, 2017.
- [5] S. KISHORE, S. KUMAR, P. Mrs ABIRAMI y M. Mrs GEORGE, «Reducción de la caída de voltaje y mejora de la calidad de la energía mediante DVR,» Universidad de Sathyabama, Chennai, 2017.
- [6] J. MORA y J. MELÉNDEZ, «Caracterización de Huecos de Tensión para Localización de Fallas en Sistemas de Distribución,» Peru, 2004.
- [7] D. SALAMANCA, Á. CADENA y G. RAMOS, «Evaluación de los Sags en Usuarios Industriales en un Sistema de Distribución,» Pereira, 2009.
- [8] Y. CRISMATT y E. BARÓN, «Análisis de calidad de energía y diseño del banco de condensadores para la corrección del factor de potencia en la subestación de la Universidad Tecnológica de Bolívar Sede Ternera,» Universidad Tecnológica de

- Bolivar, Cartagena, 2010.
- [9] M. ROMERO, «Metodología para el Análisis de Sags de Tensión en Redes de Distribución con el Fin de Obtener Mapas de Hundimientos en Tensión para las Barras de 220 kV y 115 kV de la Ciudad de Bogotá,» Bogotá, 2011.
- [10] ELECTRO INDUSTRIA, «Calidad del Suministro de la Energía Eléctrica (Parte 1),» 01 2012. [En línea]. Available: <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=1765&ni=calidad-del-suministro-de-la-energia-electrica-40parte-i41>. [Último acceso: 17 11 2020].
- [11] H. ROJAS, A. CRUZ y H. ROJAS, «Análisis de la compensación de hundimientos de tensión en sistemas,» DYNA - Universidad Nacional de Colombia, Colombia, 2015.
- [12] J. DÍAZ, L. PABÓN y J. CONTRERAS, «Plataforma de bajo costo para la evaluación de fenómenos electromagnéticos monofásicos de calidad de la energía según el estándar IEEE 1159,» Universidad de Pamplona, Colombia, 2015.
- [13] J. ROA y J. CAICEDO, «Mitigación de Sags y Swells de una Red de Distribución IEEE de 30 Nodos Mediante la Ubicación de Facts (Svc y Dstatcom),» Bogotá, 2016.
- [14] J. A. DUCARA V, «Mitigación de Perturbaciones en Calidad de Potencia en Sistemas de Distribución Usando Control Distribuido,» Universidad Nacional de Colombia, Bogotá - Colombia, 2017.
- [15] V. NIETO y O. ALVARADO, «La Calidad de Energía: Análisis Armónico de Sistemas Eléctricos de Potencia,» Ecuador, 2010.
- [16] M. HOLGUIN y D. GOMEZCOELLO, «Análisis de Calidad de Energía Eléctrica en el Nuevo Campus de la Universidad Politécnica Salesiana,» Ecuador, 2010.
- [17] PLAN DE EXPANSIÓN, «Plan de Expansión 2011-2021 del Sistema Eléctrico de la EEQ,» Quito, 2011.
- [18] F. CAÑIZARES y J. MORENO, «Reconfiguración del sistema primario de 6.3 kV de las subestaciones 2,3,4,6,7 y 8 de la Empresa Eléctrica Quito,» Quito, 2012.
- [19] G. PEÑA y J. RAMÍREZ, «Reconfiguración y optimización de los alimentadores primarios de la subestación obrapía y San Cayetano pertenientes a la EERSSA,» Universidad de Cuenca, Cuenca, 2012.
- [20] G. NAVARRO, «Análisis de armónicos en las unidades de generación de las centrales hidroeléctricas Illuchi 1 e Illuchi 2 de ELEPCO S.A,» Escuela Politécnica Nacional,

Quito, 2013.

- [21] J. ACOSTA, C. RODRÍGUEZ y A. ROMERO, «Análisis, diseño e implementación de un restaurador dinámico de voltaje (DVR) basado en un convertidor trifásico pwm con modulación sinusoidal,» Escuela Politécnica del Litoral ESPOL.
- [22] S. CUAMACÁS y M. GUAMÁN, «Diseño e implementación de un módulo que permita la generación de perturbaciones eléctricas y su corrección, para el análisis y monitoreo utilizando un analizador de red,» Universidad Técnica del Norte, Ibarra, 2016.
- [23] MATLAB, «Apuntes de Simulink,» The MathWorks.
- [24] DIgSILENT, «PowerFactory DIgSILENT,» Innovaciones de Ingeniería Eléctrica.
- [25] ARCONEL 005/18, «Calidad del Servicio de Distribución y Comercialización de Energía Eléctrica,» Quito, 2018.
- [26] IEEE Std 519, «Prácticas Recomendadas por IEEE y Requisitos para el Control de Armónicos en Sistemas de Energía Eléctrica,» 2014.

ANEXO A. Datos Alimentador

Tabla 11. Tabla de cargas del Alimentador Primario "D"

TRANSFORMADORES		
CODIGO	CAPACIDAD INSTALADA KVA	CAPACIDAD KW
40791	125	118,75
45349	125	118,75
101016	112,5	106,87
1275	25	23,75
24165	50	47,50
70747	45	42,75
6811	75	71,25
28784	112,5	106,87
113401	125	118,75
163325	90	85,50
70745	30	28,50
13220	100	95,00
3687	15	14,25
5497	25	23,75
100174	30	28,50
13213	75	71,25
170257	300	285,00
171619	400	380,00
46259	50	47,50
4746	45	42,75
43840	125	118,75
34562	75	71,25
33941	15	14,25
162784	15	14,25
13237	100	95,00
21052	45	42,75
73358	45	42,75
49054	100	95,00
22513	75	71,25
73359	45	42,75
49041	75	71,25
20032	50	47,50
4198	15	14,25
13014	30	28,50
4774	75	71,25
35406	150	142,50
169422	75	71,25
21705	160	152,00
115212	50	47,50
162999	30	28,50

4219	15	14,25
100187	25	23,75
47936	125	118,75
36297	30	28,50
31785	30	28,50
163563	37,5	35,62
26896	112,5	106,87
170727	150	142,50
172653	100	95,00
165134	75	71,25
2250	400	380,00
33791	50	47,50
6779	30	28,50
73316	50	47,50
47054	45	42,75
43346	50	47,50
105496	100	95,00
15039	50	47,50
2836	45	42,75
45338	75	71,25
70638	30	28,50
1611	100	95,00
16154	25	23,75
173472	1500	1425,00
73315	30	28,50
6834	15	14,25
169680	50	47,50
5082	75	71,25
49056	100	95,00
45316	30	28,50
49065	100	95,00
6748	75	71,25
3790	75	71,25
49030	75	71,25
13395	50	47,50
32823	45	42,75
163670	30	28,50
17568	30	28,50
36058	30	28,50
6790	45	42,75
3548	300	285,00
3547	300	285,00
13471	50	47,50
16568	45	42,75
6049	45	42,75
33015	25	23,75
165691	50	47,50
70649	50	47,50
70648	30	28,50

43339	50	47,50
4167	5	4,75
46715	25	23,75
100863	37,5	35,62
115253	15	14,25
14078	30	28,50
114186	125	118,75
13465	75	71,25
167935	30	28,50
1507	60	57,00
4140	5	4,75
17031	112,5	106,87
20803	90	85,50
73120	45	42,75
45348	125	118,75
45355	125	118,75

ANEXO B. Configuración de evento de Sag en Simulink

B1. Creación de eventos SAG en Simulink-Matlab

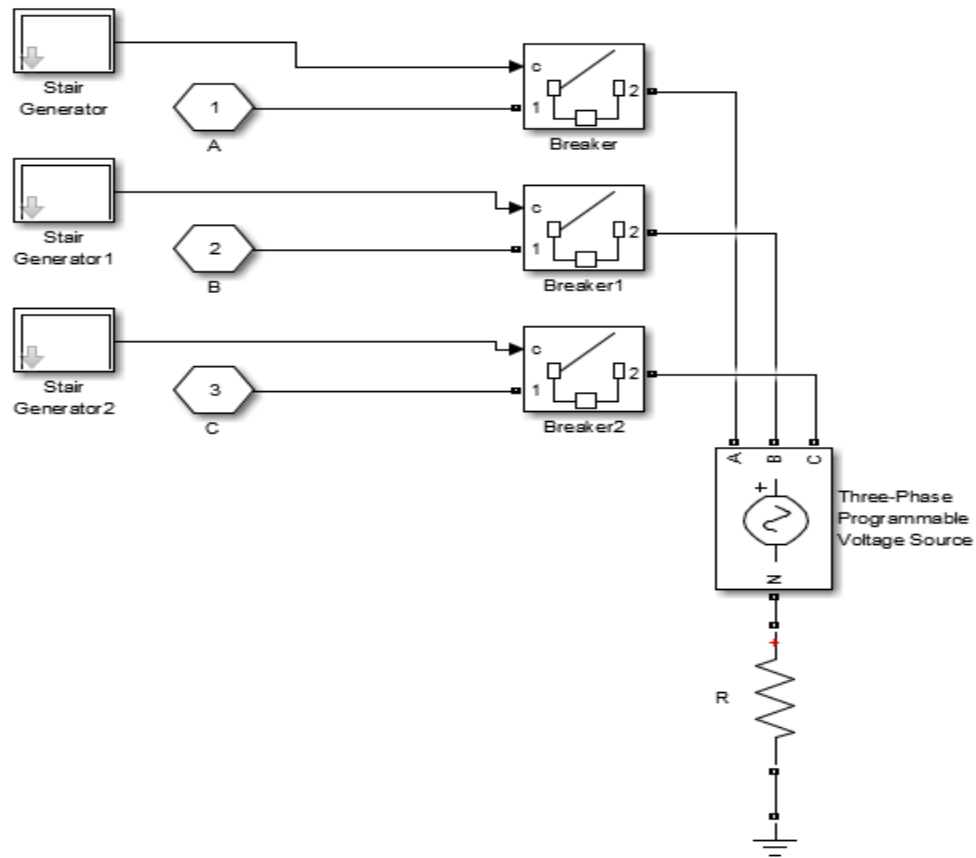


Figura 27. Diagrama de generación de un sag

B2. Configuración de Parámetros de Resistencia

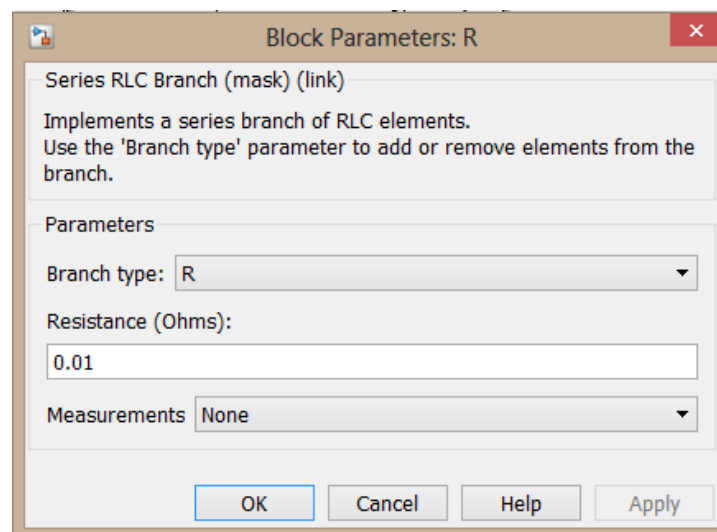


Figura 28. Cuadro de parámetros de Resistencia

B3. Parámetros de fuente de tensión

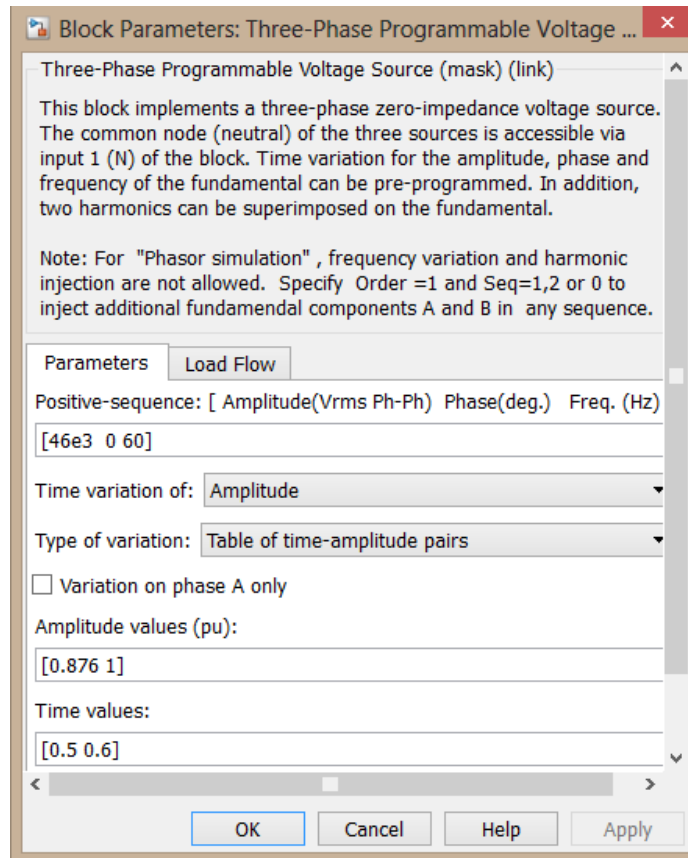


Figura 29. Cuadro de parámetros de fuente de tensión

B4. Configuración de parámetros de BREAKER

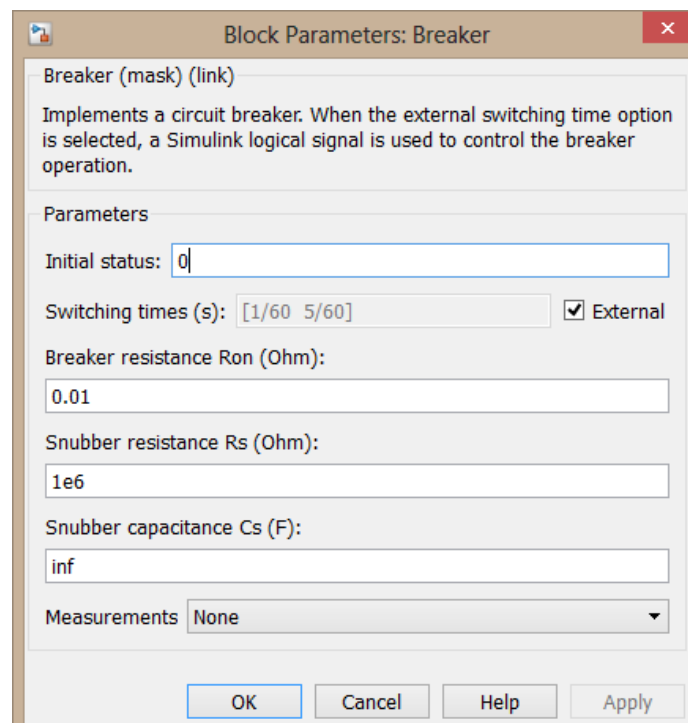
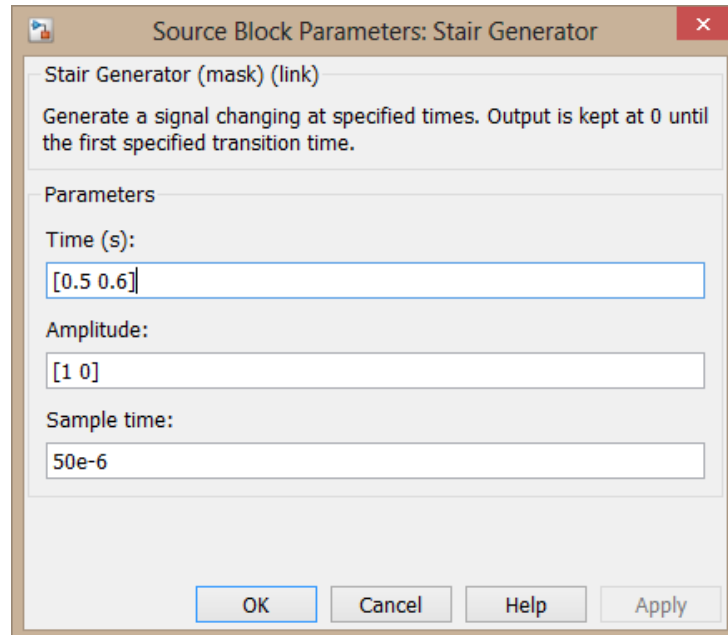


Figura 30. Cuadro de parámetros del Breaker

B5. Configuración de STAIR GENERATOR**Figura 31.** Cuadro parámetros de Stair generator

ANEXO C. Configuración de evento de Swell en Simulink

C1. Configuración de evento SWELL

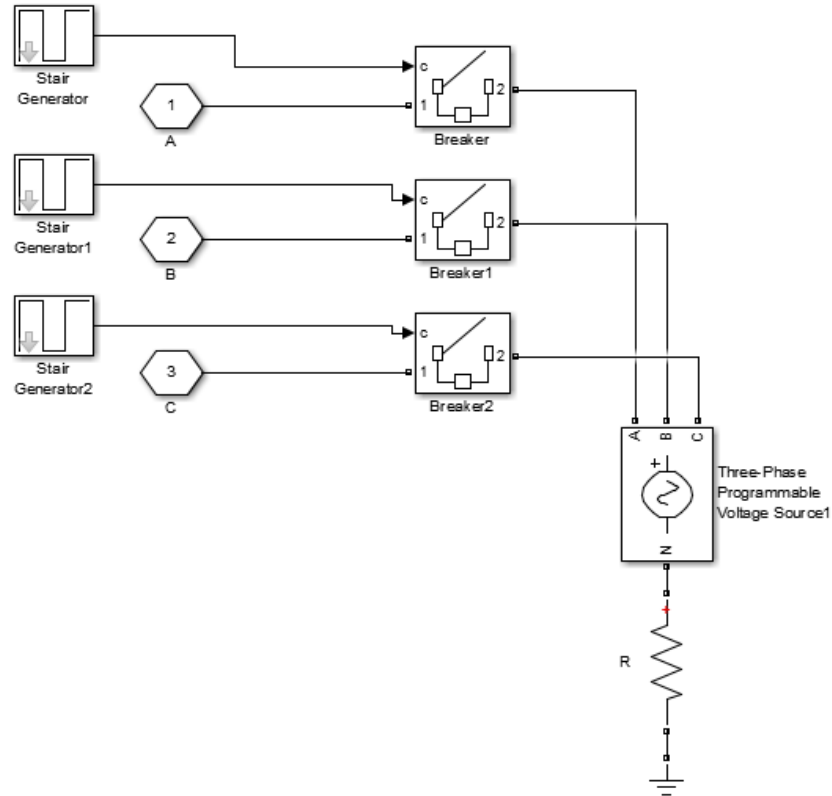


Figura 32. Diagrama de generación de un swell

C2. Configuración de Parámetros de Resistencia

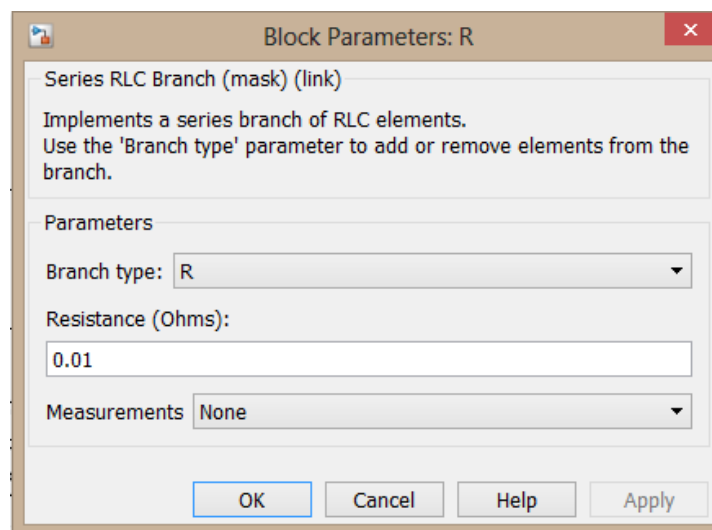


Figura 33. Cuadro de parámetros de resistencia

C3. Parámetros de fuente de tensión

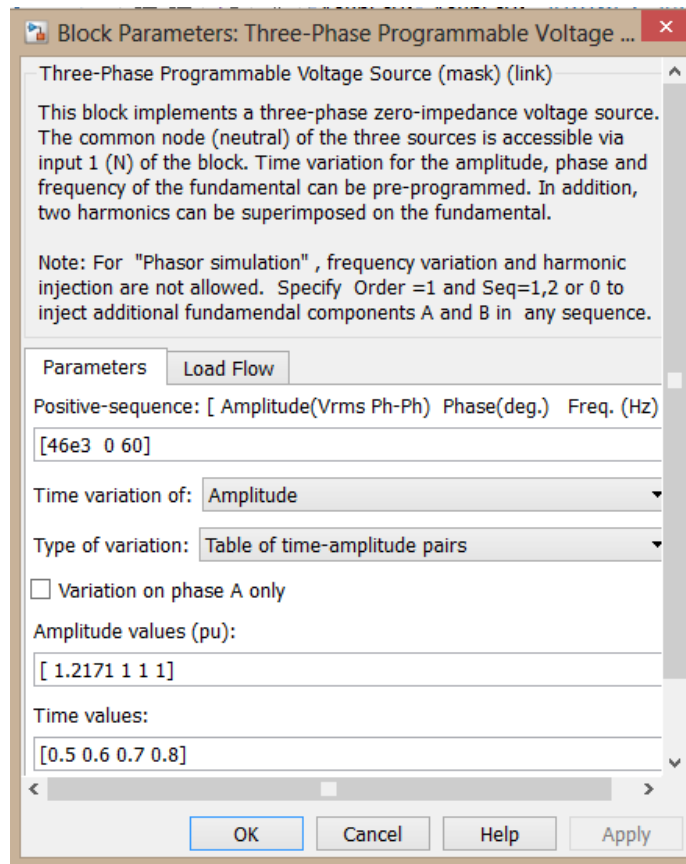


Figura 34. Cuadro de parámetros de fuente de tensión

C4. Configuración de parámetros de BREAKER

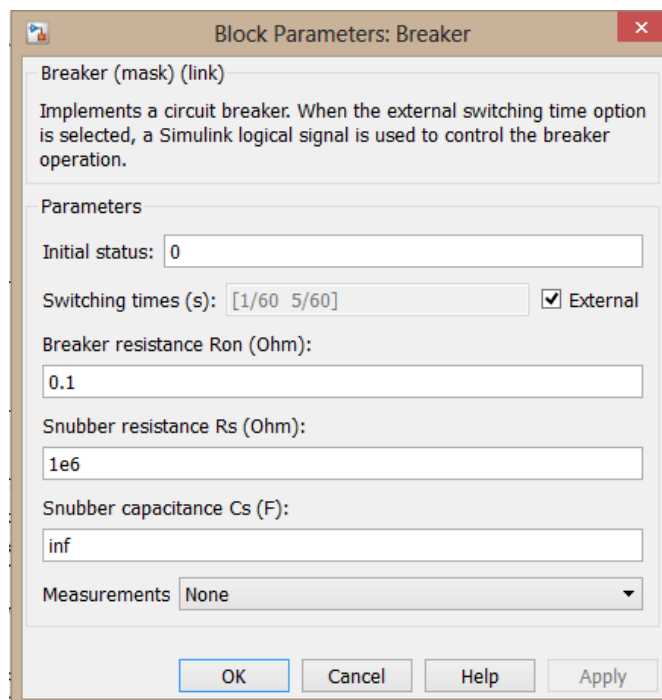


Figura 35. Cuadro de parámetros de Breaker

C5. Configuración de STAIR GENERATOR

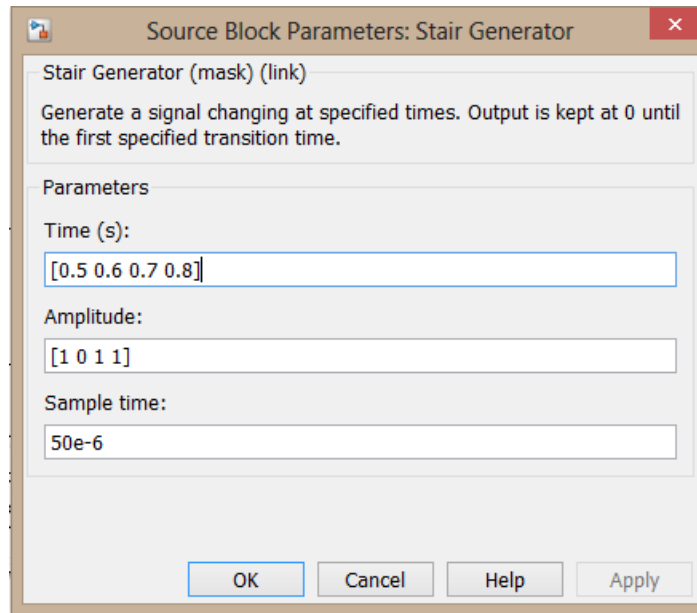


Figura 36. Cuadro de parámetros de Stair Generator

ANEXO D. Modelo de red con un compensador SVC en Simulink

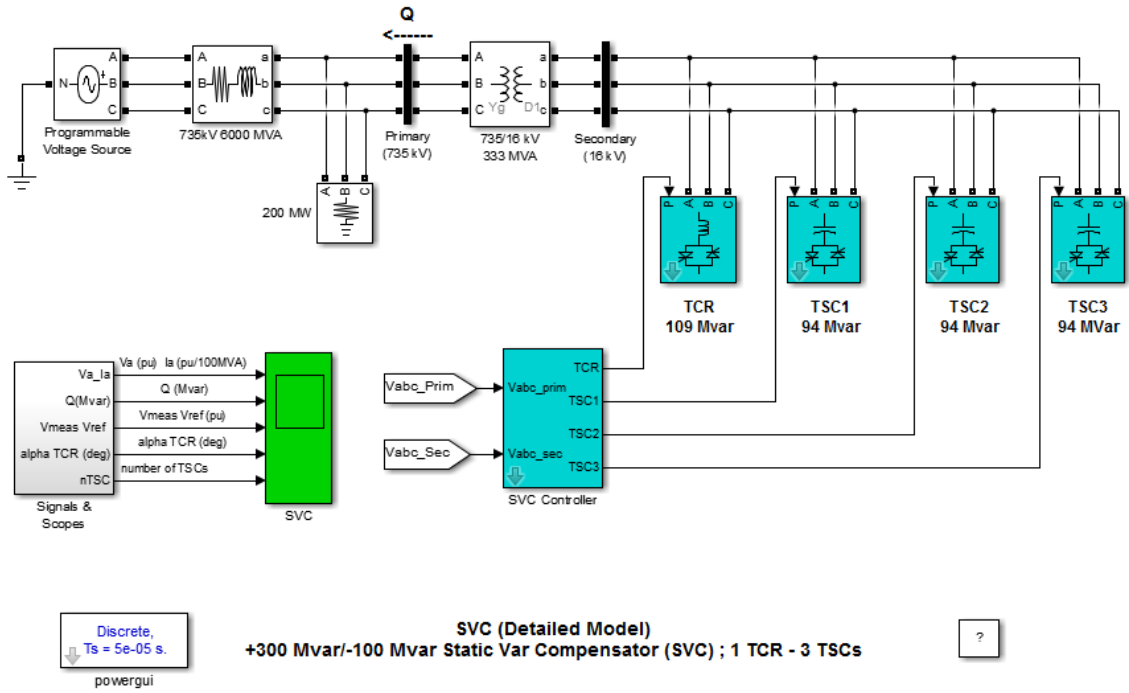


Figura 37. Modelo de red conectado un SVC

ANEXO E. Accionamiento de control manual

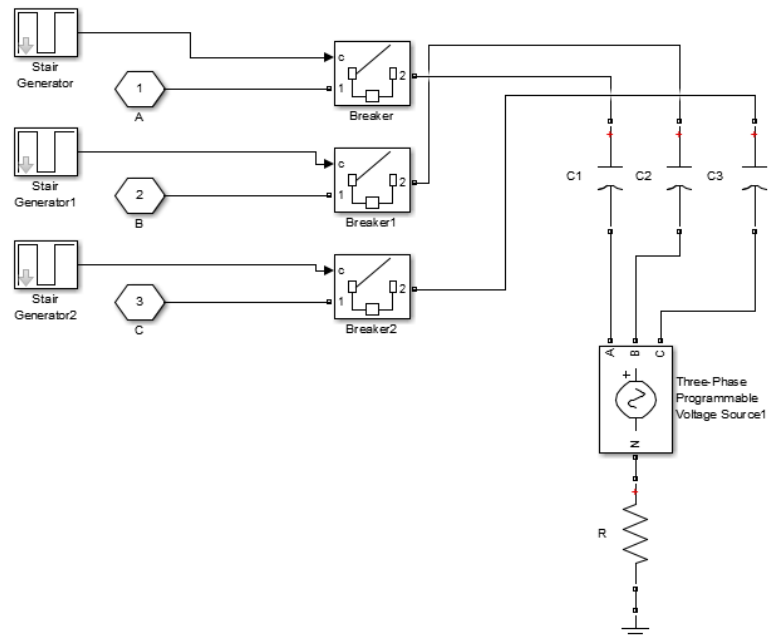


Figura 38. Modelo control manual con Capacitores

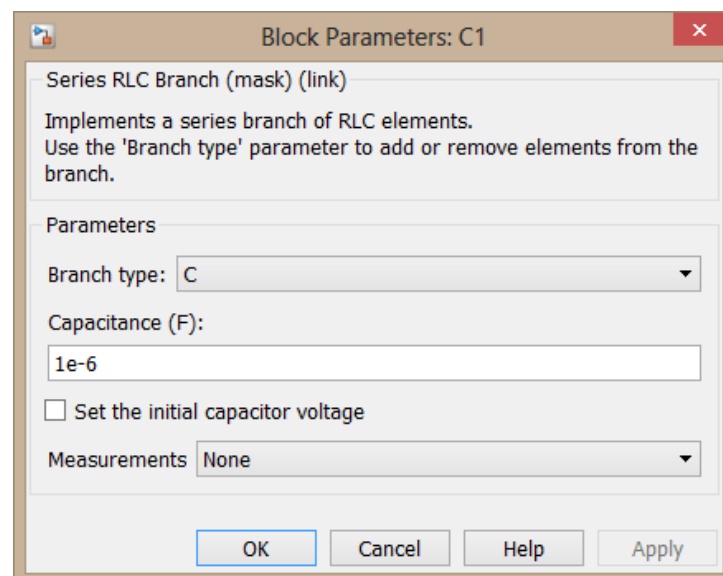


Figura 39. Cuadro de parámetros de control manual con Capacitores

ANEXO F. Cálculo del porcentaje de variación de voltaje

$$\Delta V = \frac{V_k - V_n}{V_n} * 100 \quad (1)$$

Donde:

ΔV = variación del tensión de suministro

V_k = Voltaje medido en 3 minutos

V_n = Voltaje Nominal

Tabla 12. Cálculo de variación de tensión

Valor medido (KV)		Voltaje nominal (KV)	Variación de voltaje
EEQ	6.1	6.3	-3.17 %
Sag	5.55	6.3	-12.7 %
Swell	7.7	6.3	22 %

$$\Delta V = \frac{V_k - V_n}{V_n} * 100$$

$$\Delta V = \frac{6.1 \text{ KV} - 6.3 \text{ KV}}{6.3 \text{ KV}} * 100$$

$$\Delta V = -3,17 \%$$

ANEXO G. Calculo financiero del Compensador Reactivo SVC

G1. Cálculo de presupuesto

Tabla 13. Cálculo de Presupuesto

MATERIALES	PRECIO TOTAL	MANTENIMIENTO
SVC	\$ 3.017,00	\$ 4.000,00
Ingeniería Electromecánica	\$ 1.352,77	\$ 2.000,00
Obra Electromecánica	\$ 11.805,38	\$ 12.000,00
Ingeniería Civil	\$ 1.720,88	\$ 2.000,00
Obra Civil	\$ 35.965,98	\$ 40.000,00
Puesta en Servicio	\$ 9.518,38	\$ 10.000,00
Otros materiales necesarios	\$ 7.186,07	\$ 8.000,00
TOTAL	\$ 70.566,47	\$ 78.000,00

G2. Cálculo de Flujo de Ingresos

Tabla 14. Cálculo de Flujo de Ingresos

Flujo de Ingresos	
	A
Año	Valor
2022	\$ 88.518,58
2023	\$ 99.140,81
2024	\$ 111.037,70
2025	\$ 124.362,23
2026	\$ 139.285,70
TOTAL	\$ 562.345,02

G3. Cálculo de Flujo de Egresos

Tabla 15. Cálculo de Flujo de Egresos

Flujo de Egresos	
	B
Año	Valor
2022	\$ 54.160,00
2023	\$ 70.019,20
2024	\$ 87.781,50
2025	\$ 107.675,28
2026	\$ 129.956,32
TOTAL	\$ 449.592,31

G4. Cálculo de Flujo de Efectivo Neto**Tabla 16.** Cálculo de Flujo de Efectivo Neto

Flujo Efectivo Neto	
	A-B
Año	Valor
2022	34358,58
2023	29121,61
2024	23256,20
2025	16686,94
2026	9329,38

G5. Cálculo de Recuperación inversión**Tabla 17.** Cálculo de Recuperación inversión

Flujo Efectivo Neto	
Año	Valor
2022	\$ 34.358,58
2023	\$ 29.121,61
2024	\$ 23.256,20
RECUPERACIÓN	\$ 86.736,39

G6. Cálculo de TIR Y VAN**Tabla 18.** Cálculo Financiero

Parámetros Financieros	
INVERSION I.	\$ 79.034,45
PRESUPUESTO	\$ 40.000,00
VAN	\$ 10.931,02
TIR	17%