



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL
CARRERA DE ELECTRICIDAD**

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE COMPENSACIÓN REACTIVA PARA
DISTRIBUCIÓN CON FILTROS ARMÓNICOS**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero Eléctrico**

**AUTORES: HERNÁN EMANUEL HIDALGO MONAR
SANTIAGO WILFRIDO MATAMOROS PLAZA**

TUTOR: ING. JULIO MANUEL SILVA BECHERAN

Guayaquil - Ecuador

2024

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Hernán Emanuel Hidalgo Monar con documento de identificación N.º 0930576988 y Santiago Wilfrido Matamoros Plaza con documento de identificación N.º 0931478614; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Guayaquil, 21 de febrero del año 2024

Atentamente,

Hernán Hidalgo M.

Hernán Emanuel Hidalgo Monar
0930576988

Santiago Wilfrido Matamoros Plaza

Santiago Wilfrido Matamoros Plaza
0931478614

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Hernán Emanuel Hidalgo Monar con documento de identificación No. 0930576988 y Santiago Wilfrido Matamoros Plaza con documento de identificación No. 0931478614, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del proyecto técnico: “Diseño De Un Sistema De Compensación Reactiva Para Distribución Con Filtros Armónicos”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 21 de febrero del año 2024

Atentamente,

Hernan Hidalgo M.

Hernán Emanuel Hidalgo Monar
0930576988




Santiago Wilfrido Matamoros Plaza
0931478614

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Julio Manuel Silva Becheran con documento de identificación N° 0964890495, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DISEÑO DE UN SISTEMA DE COMPENSACIÓN REACTIVA PARA DISTRIBUCIÓN CON FILTROS ARMÓNICOS realizado por Hernán Emanuel Hidalgo Monar con documento de identificación No. 0930576988 y Santiago Wilfrido Matamoros Plaza con documento de identificación No. 0931478614, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción proyecto técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 21 de febrero del año 2024

Atentamente,



Ing. Julio Manuel Silva Becheran
0964890495

DEDICATORIA

Ante todo, dedico esta tesis a Dios en primer lugar, porque me ha brindado la fortaleza, inteligencia, paciencia y perseverancia en este proceso universitario por medio de Él he logrado cumplir una meta más.

A mi madre, por ser mi apoyo constante quien me han enseñado con su ejemplo a confiar en Dios, a luchar contra las adversidades y no rendirme hasta no lograr cumplir mi objetivo. Gracias por su amor, tiempo, paciencia y todo su esfuerzo.

Hernán Emanuel Hidalgo Monar

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, le doy las gracias a Dios por permitirme alcanzar un logro más en mi vida. A mi familia, en especial a mi madre, quien siempre me ha brindado el apoyo necesario en el camino de la vida.

De igual manera, mi agradecimiento a la Universidad Politécnica Salesiana, a aquellos docentes que nos impartieron sus conocimientos con gran entusiasmo y esfuerzo.

Gracias a todas aquellas personas que me apoyaron, en este proceso universitario que culminó exitosamente.

Hernán Emanuel Hidalgo Monar

DEDICATORIA

A mi madre, que me ha puesto siempre por el buen camino, con buenos sentimientos y valores que me han ayudado a encontrar mi mejor versión siempre.

Siempre estaré orgulloso y agradecido de todo su esfuerzo, dedicación y como nos hemos visto salir adelante mutuamente.

A mis abuelos, que siempre me han mostrado directa e indirectamente a cómo tomar las riendas de la vida con esfuerzo, sacrificio y dedicación.

Santiago Wilfrido Matamoros Plaza

AGRADECIMIENTOS

La vida siempre es hermosa, y lo más hermoso es poder compartir y disfrutar con quienes amamos. Mediante estos agradecimientos quiero exaltar a todos los que estuvieron presentes durante el desarrollo de esta tesis y de alguna u otra forma me hicieron disfrutar la realización de este trabajo.

Mi agradecimiento total a los docentes de la Universidad Politécnica Salesiana que siempre estuvieron dispuestos a compartir su conocimiento y consejo.

Santiago Wilfrido Matamoros Plaza

RESUMEN

El proyecto técnico previo a la obtención del título de ingeniero eléctrico, presenta una metodología heurística en la que utiliza como base principal el sistema de 14 Barras de la IEEE, haciendo referencia a un sistema de distribución aislado de una industria, esto quiere decir que la industria solo opera con generadores y no está conectada a una red eléctrica, en el cual aparecen problemas de bajo factores de potencia y la presencia de armónicos debido a las cargas que presenta el sistema. Para ello se busca realizar un diseño de compensación reactiva con filtros de armónicos que permitan que el sistema opere de manera eficiente. Se realizan cálculos los cuales nos permitan demostrar que filtros se debe implementar, las ubicaciones óptimas de los SVC y las características o parámetros de los mismos, para de esta manera poder mejorar el margen de estabilidad de tensión. También se busca demostrar tanto la problemática como los resultados obtenidos mediante el software ETAP, el cual nos ayudara a la comparativa del sistema cuando se encuentre en condiciones inestables y estables. Esta metodología que se utiliza se puede aplicar a cualquier sistema de distribución que presente problemas similares ya que por medio de las ecuaciones aplicadas se podrán reducir los tiempos de búsqueda a soluciones de problemáticas que se puede presentar frecuentemente en diversos sistemas de distribución en las industrias. En los resultados alcanzados se logra evidenciar la mejora del factor de potencia, disminución de pérdidas de potencia en las líneas, la atenuación de perturbaciones de voltaje y minimizar la presencia de armónicos en el sistema. De esta manera se mejora los perfiles de tensión al igual que sus ángulos, la potencia real y la potencia reactiva se redistribuyen para poder perfeccionar el rango de estabilidad de los perfiles de tensión.

Palabras Claves: Compensación reactiva, Filtros Armónicos, Sistema de distribución aislado, Ubicación óptima de SVC, Sistemas de distribución, Sistema de 14 Barras de la IEEE.

ABSTRACT

The technical project prior to obtaining the title of electrical engineer, presents a heuristic methodology in which the IEEE 14 Bar system is used as the main base, referring to an isolated distribution system of an industry, this means that the industry only operates with generators and is not connected to an electrical network, in which problems of low power factors and the presence of harmonics appear due to the loads presented by the system. To achieve this, a reactive compensation design is sought with harmonic filters that allow the system to operate efficiently. Calculations are carried out which allow us to demonstrate which filters should be implemented, the optimal locations of the SVCs and their characteristics or parameters, in order to improve the voltage stability margin. It also seeks to demonstrate both the problems and the results obtained through the ETAP software, which will help us compare the system when it is in unstable and stable conditions. This methodology that is used can be applied to any distribution system that presents similar problems since through the applied equations the search times can be reduced to solve problems that can frequently occur in various distribution systems in industries. The results achieved show the improvement of the power factor, reduction of power losses in the lines, the attenuation of voltage disturbances and minimizing the presence of harmonics in the system. In this way, the voltage profiles are improved as well as their angles, the real power and the reactive power are redistributed in order to perfect the stability range of the voltage profiles.

Keywords: Reactive Compensation, Harmonic Filters, Isolated Distribution System, Optimal SVC Location, Distribution Systems, IEEE 14 Bus System.

INDICE GENERAL

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	ii
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA	iii
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTOS	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTOS	vi
RESUMEN	vii
ABSTRACT	viii
INDICE GENERAL	ix
INDICE DE TABLAS	xi
INDICE DE ECUACIONES	xii
INDICES DE FIGURAS	xii
INTRODUCCIÓN	1
1. CAPITULO 1	2
1.1 TÍTULO	2
1.2 ANTECEDENTES	2
1.3 PROBLEMA DE ESTUDIO	3
1.4 JUSTIFICACIÓN	3
1.5 DELIMITACIÓN	4
1.6 BENEFICIARIOS	4
1.7 OBJETIVOS	5
1.7.1 OBJETIVO GENERAL	5
1.7.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
2. CAPITULO 2	6
MARCO TEÓRICO	6
2.1 COMPENSACION REACTIVA	6
2.1.1 BANCO DE CONDESADORES	6
2.1.2 BANCOS CONECTADOS EN ESTRELLA CON CONEXIÓN A TIERRA	7
2.1.3 BANCOS CONECTADOS EN ESTRELLA SIN CONEXIÓN A TIERRA	8
2.1.2 SVC	8
2.1.4 STATCOM	9
2.2 FACTOR DE POTENCIA	9

2.2.1 BENEFICIOS DE LA CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA	10
2.2.2 MÉTODOS DE CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA	11
2.3 DISTRIBUCIÓN DE ENERGIA ELECTRICA	12
2.4 ARMÓNICOS	12
2.5 DISTORSIÓN ARMONICA	13
2.6 ÍNDICES ARMÓNICOS	13
2.7 EFECTOS DE LOS ARMÓNICOS	13
2.8 INDICADORES DE DISTORSIÓN ARMONICA	14
2.9 FILTROS ARMÓNICOS	15
2.10 FILTROS PASIVOS	15
2.11 FILTROS ACTIVOS	16
2.12 SISTEMA DE 14 BARRAS DE LA IEEE	17
2.13 INTEGRACIÓN Y FUTURAS DIRECCIONES	17
3. CAPITULO 3	18
DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE 14 BARRAS DE LA IEEE	18
3.1 CARACTERISTICAS DE LOS TRANSFORMADORES	18
3.2 CARACTERISTICAS DE LAS CARGAS	19
3.3 CARACTERISTICAS DE LAS BARRAS	20
3.4 CARACTERISTICAS DE LOS GENERADORES	21
3.5 FLUJO DE CARGA DEL SISTEMA	22
3.6 FACTORES DE POTENCIA DEL SISTEMA	24
3.6.1 ÍNDICADORES DE LAS BARRAS CON FLUJO DE CARGA	24
3.6.2 ÍNDICADORES DE LAS CARGAS CON FLUJO DE CARGA	25
3.6.3 ÍNDICADORES DE LOS GENERADORES CON FLUJO DE CARGA	26
3.6.4 ÍNDICADORES DE LOS TRANSFORMADORES CON FLUJO DE CARGA	26
3.7 ARMÓNICOS PRESENTES EN EL SISTEMA	27
3.7.1 ARMÓNICOS EN PRESENTES EN EL SISTEMA SIN EL BANCO DE CAPACITORES	27
3.7.2 ARMÓNICOS EN PRESENTES EN EL SISTEMA CON EL BANCO DE CAPACITORES	28
3.7.3 ARMÓNICOS CON MAYOR PRESENCIA EN EL SISTEMA	29
3.8 FORMA DE ONDA Y ESPECTROS	30
4. CAPITULO 4	34
DESARROLLO Y METODOLOGIA	34
4.1 UBICACIÓN OPTIMA DEL SISTEMA DE COMPENSACIÓN REACTIVA	34
4.1.1 FORMULACIÓN DE CALCULOS PARA LA CORECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA	36

4.1.2 DIMENSIONAMIENTO DEL BANCO DE CAPACITORES	37
4.1.3 INSTALACIÓN DEL BANCO DE CAPACITORES.....	39
4.2 DIMENSIONAMIENTO Y POSICIONAMIENTO DE LOS FILTROS DE ARMÓNICOS	40
5. CAPITULO 5	43
ANALISIS DE LOS RESULTADOS	43
5.1 RESULTADOS Y COMPARACIONES DEL MEJORAMIENTO DEL FACTOR DE POTENCIA DE GENERADORES	43
5.2 RESULTADOS Y COMPARACIONES DEL MEJORAMIENTO DE VARIACIÓN DE VOLTAJE EN BARRAS	45
5.3 RESULTADOS Y COMPARACIONES DE LA PRESENCIA DE ARMÓNICOS EN LA BARRA 2.....	47
5.4 RESULTADOS Y COMPARACIONES DE LA PRESENCIA DE ARMÓNICOS EN LA BARRA.....	48
5.5 RESULTADOS Y COMPARACIONES DE LA PRESENCIA DE ARMÓNICOS EN LA FORMA DE ONDA DE LAS BARRAS DE 13,8 kV.....	50
5.6 RESULTADOS Y COMPARACIONES DE LA PRESENCIA DE ARMÓNICOS EN LA FORMA DE ONDA DE LA BARRA DE 1 kV	52
5.7 RESULTADOS Y COMPARACIONES DE LA PRESENCIA DE ARMÓNICOS EN LA FORMA DE ONDA DE LA BARRA DE 11 Kv	53
5.8 RESULTADOS Y COMPARACIONES DE LA PRESENCIA DE ARMÓNICOS EN LA FORMA DE ONDA DE LAS BARRAS DE 33 kV.....	55
CONCLUSIONES	57
RECOMENDACIONES	58
BIBLIOGRAFIAS	58

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Rangos estipulados por el ARCERNNR para el THD.....	15
Tabla 2. Parámetros de los transformadores sin flujo de carga.....	19
Tabla 3. Parámetros de las cargas sin flujo de carga.....	20
Tabla 4. Parámetros de las barras sin flujo de carga.	21
Tabla 5. Parámetros de los generadores sin flujo de carga.	22
Tabla 6. Parámetros de las barras con flujo de carga.	24
Tabla 7. Rangos de voltaje admitidos según ARCERNNR 002/20.	25
Tabla 8. Parámetros de las cargas con flujo de carga.....	25

Tabla 9. Parámetros de los generadores con flujo de carga	26
Tabla 10. Parámetros de los transformadores con flujo de carga.....	26
Tabla 11. Distorsión armónica total sin CAP.....	27
Tabla 12. Distorsión armónica total con CAP.....	28
Tabla 13. Armónicos de quinto orden en el sistema	29
Tabla 14. Tabla de corrección de factor de potencia de la IEEE	38
Tabla 15. Parámetros comparativos de los THD en las barras de 13,8 kV	51
Tabla 16. Parámetros comparativos de los THD en las barras de 1 kV	53
Tabla 17. Parámetros comparativos de los THD en las barras de 11 kV	54
Tabla 18. Parámetros comparativos de los THD en las barras de 33kV.....	56

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Cálculo del factor de potencia	10
Ecuación 2. Cálculo del factor de potencia	36
Ecuación 3. Cálculo de la potencia reactiva.....	36

INDICES DE FIGURAS

Figura 1. Sistema de 14 Barras de la IEEE	17
Figura 2. Ejecución del flujo de carga del sistema sin banco de condensadores, sin filtro armónico.....	23
Figura 3. Flujo de carga armónica sin el banco de capacitores.....	27
Figura 4. Flujo de carga armónica con el banco de capacitores.....	28
Figura 5. Flujo de carga en el quinto armónico	29
Figura 6. Forma de onda y espectro de las barras 1 y 2	30
Figura 7. Forma de onda y espectro de las barras 3 y 4.....	31
Figura 8. Forma de onda y espectro de las barras 5 y 6.....	31
Figura 9. Forma de onda y espectro de las barras 7 y 8.....	32
Figura 10. Forma de onda y espectro de las barras 9 y 10.....	33
Figura 11. Forma de onda y espectro de las barras 11 y 12.....	33

Figura 12. Forma de onda y espectro de las barras 13 y 14.....	34
Figura 13. Factor de potencia del generador 1	35
Figura 14. Factor de potencia del generador 2.....	35
Figura 15. Factor de potencia de los generadores	37
Figura 16. Banco de capacitores	39
Figura 17. Parámetros ingresados en el banco de condensadores.....	39
Figura 18. Flujo de carga armónica del sistema.....	40
Figura 19. Porcentaje de THD presente en la barra 2	41
Figura 20. Mayor distorsión en el quinto armónico	41
Figura 21. Mejoramientos del factor de potencia.....	42
Figura 22. Filtro de armónico.....	42
Figura 23. Dimensionamiento del filtro armónico	42
Figura 24. Parámetros del generador antes de la compensación reactiva	43
Figura 25. Parámetros de los generadores después de la compensación reactiva.....	43
Figura 26. Factor de potencia del generador 1 previo a la compensación reactiva.	44
Figura 27. Factor de potencia del generador 2 previo a la compensación reactiva.	44
Figura 28. Resultados del banco de condensadores en el generador 1	44
Figura 29. Resultados del banco de condensadores en el generador 2	45
Figura 30. Parámetros de las barras antes de la compensación reactiva	45
Figura 31. Parámetros de las barras después de la compensación reactiva	46
Figura 32. Parámetros del THD en la BARRA 2 sin filtro armónico activado	47
Figura 33. Parámetros del THD en la BARRA 2 con filtro armónico activado	47
Figura 34. THD de las barras del sistema sin filtro de armónicos	48
Figura 35. THD de las barras del sistema con filtro de armónicos.	49
Figura 36. Onda armónica sin filtros en las barras en paralelo a la barra 2.	50
Figura 37. Onda armónica con filtros en las barras en paralelo a la barra 2.	51
Figura 38. Onda armónica sin filtros en la barra 7 de 1 kV	52
Figura 39. Onda armónica con filtros en la barra 7 de 1 kV	52
Figura 40. Onda armónica sin filtros en la barra 8 de 11 kV	53
Figura 41. Onda armónica con filtros en la barra 8 de 11 Kv	54
Figura 42. Onda armónica sin filtros en las barras de 33 kV	55
Figura 43. Onda armónica con filtros en las barras de 33 kV	55

INTRODUCCIÓN

En la actualidad el incremento de las demandas en las industrias ha llegado a provocar serios problemas en los factores de potencia y la presencia de armónicos, este proyecto técnico basado en el sistema de 14 barras de la IEEE, busca diseñar un óptimo sistema de compensación reactiva con filtros de armónicos que ayuden a operar en condiciones óptimas el sistema de distribución asilado. El sistema de 14 barras de la IEEE es un sistema de pruebas que puede ser manipulado para demostrar, verificar y evaluar diferentes situaciones.

Los sistemas eléctricos hoy en día requieren de una buena eficiencia energética y esto depende en su mayoría del factor de potencia con que opera y va ligado la eficacia de compensación reactiva en dado caso de que sea necesaria. Uno de los métodos más usados para lograr esta compensación reactiva es el uso de los bancos de condensadores. La colocación óptima de estos dispositivos se basa en tres aspectos uno de ellos es la selección de la capacidad más idónea de los bancos, también es importante determinar el tipo de compensador ya que estos pueden ser variables o fijos, la adecuada ubicación en el sistema de distribución.

La compensación de potencia reactiva es indispensable en diferentes ámbitos en la parte eléctrica porque ayuda a mejorar la eficiencia energética de los sistemas eléctricos. Las ventajas que proporcionan la compensación reactiva son muchas, pero para este caso a analizar esta más ligado a la necesidad de reducir pérdidas de energía y mejorar el perfil de tensión. [1]

El tema que se presenta además de hablar de compensación reactiva también se trata de incluir la atenuación de armónicos por medios de filtros, una metódica en este aspecto es la utilización de filtros pasivos sintonizados a las componentes armónicas a eliminar. Es de suma importancia recalcar que estos dos aspectos; la compensación reactiva y los filtros armónicos van ligados conjuntamente para que los sistemas eléctricos puedan operar en sus mejores condiciones. [2]

1. CAPITULO 1

1.1 TÍTULO

DISEÑO DE UN SISTEMA DE COMPENSACION REACTIVA PARA DISTRIBUCIÓN CON FILTROS ARMÓNICOS.

1.2 ANTECEDENTES

Los sistemas de distribución aislados son parte integral de los sistemas de electricidad y su función principal es la de dividir entre las cargas la potencia generada para poder suministrar las demandas requeridas. [3]

El control efectivo de los sistemas eléctricos es fundamental a fin de poder asegurar resoluciones en calidades ideales de seguridad, economía y continuidad en los procesos de distribución de energía eléctrica. El uso adecuado de transformadores que se localizan en las líneas de distribución son parte fundamental del proceso, ya que por medio de estos se permite suministrar de forma eficiente energía eléctrica. En la actualidad las tecnologías juegan un papel considerable para poder conseguir que los sistemas se manejen de manera eficiente garantizando la fiabilidad y calidad de los servicios para el confort de los clientes y/o usuarios.

Teniendo en cuenta que actualmente el crecimiento tecnológico ha permitido encontrar soluciones muy eficientes para los distintos incidentes de bajo factor de potencia en las redes eléctricas y así mismo poder recompensar con energía reactiva a las redes de distribución. Para la compensación reactiva la tecnología digital es particularmente beneficiosa porque actualmente es muy empleada y establece un modelo en las nuevas instalaciones, con soluciones optimas. [4]

1.3 PROBLEMA DE ESTUDIO

En la actualidad el incremento apresurado de la demanda energética implica que los sistemas de distribución aislados actuales estén sometidos a alteraciones drásticas. Todo esto es ocasionado porque las industrias requieren mayor demanda de producción poniendo en funcionamiento todos sus equipos. Esto ocasiona que el sistema presente varios perjuicios como: perturbaciones de voltaje, pérdidas de potencia en las líneas, factores de potencia inestables entre otros. Estos problemas generan grandes desafíos para la industria ya que su demanda en producción disminuye al no poder operar eficientemente y por ende también conllevarían pérdidas económicas. Por este motivo se busca proporcionar energía con la menor cantidad de inconvenientes posibles. [5]

1.4 JUSTIFICACIÓN

Una calidad mala de electricidad termina en inconvenientes técnicos y económicos tanto para las empresas distribuidoras que se encargan de prestar este servicio, como para los usuarios o industrias. Por esta razón, es necesario que las líneas de distribución suministren energía eléctrica con niveles de fiabilidad, excelencia y resguardo. Para poder garantizar que la energía eléctrica se encuentre dentro de los factores establecidos se realiza una compensación de potencia reactiva, identificación de armónicos y la atenuación de los mismos lo cual permitirá controlar los parámetros mencionados ayudando a incrementar la eficiencia de la misma. [3]

1.5 DELIMITACIÓN

Este proyecto busca diseñar un sistema de compensación reactiva el cual permitirá mejorar el factor de potencia e incorporar filtros armónicos comprendiendo su uso. Se trabajará mediante el sistema de 14 barras de la IEEE, haciendo referencia a una industria aislada. Los valores o parámetros que se ingresarán al sistema son valores reales que serán proporcionados por una industria metalmecánica. Cabe aclarar que este proyecto técnico está constituido por una metodología heurística. La simulación se realizará en el software ETAP en las instalaciones de la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil.

1.6 BENEFICIARIOS

La colocación de un banco de condensadores en un sistema de distribución aislado es utilizada generalmente para poder alcanzar los siguientes beneficios: disminución de perjuicios de energía, perfeccionamiento de los niveles de voltaje y descargas de capacidad del sistema. Este diseño de compensación de potencia reactiva en distribución busca una solución eficiente a los inconvenientes presentados. El beneficiario directo de este proyecto será la industria ya que podrán recibir energía eléctrica en las mejores condiciones. Se cuentan con herramientas en software que nos ayudan a simular el problema que se desea solucionar. [6]

1.7 OBJETIVOS

1.7.1 OBJETIVO GENERAL

Proponer un sistema de compensación reactiva para distribución con filtros de armónicos que permitan el mejoramiento del factor de potencia mediante el sistema de 14 barras de IEEE.

1.7.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar el esquema del sistema de 14 barras de la IEEE mediante el software ETAP, estableciendo parámetros fuera de las condiciones de eficiencia en el sistema de distribución.
- Simular el diseño propuesto y calculado del sistema de compensación reactiva con filtros armónicos a través del software (ETAP) con la finalidad de aumentar la eficiencia del sistema.
- Demostrar los resultados obtenidos de las simulaciones mediante tablas que nos indiquen el mejoramiento del sistema eléctrico para comparar con los antecedentes presentados.

2. CAPITULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 COMPENSACION REACTIVA

La compensación reactiva es una práctica fundamental en la gestión de sistemas eléctricos para garantizar un funcionamiento eficiente y confiable. A medida que las cargas cambian y la demanda de energía varíe, se producen fluctuaciones en la potencia reactiva, lo que puede afectar la estabilidad del sistema y causar caídas de voltaje. Los dispositivos de compensación reactiva desempeñan un papel esencial en la regulación de estos cambios y en la mejora del factor de potencia. [7]

Las investigaciones en compensación reactiva han evolucionado desde los enfoques estáticos tradicionales hasta soluciones más dinámicas y adaptativas. Los sistemas de compensación estática, como los bancos de capacitores y las bobinas de reactancia, son ampliamente utilizados para corregir el factor de potencia en puntos específicos de la red eléctrica. Sin embargo, los dispositivos de compensación dinámica, como los SVC y STATCOM, ofrecen una respuesta más rápida y precisa a las variaciones de carga y voltaje. [8]

Se han empleado enfoques de control de vanguardia, como el control basado en modos deslizantes y la implementación de lógica difusa, con el propósito de elevar tanto la eficacia como la estabilidad de los sistemas de compensación reactiva. Estos enfoques permiten una adaptación más rápida y precisa a las condiciones cambiantes del sistema eléctrico, reduciendo así las perturbaciones en el voltaje y la potencia reactiva. [7]

2.1.1 BANCO DE CONDESADORES

Un banco de condensadores es un componente fundamental de los sistemas de ajustes del factor de potencia que optimiza la ingesta de potencia reactiva. A la hora de elegir una batería de condensadores es fundamental determinar la potencia total y su distribución en cada uno de sus escalones, así como hacer coincidir los parámetros de los equipos adicionales con los condensadores instalados en la

batería. Una batería de condensadores correctamente diseñada reduce al mínimo los costes de consumo de energía reactiva. [9]

El banco de capacitores es un conjunto de una serie de capacitores que se utilizan para aportar kVAr en el sistema eléctrico y finalmente mejorar el factor de potencia. Los bancos de condensadores en derivación son disposiciones de unidades conectadas en serie/paralelo.

2.1.2 BANCOS CONECTADOS EN ESTRELLA CON CONEXIÓN A TIERRA

Los bancos conectados en estrella están conformados por unidades de capacitores conectados en serie y paralelo por fase y estos proporcionan una ruta de baja impedancia a tierra.

Ventajas:

- Su camino a tierra de baja impedancia proporciona autoprotección inherente para sobre corrientes de rayos y brinda cierta protección contra sobretensiones. Los bancos pueden funcionar sin pararrayos aprovechando la capacidad de los condensadores para absorber la sobretensión.
- Ofrecen un camino de baja impedancia para corrientes de alta frecuencia y por lo tanto pueden usarse como filtros en sistemas con alto contenido armónico.

Desventajas:

- La circulación de corrientes de irrupción y armónicos puede provocar operaciones incorrectas y/o operaciones excesivas en relés y fusibles de protección.
- Se requieren reactores en serie de fases para reducir el voltaje que aparece en el secundario del CT debido al efecto de las corrientes de alta frecuencia y gran amplitud.

2.1.3 BANCOS CONECTADOS EN ESTRELLA SIN CONEXIÓN A TIERRA

Los bancos en estrella sin conexión a tierra no permiten que fluyan corrientes de secuencia cero, corrientes de tercer armónico o grandes corrientes de descarga de condensadores durante fallas a tierra del sistema. Otra ventaja es que las sobretensiones que aparecen en los secundarios del TC no son tan elevadas como en el caso de los bancos puestos a tierra. Sin embargo, el neutro debe estar aislado para voltaje de línea completo porque está momentáneamente en potencial de fase cuando se conmuta el banco o cuando falla una unidad de capacitor en un banco configurado con un solo grupo de unidades. [10]

2.1.2 SVC

Un compensador estático de VAR (SVC) es, según IEEE y CIGRE definido como: “Un generador estático de VAR cuya salida varía para intercambiar corriente capacitiva o inductiva con el fin de estabilizar o controlar parámetros específicos del sistema de energía eléctrica, característicamente voltajes de barra”. [11]

Transforma en un compensador estático de VAR siempre que este equipado con controles externos especiales que permiten al dispositivo ejecutar la compensación deseada de la línea de transmisión, utilizando los requisitos operativos y las variables predominantes del sistema de energía. El objetivo principal del compensador estático de VAR suele ser el control rápido de la tensión en los puntos débiles de una red. La instalación podrá ser en el punto medio de líneas de interconexión o en áreas de carga. [12]

Los SVC pueden mejorar el rendimiento del sistema eléctrico y de los consumidores de varias maneras, como se indica en lo siguiente:

Aplicaciones en el sistema de transmisión:

- Estabiliza las tensiones en sistemas eléctricos débiles.
- Reduce las pérdidas de energía en las redes de transmisión.
- Aumenta la capacidad de transmisión para reducir, aplazar o eliminar la necesidad de nuevas líneas.
- Contribuye a amortiguar las oscilaciones de potencia y tensión. Mejora el control de tensión y estabilidad.

Aplicaciones en el sistema de distribución:

- Estabiliza la tensión en el extremo receptor de líneas de distribución largas.
- Reduce la potencia reactiva absorbida de la red principal, lo que conduce a menores pérdidas y mejores tarifas.
- Equilibra las cargas asimétricas.
- Reduce las fluctuaciones y parpadeo de la luz

2.1.4 STATCOM

Los compensadores estáticos síncronos son dispositivos flexibles de transmisión de corriente alterna. Su objetivo principal es suministrar una cantidad de potencia reactiva ajustable, precisa y de acción rápida al sistema de alimentación de AC al que se encuentran conectados.

Los STATCOM ajustan la magnitud y la polaridad del componente reactivo de la corriente, esto les permite controlar la cantidad y la dirección de flujo de la potencia reactiva intercambiada con el sistema de alimentación de corriente alterna. Los STATCOM se pueden utilizar para compensación de voltaje, reemplazando o completando los bancos de inductores en derivación y esto ofrece una serie de ventajas, como un controlador mucho más estricto de la compensación de voltaje y una mayor estabilidad de la línea durante las variaciones de carga.

Otro punto importante de los STATCOM es que son utilizados comúnmente para la corrección dinámica del factor de potencia en plantas industriales que operan con grandes picos aleatorios de demandas de potencia reactiva. Los STATCOM incrementan el factor de potencia de la planta, minimizan las fluctuaciones de voltaje en la entrada de la planta y reducen los costos operativos de la industria.

[13]

2.2 FACTOR DE POTENCIA

Es el porcentaje de electricidad que se utiliza para realizar un trabajo útil. Se describe como el vínculo entre la “potencia activa o real” utilizada en el circuito, medida en vatios o kilovatios (W o kW), y la potencia aparente expresada en voltamperios o kilovoltiamperios (VA o kVA).

$$\text{Factor de potencia} = \frac{\text{Potencia activa}}{\text{Potencia aparente}}$$

Ecuación 1. Cálculo del factor de potencia

La potencia aparente, es denominada: “potencia total entregada” por la empresa de servicios públicos. Tiene dos componentes: Potencia Activa, la cual es la que alimenta el equipo realizando el trabajo útil y se mide en kW (kilovatios); y la potencia reactiva que genera campos magnéticos para producir el flujo indispensable para el funcionamiento de dispositivos de inducción (motores de CA, transformadores, hornos inductivos, hornos, etc.) y se mide en kVAr (kilovoltio-amperio-reactancia).

Cualquier proceso industrial que utilice motores eléctricos (accionar bombas, ventiladores, transportadores, plantas de refrigeración, etc.) introduce ineficiencias en la red de suministro eléctrico al consumir corrientes adicionales, denominadas "corrientes reactivas inductivas". Aunque estas corrientes no producen energía útil, aumentan la carga en la red de distribución. La ineficiencia se expresa como la conexión entre la potencia útil y la potencia total (kW/kVA), conocida como Factor de Potencia. [14]

2.2.1 BENEFICIOS DE LA CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

Reducir las facturas de energía de los servicios públicos

La eliminación del kVAr del sistema mejora el factor de potencia y reduce las facturas de energía al reducir los kVA en áreas donde se establece una demanda o alguna otra forma de penalización por factor de potencia bajo en la estructura de tarifas de energía de la empresa de servicios eléctricos

Aumento de la capacidad del sistema

La mejora del factor de potencia libera capacidad del sistema y permite agregar cargas adicionales (motores, iluminación, etc.) sin sobrecargar el sistema. Esto se logra agregando capacitores que proporcionan la corriente magnetizante necesaria para motores de inducción y transformadores.

Ganancias de voltaje

Un buen factor de potencia (0,95) proporciona un voltaje "más rígido", normalmente se puede esperar un aumento de voltaje del 1 al 2 % cuando el factor de potencia se lleva a $\pm 0,95$. Las caídas excesivas de voltaje pueden ralentizar los motores y provocar que se sobrecalienten. El bajo voltaje también interfiere con la iluminación, la aplicación adecuada de los controles de motores y los instrumentos eléctricos y electrónicos. Se mejora el rendimiento del motor y también la producción.

Reducir las pérdidas de las líneas

El mejoramiento del factor de potencia en los puntos de carga liberará al sistema de la transmisión de corriente reactiva. Menos corriente supondrá menores pérdidas en el sistema de distribución de la instalación ya que las pérdidas son proporcionales al cuadrado de la corriente. [15]

2.2.2 MÉTODOS DE CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

Corrección del factor de potencia estático o fijo

Los condensadores fijos proporcionan una cantidad constante de potencia reactiva a un sistema eléctrico. Principalmente se aplican a cargas de motores individuales, pero también se pueden aplicar al bus de alimentación principal con el tratamiento adecuado. Los condensadores fijos son adecuados para uso en interiores o exteriores. [15]

Corrección del factor de potencia central o masiva

Se aplica a sistemas eléctricos con cargas fluctuantes. La corrección central del factor de potencia generalmente se instala en la distribución de energía principal.

Los condensadores están controlados por un relé basado en microprocesador, que monitorea continuamente el factor de potencia de la corriente total suministrada al tablero de distribución. Luego, el relé conecta o desconecta condensadores para suministrar capacitancia según sea necesario de manera que mantenga un factor de potencia mejor que un límite preestablecido. [15]

2.3 DISTRIBUCIÓN DE ENERGIA ELECTRICA

La distribución de energía eléctrica está experimentando una transformación significativa debido a las crecientes fuentes de energía sostenible y regenerativa. La adopción de tecnologías de generación distribuida y la creciente demanda de eficiencia energética ha impulsado la necesidad de sistemas de distribución más inteligentes y flexibles.

La integración de sistemas de monitorización y comunicación avanzados en la distribución eléctrica permite una supervisión en tiempo real y un control más preciso de la red. Las automatizaciones tecnológicas como los sistemas de manejo de distribución (DMS) y los sistemas de control de microrredes posibilitan una operatividad más efectiva al mejorar la gestión de la demanda, disminuir las pérdidas energéticas y elevar la calidad del abastecimiento. [16]

2.4 ARMÓNICOS

Cuando una carga no lineal consume una corriente con una forma distinta al del suministro de voltaje se crea un armónico.

Los armónicos son componentes que alteran el sistema energético, degradando la calidad de la energía. Pueden estar presentes en los sistemas eléctricos de manera no deseada en la frecuencia del sistema, en forma de una onda alterada de corriente o voltaje. [17]

Para contrarrestar los armónicos de sistemas existen dispositivos capaces de controlar la frecuencia de señales como, por ejemplo, los filtros de armónicos pasivos y activos. [18]

2.5 DISTORSIÓN ARMÓNICA

La distorsión armónica es una de las perturbaciones que más afecta a la calidad del sistema eléctrico. El uso generalizado de sistemas electrónicos de potencia, (especialmente convertidores de potencia) han aumentado la emisión de armónicos e interarmónicos en una amplia gama de frecuencias. [19]

La distorsión armónica es originada por dispositivos no lineales en el sistema eléctrico. Este dispositivo es aquel en el que la corriente no es proporcional al voltaje aplicado. Cuando se establece un voltaje sinusoidal a una carga no lineal que provoca que la corriente se distorsione. Aumentar el voltaje en un pequeño porcentaje puede hacer que la corriente se duplique y tomar una forma de onda diferente. Esta es la fuente de la mayor distorsión armónica en un sistema de energía. [20]

2.6 ÍNDICES ARMÓNICOS

Las mediciones de distorsión armónica normalmente se dan en “distorsión armónica total” o THD. La cual define la distorsión armónica en términos de la corriente fundamental consumida por una carga. Así, IEEE-519 utiliza un término llamado TDD (distorsión total de la demanda) para expresar la distorsión actual en términos de la máxima fundamental corriente que consume el consumidor. [20]

El orden de un armónico se refiere a la cantidad de veces que es mayor la frecuencia de onda armónica con respecto a la onda fundamental. En este caso con una frecuencia de 60Hz, un orden armónico 3 significara ($3 \cdot 60 = 180\text{Hz}$), recordando que $n =$ Número del orden del armónico.

2.7 EFECTOS DE LOS ARMÓNICOS

La corriente armónica en el transcurso del flujo a través de la red de servicios públicos puede causar una caída de voltaje, crear tensión en la red de distribución de la planta y también provocar un mal funcionamiento de algunos de los equipos electrónicos sensibles. La distorsión de voltaje total es la adición de las caídas de voltaje individuales a través de la impedancia del sistema y su magnitud depende del nivel de corriente armónica individual. [21]

Algunas de las consecuencias negativas de los armónicos en los equipos de planta son las siguientes:

Efectos de la distorsión armónica en tensión

- Transformadores: Fallo prematuro del aislamiento y aumento del ruido.
- Motor eléctrico: Sobrecarga inusual del motor.
- Equipos electrónicos: Mal funcionamiento

Efectos de la distorsión armónica en corriente:

- Transformadores: Sobrecalentamiento del devanado, aumento de las pérdidas de cobre y reducción de la capacidad operativa.
- Motor eléctrico: Reducción de la capacidad operativa, la eficiencia operativa y la vida útil del motor.
- Disyuntores, fusibles y relés: Pueden dañarse y operar erróneamente.
- Condensadores: Provoca efectos de resonancia y daños prematuros.

2.8 INDICADORES DE DISTORSIÓN ARMÓNICA

Existen muchas métricas para cuantificar y evaluar la distorsión armónica, voltaje y corriente en el sistema eléctrico, como factor de potencia, coeficiente potencia máxima, potencia de distorsión, espectro de frecuencia y distorsión armónica. [22]

El poder de distorsión es el resultado del voltaje y la corriente distorsionados. La alteración armónica total de corriente y voltaje (THD) es un valor expresado en porcentaje que brinda una imagen clara sobre la salud del sistema eléctrico de la planta. El factor de cresta es uno de esos indicadores importantes para encontrar picos no deseados en la forma de onda de voltaje y corriente. Para cargas no lineales, el factor de cresta es mucho mayor que 1,5. Un factor de cresta alto indica una alta sobre corriente consumida por el dispositivo. La potencia distorsionadora es la cantidad resultante de la tensión distorsionada y la corriente armónica. Además, la distorsión armónica total es el indicador principal que define el grado de los armónicos en las formas de onda de tensión y corriente sinusoidales. [21]

La regulación “ARCERNNR 002/20” estipula parámetros para un sistema de voltaje e intensidad estables, como se visualiza en la *Tabla 1*.

Nivel de Voltaje	Factor de distorsión armónica individual (%)	THD (%)
Bajo Voltaje	5.0	8.0
Medio Voltaje	3.0	5.0
Alto Voltaje (Grupo 1)	1.5	2.5
Alto Voltaje (Grupo 2)	1.0	1.5

Tabla 1. Rangos estipulados por el ARCERNNR para el THD

2.9 FILTROS ARMÓNICOS

La proliferación de cargas no lineales en la red eléctrica, como computadoras, electrónica de consumo y sistemas de control han aumentado la presencia de armónicos en las formas de onda eléctricas. Estos armónicos pueden distorsionar el voltaje, sobrecargar los transformadores y provocar problemas de resonancia en los sistemas eléctricos. [23]

Los progresos en la tecnología de dispositivos para la eliminación de armónicos han posibilitado abordar estos desafíos de manera efectiva.

2.10 FILTROS PASIVOS

Los filtros armónicos pasivos consisten generalmente en filtros resonantes compuestos de inductores y condensadores sintonizados para anular o atrapar una determinada frecuencia armónica típicamente de orden bajo. Tienen su funcionalidad de mitigación de armónicos sólo en un específico punto de trabajo (es decir, en una carga determinada), lo que representa que lejos de ese punto (generalmente con niveles de carga más bajos), la distorsión armónica no se

minimiza. Además, tienen el efecto de reducir el factor de potencia, sin agrega ningún circuito adicional para compensarlo (inductores paralelos adicionales). Además, insertan la posibilidad de resonancia. Este tipo de filtros es una medida sencilla y rentable para instalaciones o sistemas cerrados en condiciones de trabajo recurrentes. [24]

Los filtros pasivos utilizan componentes pasivos como resistencias, inductores y condensadores, donde su principal función es atenuar la carga del sistema debido a las pérdidas inherentes en los componentes pasivos.

2.11 FILTROS ACTIVOS

Los filtros de armónicos activos son conjuntos electrónicos de potencia usados para anular o reducir la contaminación armónica actual de un establecimiento. El principio de ejecución consiste en medir los armónicos de corriente de la carga, y crear en tiempo real los mismos armónicos, pero en oposición de fase, de tal forma que la suma de ambas corrientes vistas desde la instalación eléctrica no contenga casi armónicos, sino sólo los fundamentales. También tienen la disposición de reducir la potencia reactiva de la carga, es decir, aumentar el factor de potencia a casi 1.

Por causa de su diseño y principio de funcionamiento, la minimización de la distorsión se logra para todos los niveles de carga, dependiendo de la capacidad del filtro activo, y de esta manera no se verán afectados por resonancias ni impedancias de línea.

Así, en equiparación con los filtros pasivos, prometen varias ventajas: compensar varios armónicos al mismo tiempo, rectificar armónicos de orden muy alto, aumentar el factor de potencia de la instalación y brindar más flexibilidad, independiente de la carga o de la impedancia de la fuente. [24]

Los filtros activos se basan en amplificadores operacionales donde su principal función es amplificar la señal de carga además de filtrarla.

2.12 SISTEMA DE 14 BARRAS DE LA IEEE

El sistema de 14 barras de la IEEE como se muestra en la es un sistema de prueba utilizado para determinar diferentes aspectos, en este proyecto técnico fue utilizado ya que constituye una herramienta muy útil por su flexibilidad en las simulaciones de pruebas para poder ejecutar diversas problemáticas y el muestreo de soluciones.

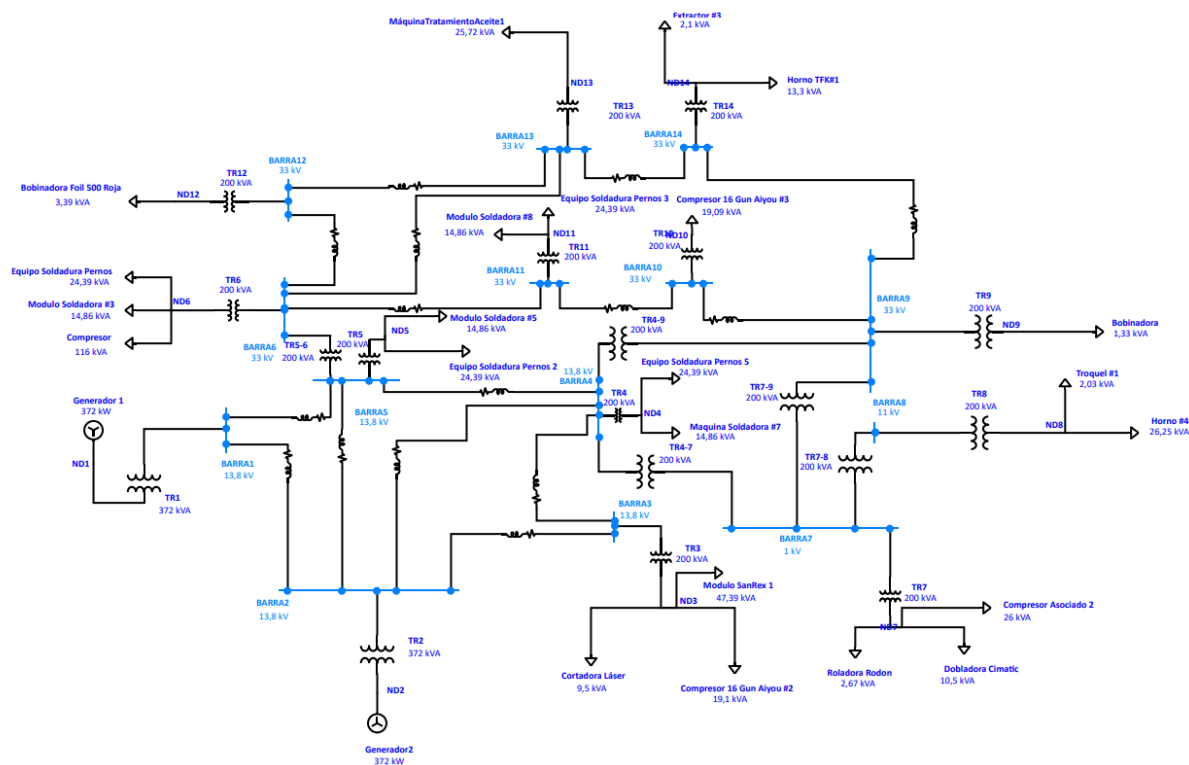


Figura 1. Sistema de 14 Barras de la IEEE

2.13 INTEGRACIÓN Y FUTURAS DIRECCIONES

La convergencia de la compensación reactiva y el filtrado de armónicos está emergiendo como una estrategia integrada con el propósito de aumentar la eficiencia energética. La combinación de dispositivos de compensación dinámica y filtros activos puede proporcionar soluciones completas para mitigar problemas de voltaje y armónicos, especialmente en sistemas con una alta proporción de cargas no lineales y generación distribuida.

En el futuro, se anticipa que la implementación de métodos de aprendizaje

automático y el examen de datos posibilitarán una administración aún más avanzada de los sistemas de corrección de potencia reactiva y la eliminación de armónicos. La optimización basada en datos y la toma de decisiones automatizada podrían permitir una adaptación más rápida y precisa a las cambiantes condiciones del sistema eléctrico. [16]

El diseño de sistemas de compensación reactiva con filtros armónicos es un área en constante evolución que está impulsando mejoras significativas en la eficiencia, confiabilidad y calidad del suministro eléctrico. La combinación de estrategias avanzadas de control, tecnologías de automatización y análisis de datos promete una distribución de energía eléctrica más inteligente y sostenible en el futuro. [25]

3. CAPITULO 3

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE 14 BARRAS DE LA IEEE

3.1 CARACTERISTICAS DE LOS TRANSFORMADORES

En un sistema de distribución, los transformadores conforman una parte fundamental para operar con voltajes adecuados que requieren los equipos, estos transforman altos voltajes a bajos voltajes o viceversa. Este proyecto presenta dos transformadores elevadores, los cuales ayudan a aumentar el voltaje producido por el generador. En total se dispone de 19 transformadores operando en el sistema de 14 barras de la IEEE.

PARAMETROS DE LOS TRANSFORMADORES										
N°	kV		kVA	IMPEDANCIA					Tipo de conexión	Ángulo
	Primario	Secundario		%Z	X/R	R/X	%X	%R		
			Potencia Nominal							
TR1	0,47	13,8	372	7,75	3,09	0,324	7,373	2,386	DY	-30
TR2	0,47	13,8	372	5,75	3,09	0,324	5,471	1,71	DY	-30
TR3	13,8	0,47	200	7,75	3,09	0,324	7,373	2,386	DY	30
TR4	13,8	0,44	200	4,8	4,7	0,213	4,695	0,999	DY	-30
TR5	13,8	0,44	200	7,75	3,09	0,324	7,373	2,386	DY	-30
TR6	33	0,44	200	7,25	3,09	0,324	6,898	2,232	DY	30
TR7	1	0,22	200	4,8	4,7	0,213	4,695	0,999	DY	30
TR8	11	0,22	200	5,2	5,1	0,196	5,103	1,001	DY	-30
TR9	33	0,22	200	7,25	3,09	0,324	6,898	2,232	DY	30
TR10	33	0,38	200	7,25	3,09	0,324	6,898	2,232	DY	-30
TR11	33	0,44	200	7,25	3,09	0,324	6,898	2,232	DY	-30
TR12	33	0,44	200	7,25	3,09	0,324	6,898	2,232	DY	30
TR13	33	0,22	200	7,25	3,09	0,324	6,898	2,232	DY	-30
TR14	33	0,22	200	7,25	3,09	0,324	6,898	2,232	DY	-30
TR5-6	33	13,8	200	9	5,79	0,173	8,869	1,532	DY	-30
TR4-9	33	13,8	200	9	2,47	0,405	8,342	3,377	DY	30
TR4-7	13,8	1	200	7,75	5,79	0,173	7,637	1,319	DY	30
TR7-8	11	1	200	5,75	5,79	0,173	5,666	0,979	DY	30
TR7-9	33	1	200	7,25	5,79	0,173	7,144	1,234	DY	30

Tabla 2. Parámetros de los transformadores sin flujo de carga

3.2 CARACTERISTICAS DE LAS CARGAS

Otro de los elementos en este proyecto son las cargas que presenta el sistema, las cuales conforman la parte final del sistema de distribución, convirtiendo la energía eléctrica a otra forma de energía. En el proyecto se presentan diferentes cargas, las cuales son valores reales, cuyos datos fueron proporcionados por la empresa “MORETRAN C.A”.

Este sistema posee diferentes tipos de equipos que normalmente son utilizados en el área de metalmecánica.

PARAMETRO DE LAS CARGAS							
N°	Carga	kV	kVA	kW	kvar	%PF	Amps
1	Bobinadora Foil 500 Roja	0,44	3,39	2,37	2,42	70	4,45
2	Equipo Soldadura Pernos	0,44	24,39	20,73	12,85	85	32
3	Modulo Soldadora #3	0,44	14,86	10,55	10,46	71	19,5
4	Compresor	0,44	116	81,2	82,84	70	152
5	Modulo soldadora #5	0,44	14,86	10,55	10,46	71	19,5
6	Equipo Soldadura Pernos 2	0,44	24,39	20,73	12,85	85	32
7	Equipo Soldadura Pernos 3	0,44	24,39	20,73	12,85	85	32
8	Modulo Soldadora #8	0,44	14,86	10,55	10,46	71	19,5
9	Maquina Trtatamiento Aceite 1	0,22	25,72	19,29	17,01	75	67,5
10	Compresor 16 Gun Aiyou #2	0,38	19,1	14,3	12,6	75	29
11	Cortadora Laser	0,38	9,5	6,7	6,7	71	14,5
12	Modulo SanRex 1	0,38	47,39	33,17	33,84	70	72
13	Equipo Soldadura Pernos 5	0,44	24,39	20,73	12,85	85	32
14	Maquina Soldadora #7	0,44	14,86	10,61	10,4	71,4	19,5
15	Roladora Rodon	0,22	2,67	1,9	1,88	71	7,01
16	Dobladora Cimatic	0,22	10,5	7,4	7,5	70	27,6
17	Compresor Asociado 2	0,22	26	19,5	17,2	75	68,23
18	Compresor 16 Gun Aiyou #3	0,38	10,09	16,23	10,06	85	29
19	Extractor #3	0,22	2,1	1,47	1,5	70	5,51
20	HornoTFK#1	0,22	13,3	9,3	9,5	70	35
21	Bobinadora	0,22	1,33	0,931	0,95	70	3,49
22	Horno #4	0,22	26,25	18,38	18,75	70	68,89
23	Troquel #1	0,22	2,03	1,44	1,44	70,71	5,33

Tabla 3. Parámetros de las cargas sin flujo de carga.

3.3 CARACTERISTICAS DE LAS BARRAS

Este proyecto está basado en una metodología heurística, la cual se ha tomado como base principal el sistema de 14 barras de la IEEE y ha sido ejecutado mediante el software de “ETAP”. Los datos que se encuentran en las barras van de acuerdo a los elementos o cargas a las cuales se encuentran conectadas, esto quiere decir que, si una barra se encuentra conectada a lado secundario del transformador elevador con un voltaje de 13,8 kV, la barra asumiría ese valor como voltaje nominal. Para poder llegar al voltaje requerido por la carga se coloca un

transformador, el cual ayudara a que la carga obtenga el voltaje necesario para poder operar.

PARAMETROS DE LAS BARRAS					
N°	Nominal Kv	Operación			Voltaje Inicial kV
		%V	Kv	Angulo	Linea a Neutro (A - B - C)
1	13,8	96,833	13,363	-1	7,967
2	13,8	96,832	13,363	-1	7,967
3	13,8	96,833	13,363	-1	7,967
4	13,8	96,832	13,363	-1	7,967
5	13,8	96,832	13,363	-1	7,967
6	33	92,934	30,668	-2,5	19,053
7	1	93,857	0,939	-2,1	0,577
8	11	93,235	10,256	-2,5	6,351
9	33	92,934	30,668	-2,5	19,053
10	33	92,934	30,668	-2,5	19,053
11	33	92,934	30,668	-2,5	19,053
12	33	92,934	30,668	-2,5	19,053
13	33	92,934	30,668	-2,5	19,053
14	33	92,934	30,668	-2,5	19,053

Tabla 4. Parámetros de las barras sin flujo de carga.

3.4 CARACTERISTICAS DE LOS GENERADORES

Se trata de un sistema de distribución, donde su principal fuente de energía son dos generadores síncronos con una potencia de 372 kW, los cuales ayudan a operar a todo el sistema con un total de 31 cargas, el mismo que tiene problemas de bajos factores de potencia y presencia de armónicos.

PARÁMETROS DE LOS GENERADORES							
Elemento	kW	kV	%PF	kVA	%Eff	Operación	
						kW	kVAr
Generador 1	372	0,47	85	437,6	95	134,6	130,9
Generador 2	372	0,47	90	413,3	95	181,4	176,4

Tabla 5. Parámetros de los generadores sin flujo de carga.

3.5 FLUJO DE CARGA DEL SISTEMA

La ejecución del flujo de carga al sistema permite visualizar de mejor manera los parámetros que se requieren para de esta manera realizar los respectivos cálculos y encontrar una solución óptima de operación al sistema. Estos indicadores son los siguientes:

Potencia activa (**kW**)

Potencia reactiva (**kVAr**)

Potencia aparente (**kVA**)

Corriente (**A**)

Factor de potencia (**%PF**)

De esta manera se podrá identificar las áreas críticas del sistema donde se tendrá que evaluar con un diseño de compensación reactiva, dando lugar al mejoramiento de los factores de potencia en el sistema.

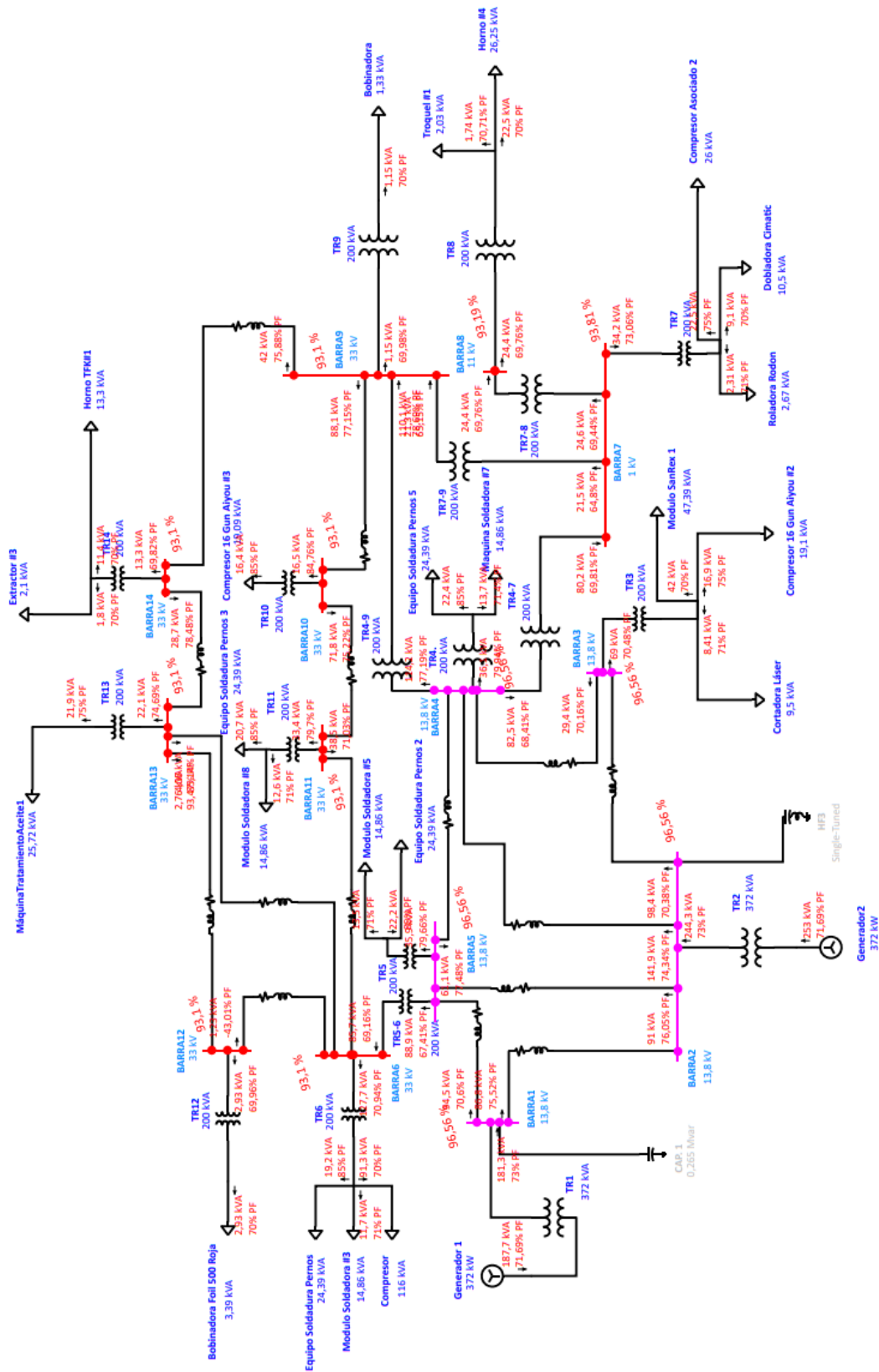


Figura 2. Ejecución del flujo de carga del sistema sin banco de condensadores, sin filtro armónico

3.6 FACTORES DE POTENCIA DEL SISTEMA

3.6.1 ÍNDICADORES DE LAS BARRAS CON FLUJO DE CARGA

Se presentan parámetros de las barras cuando el sistema se encuentra en operación. De esta forma se observan los elementos dentro del sistema que poseen un bajo factor de potencia

Como se muestra en la *Tabla 6*, se observa la carga de kilovatios (también conocida como potencia activa), la potencia reactiva y la carga de los amperios. El porcentaje de voltaje que se presenta tiene relación con la tensión nominal, esto quiere decir que, si tenemos una tensión de 13,8 kV en la **“BARRA 1”**, indica que en esa barra tenemos un 96,57% de esa tensión.

La regulación **“ARCERNR 002/20”** establece que los niveles de voltaje no deben sobrepasar una variación en medio voltaje de $\pm 6.0\%$.

PARAMETROS DE LAS BARRAS EN OPERACIÓN					
N°	Nominal Kv	%Voltaje	kW Loanding	kvar Loanding	Amp Loanding
1	13,8	96,56	132,3	123,9	7,854
2	13,8	96,56	244	223,9	14,35
3	13,8	96,56	69,27	69,92	4,265
4	13,8	96,56	173,5	154,5	10,07
5	13,8	96,56	135,9	126	8,031
6	33	93,1	90,6	91,13	2,415
7	1	93,81	55,97	57,4	49,34
8	11	93,19	17,03	17,49	1,375
9	33	93,1	100,6	84,17	2,465
10	33	93,1	67,93	56,02	1,655
11	33	93,1	53,98	47,29	1,349
12	33	93,1	2,58	2,1	0,063
13	33	93,1	22,56	17,82	0,54
14	33	93,1	31,83	27,32	0,788

Tabla 6. Parámetros de las barras con flujo de carga.

Nivel de Voltaje	Rango admisible
Alto Voltaje (Grupo 1 y Grupo 2)	± 5.0 %
Medio Voltaje	± 6.0 %
Bajo Voltaje	± 8.0 %

Tabla 7. Rangos de voltaje admitidos según ARCERNR 002/20.

3.6.2 ÍNDICADORES DE LAS CARGAS CON FLUJO DE CARGA

En la *Tabla 8* se analiza de mejor manera varios indicadores de las cargas cuando el sistema se encuentra en operación. Entre ellos a destacar el indicador de factor de potencia (%PF), que nos señala cuales son las cargas que presentan un bajo factor de potencia y requieren que sean analizadas para poder corregir ese parámetro importante en un sistema de distribución dentro de una industria.

PARAMETRO DE LAS CARGAS EN OPERACIÓN							
N°	Carga	kV nominal	kW	kvar	Amp	%PF	% Voltaje
1	Bobinadora	0,22	0,806	0,822	3,248	70	93,1
2	Bobinadora Foil 500 Roja	0,44	2,05	2,09	4,137	70	93
3	Compresor	0,44	63,89	65,18	135	70	88,8
4	Compresor 16 Gun Aiyou #2	0,38	12,68	11,19	27,31	75	94,2
5	Compresor 16 Gun Aiyou #3	0,38	13,92	8,62	26,86	85	92,6
6	Compresor Asociado 2	0,22	16,9	14,9	63,52	75	93,1
7	Cortadora Láser	0,38	5,97	5,92	13,58	71	93,7
8	Dobladora Cimatic	0,22	6,37	6,5	25,65	70	92,9
9	Equipo Soldadura Pernos	0,44	16,31	10,11	28,39	85	88,7
10	Equipo Soldadura Pernos 2	0,44	18,86	11,69	30,52	85	95,4
11	Equipo Soldadura Pernos 3	0,44	17,56	10,88	29,45	85	92
12	Equipo Soldadura Pernos 5	0,44	19,06	11,81	30,69	85	95,9
13	Extractor #3	0,22	1,26	1,29	5,105	70	92,6
14	Horno #4	0,22	15,76	16,08	63,8	70	92,6
15	Horno TFK#1	0,22	7,99	8,15	32,33	70	92,4
16	Maquina Soldadora #7	0,44	9,75	9,57	18,7	71,4	95,9
17	Modulo SanRex 1	0,38	29,37	29,97	67,75	70	94,1
18	Modulo Soldadora #3	0,44	8,3	8,23	17,3	71	88,7
19	Modulo Soldadora #5	0,44	9,6	9,52	18,6	71	95,4
20	Modulo Soldadora #8	0,44	8,94	8,86	17,94	71	92
21	Máquina Tratamiento Aceite 1	0,22	16,45	14,51	62,34	75	92,3
22	Roladora Rodon	0,22	1,64	1,63	6,523	71	93,1
23	Troquel #1	0,22	1,23	1,23	4,934	70,71	92,6

Tabla 8. Parámetros de las cargas con flujo de carga

3.6.3 ÍNDICADORES DE LOS GENERADORES CON FLUJO DE CARGA

Teniendo en cuenta que la eficiencia del uso de la energía se puede analizar mediante un indicador (factor de potencia) y la importancia de mantener este factor cercano a la unidad, los generadores también afectados al no tener una óptima eficiencia de uso de energía.

PARAMETROS DE LOS GENERADORES EN OPERACIÓN						
Elemento	kv nominal	kW	kvar	Amp	%PF	%Generacion
Generador 1	0,47	134,6	130,9	230,6	71,69	36,2
Generador 2	0,47	181,4	176,4	310,8	71,69	48,8

Tabla 9. Parámetros de los generadores con flujo de carga

3.6.4 ÍNDICADORES DE LOS TRANSFORMADORES CON FLUJO DE CARGA

Los transformadores también sufren afectaciones por los bajos factores de potencia llevándolos a sobrecargas, haciendo que las pérdidas aumenten considerablemente en correlación al flujo de corriente, perjudicando al sistema de la industria.

PARAMETROS DE LOS TRANSFORMADORES								
N°	Flujo de kW	Flujo de kvar	Flujo de Amp	%PF	% Volatje	% Caída de Volataje	Perdidas de kW	Perdidas de kvar
TR1	134,6	130,9	230,6	71,69	48,7	3,44	2,26	6,99
TR2	181,4	176,4	310,8	71,69	65,7	3,44	3,05	9,42
TR3	48,64	48,96	2,99	70,48	33,6	2,46	0,609	1,88
TR4-7	56,46	60,19	3,576	68,41	40,1	2,75	0,482	2,79
TR4-9	88,18	72,64	4,95	77,19	55,1	3,46	1,51	4,66
TRA4	28,88	21,71	1,565	79,94	17,9	0,68	0,0699	0,329
TR5	28,62	21,72	1,557	79,66	17,7	1,18	0,165	0,51
TR5-6	59,92	65,65	3,851	67,41	42,8	3,46	0,649	3,76
TR6	90,6	90,02	2,4	70,94	60,8	4,39	2,1	6,49
TR7	24,98	23,34	21,04	73,06	17	0,72	0,0663	0,312
TR7-8	17,06	17,68	15,12	69,44	12,2	0,62	0,0336	0,194
TR7-9	13,93	16,38	13,23	64,8	10,7	0,71	0,0324	0,188
TR8	17,03	17,49	1,375	69,76	12,1	0,57	0,0343	0,175
TR9	0,806	0,823	0,022	69,98	0,6	0,04	0,0002	0,0005
TR10	13,95	8,73	0,309	84,76	8,2	0,49	0,0349	0,108
TR11	26,64	20,19	0,628	79,7	16,5	1,06	0,144	0,445
TR12	2,05	2,1	0,055	69,96	1,5	0,1	0,0011	0,0034
TR13	16,52	14,7	0,416	74,69	11	0,74	0,063	0,195
TR14	9,27	9,51	0,25	69,82	6,6	0,46	0,0227	0,0702

Tabla 10. Parámetros de los transformadores con flujo de carga

3.7 ARMÓNICOS PRESENTES EN EL SISTEMA

Se presentan en las tablas y gráficos a continuación los valores resultantes del flujo de corriente armónica. El porcentaje de RMS (valor cuadrático medio) y el porcentaje THD (distorsión armónica total), también conocido como las sumatorias de los espectros individuales (la tasa de distorsión total de tensión).

3.7.1 ARMÓNICOS EN PRESENTES EN EL SISTEMA SIN EL BANCO DE CAPACITORES

ARMONICOS EN LAS BARRAS SIN CAPACITOR		
Nº	%RMS	THD
1	89,19	20,26
2	89,19	20,26
3	89,18	20,26
4	89,18	20,26
5	89,18	20,26
6	74,32	19,06
7	91,28	56,8
8	80,34	17,36
9	74,32	19,06
10	74,32	19,06
11	74,32	19,06
12	74,32	19,06
13	74,32	19,06
14	74,32	19,06

Tabla 11. Distorsión armónica total sin CAP

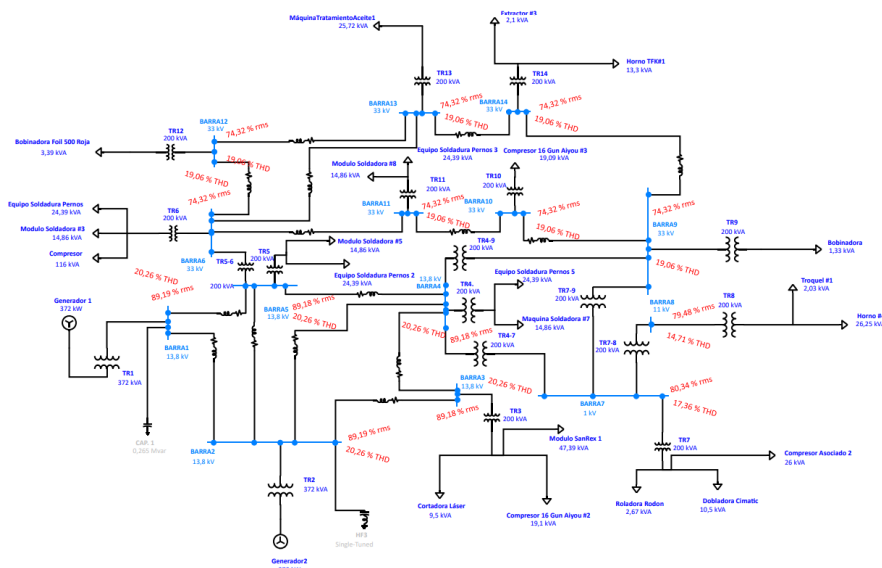


Figura 3. Flujo de carga armónica sin el banco de capacitores

3.7.2 ARMÓNICOS EN PRESENTES EN EL SISTEMA CON EL BANCO DE CAPACITORES

ARMONICOS EN LAS BARRAS CON CAPACITOR		
N°	%RMS	THD
1	94,34	34,59
2	94,33	34,59
3	94,33	34,59
4	94,33	34,59
5	94,33	34,59
6	78,6	33,83
7	84,67	31,63
8	83,9	30,77
9	33,83	78,6
10	33,83	78,6
11	33,83	78,6
12	33,83	78,6
13	33,83	78,6
14	33,83	78,6

Tabla 12. Distorsión armónica total con CAP

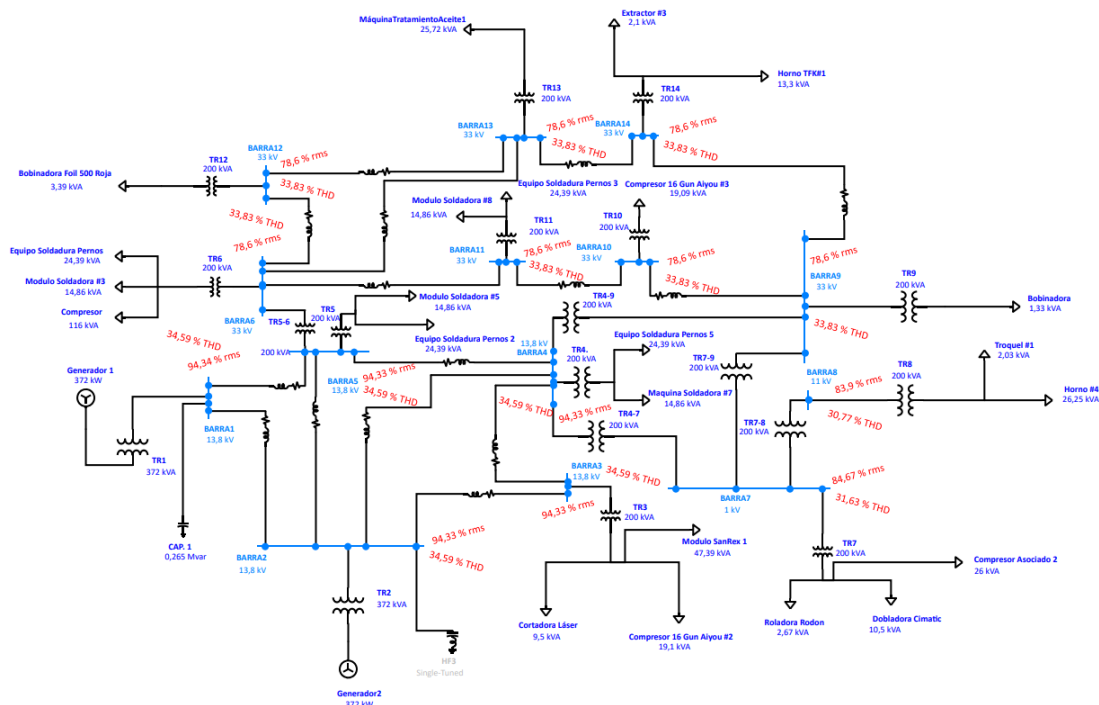


Figura 4. Flujo de carga armónica con el banco de capacitores

3.7.3 ARMÓNICOS CON MAYOR PRESENCIA EN EL SISTEMA

Al realizar el flujo de carga armónico sobre el sistema, por medio del control deslizante de orden armónico se determina que el quinto armónico es el que tiene mayor presencia. En la *Tabla 13* y la *Figura 5* se observan los valores del porcentaje de RMS y los grados en el quinto armónico.

ARMONICOS DE QUINTO ORDEN		
N°	%RMS	GRADOS
1	30,62	42,59
2	30,62	42,59
3	30,62	42,59
4	30,62	42,59
5	30,62	42,59
6	25,02	29,89
7	25,04	57,83
8	24,28	19,74
9	25,02	29,89
10	25,02	29,89
11	25,02	29,89
12	25,02	29,89
13	25,02	29,89
14	25,02	29,89

Tabla 13. Armónicos de quinto orden en el sistema

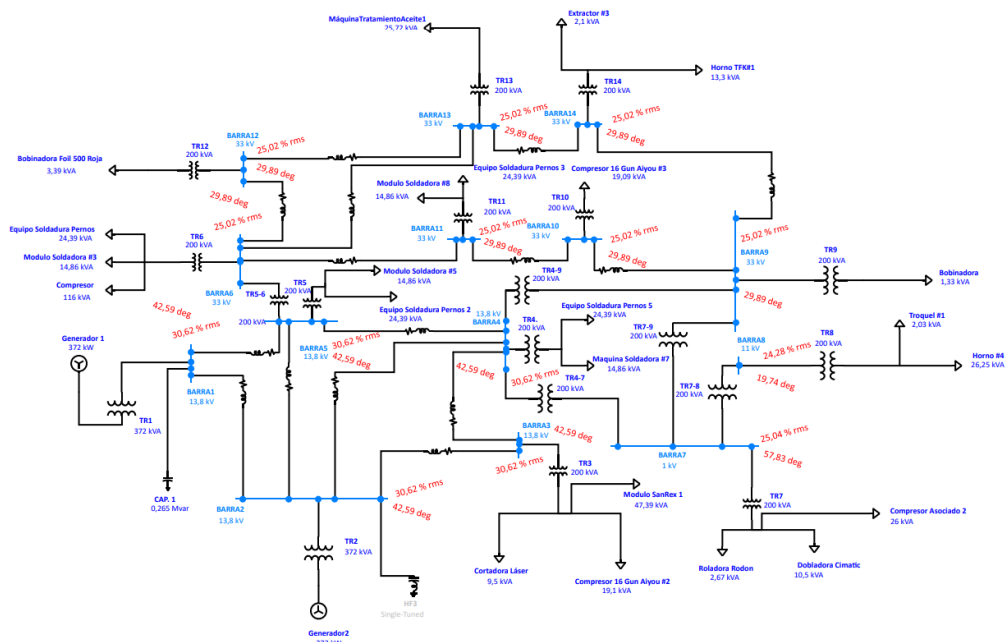


Figura 5. Flujo de carga en el quinto armónico

3.8 FORMA DE ONDA Y ESPECTROS

En la **Figura 6**, se observa el aspecto de onda de la **“BARRAS 1”** y **“BARRA 2”** son idénticas debido a que su conexión en paralelo y mismo voltaje, sin embargo, la distorsión en la onda se debe al amónico que presenta.

Con respecto a los espectros de las barras en cuestión, ambas poseen el mismo porcentaje de espectro de voltaje cercano a 30% con una frecuencia de 300 Hz.

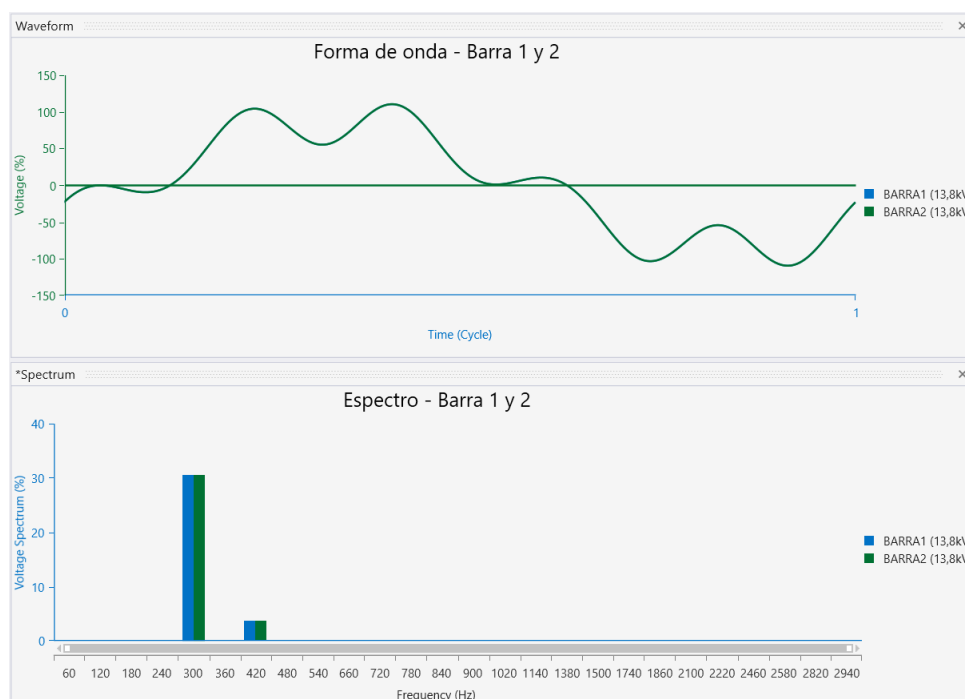


Figura 6. Forma de onda y espectro de las barras 1 y 2

En la **Figura 7**, la forma de onda es igual a la anterior y debido a que estas barras son del mismo voltaje y están conectadas en paralelo, por ende, tendrán la misma distorsión armónica y espectros de voltaje.

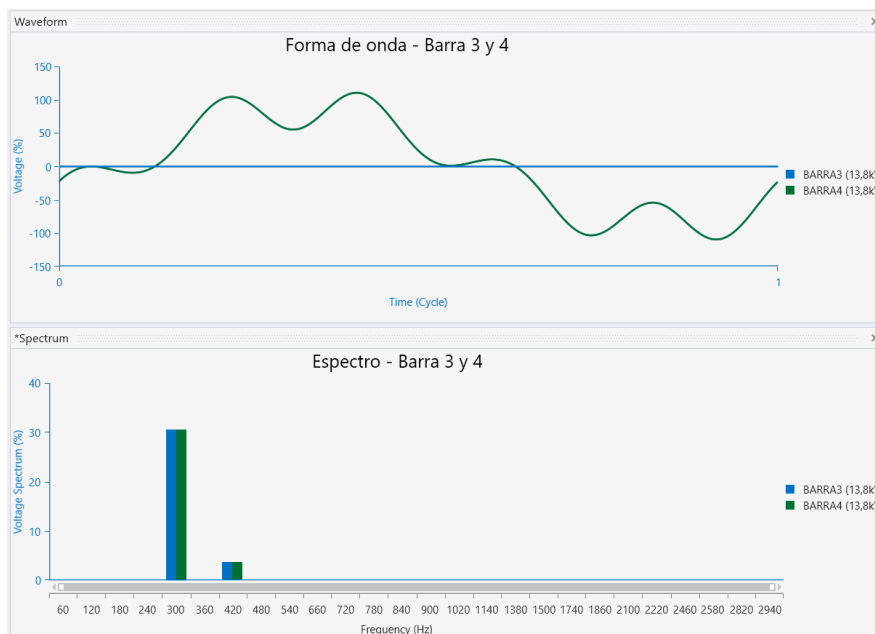


Figura 7. Forma de onda y espectro de las barras 3 y 4

Para la **Figura 8**, se observan diferentes distorsiones de onda debido a que cada barra es de diferente voltaje, la **"BARRA 5"** que tiene un voltaje de 13,8 kV el pico de la onda es más elevado en diferencia al de la **"BARRA 6"** de 33 kV. Los espectros la frecuencia varían en el porcentaje de espectro de voltaje.

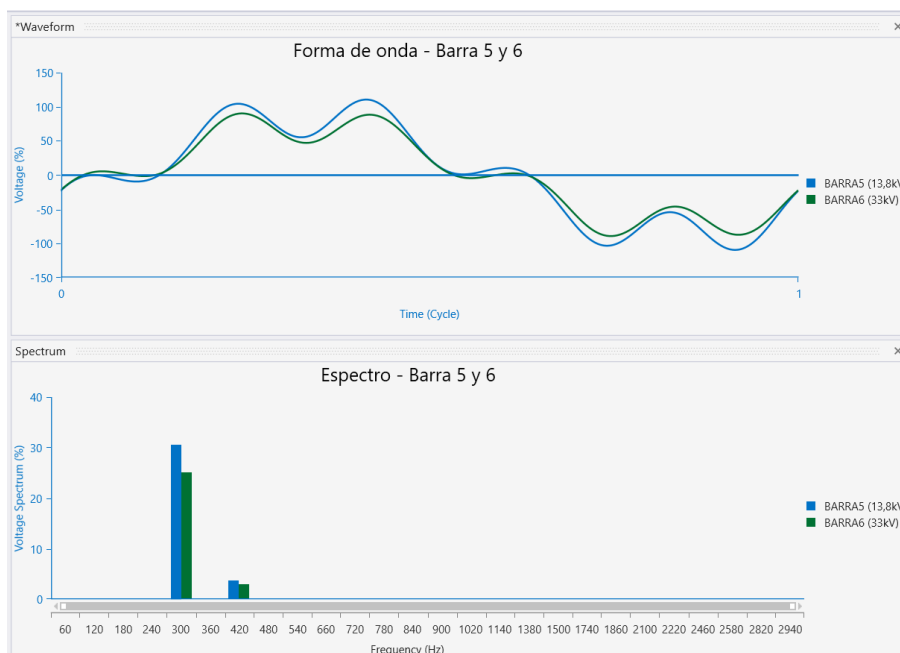


Figura 8. Forma de onda y espectro de las barras 5 y 6

En el caso de la **Figura 9**, se presenta la apariencia de la onda y espectro de la **“BARRA 7”** y **“BARRA 8”**, variando la distorsión entre ambas debido a los diferentes voltajes de cada una. La **“BARRA 8”** tiende a elevarse más al principio de su forma de onda, pero la que alcanza mayor elevación en su totalidad es la **“BARRA 7”**. De igual manera esta barra presenta diferentes espectros en frecuencias de 180 Hz, 420 Hz y 540 Hz.

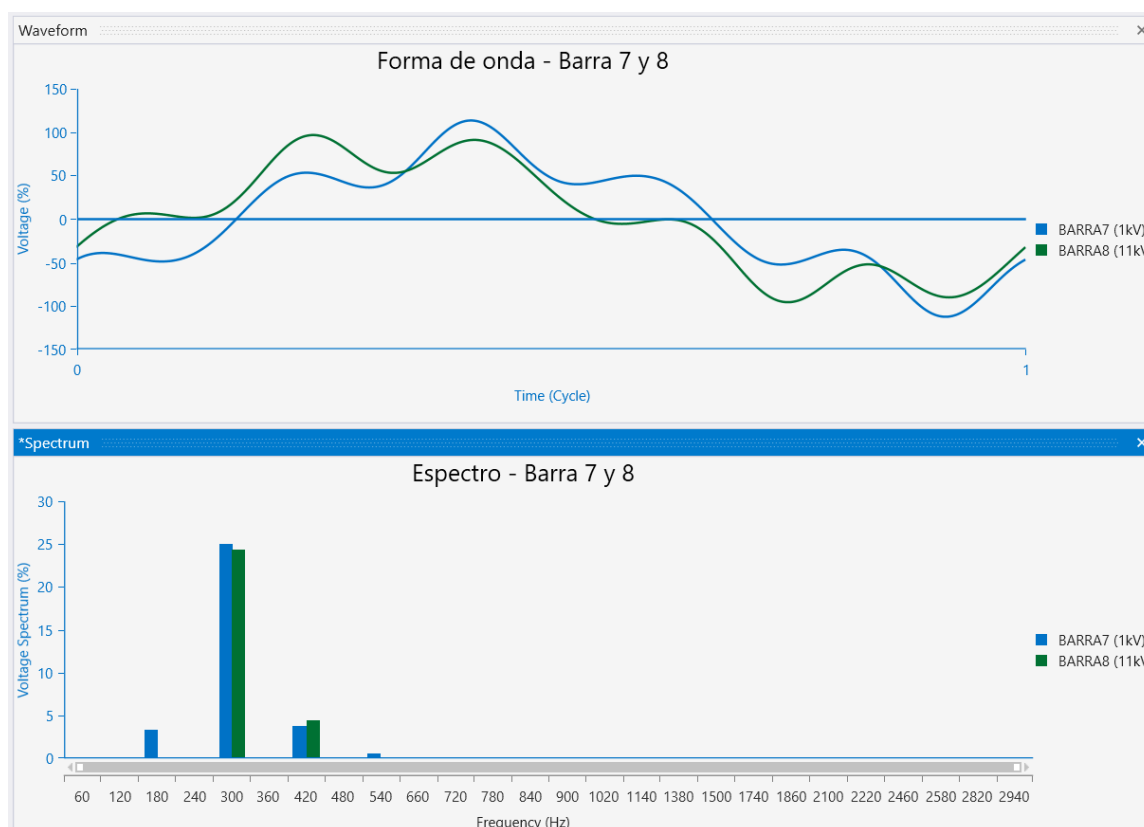


Figura 9. Forma de onda y espectro de las barras 7 y 8

Para el caso de la **“Figura 10”**, **“Figura 11”** y **“Figura 12”**, las formas de onda son las mismas debido a su voltaje de 33kV y su conexión en paralelo, de igual manera se presenta igualdad en los espectros de frecuencia con distorsión armónica.

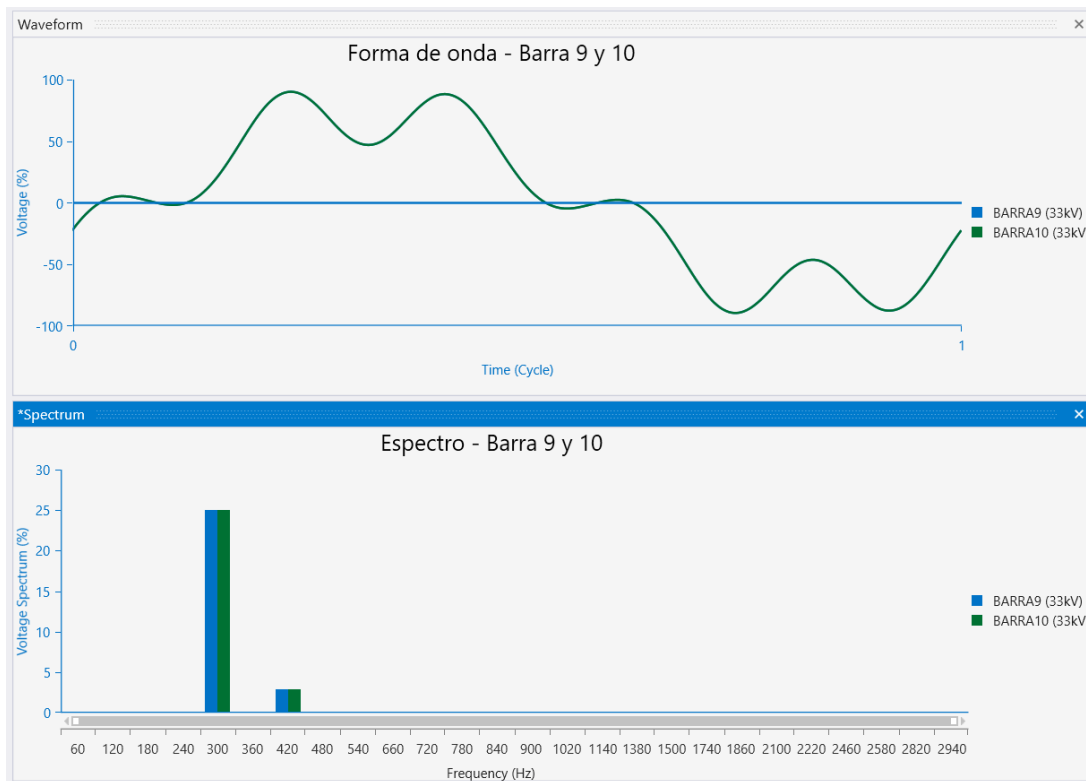


Figura 10. Forma de onda y espectro de las barras 9 y 10

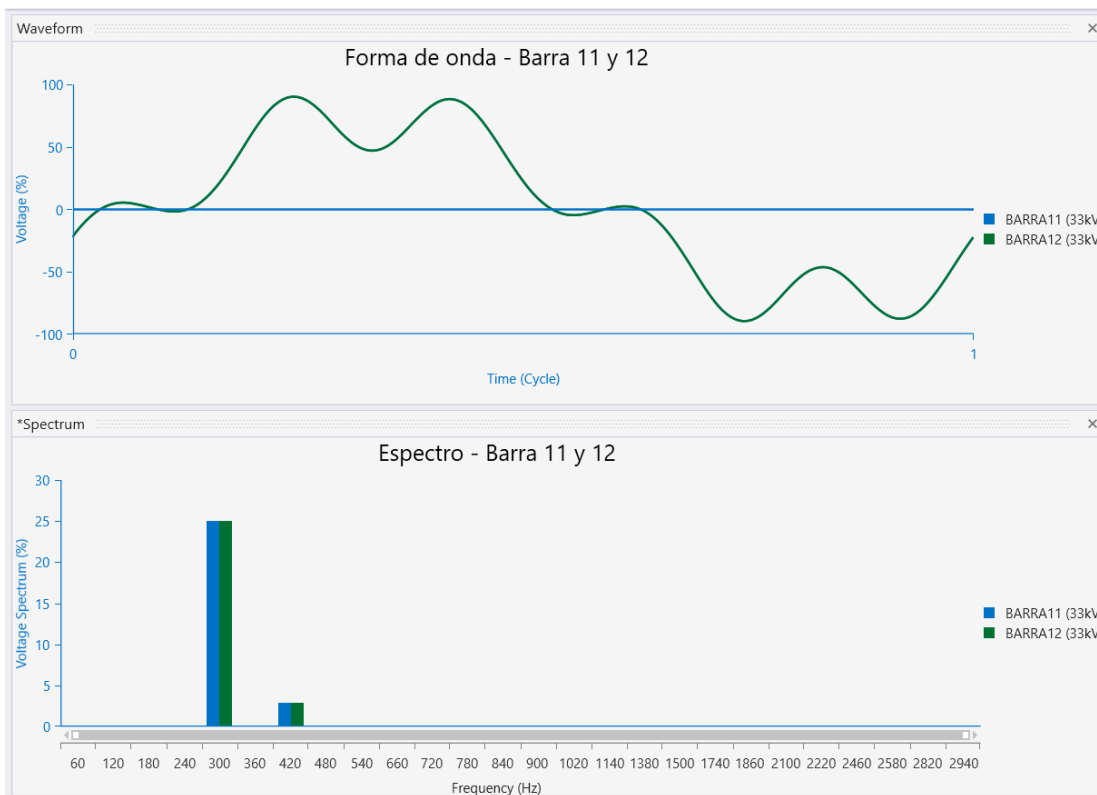


Figura 11. Forma de onda y espectro de las barras 11 y 12

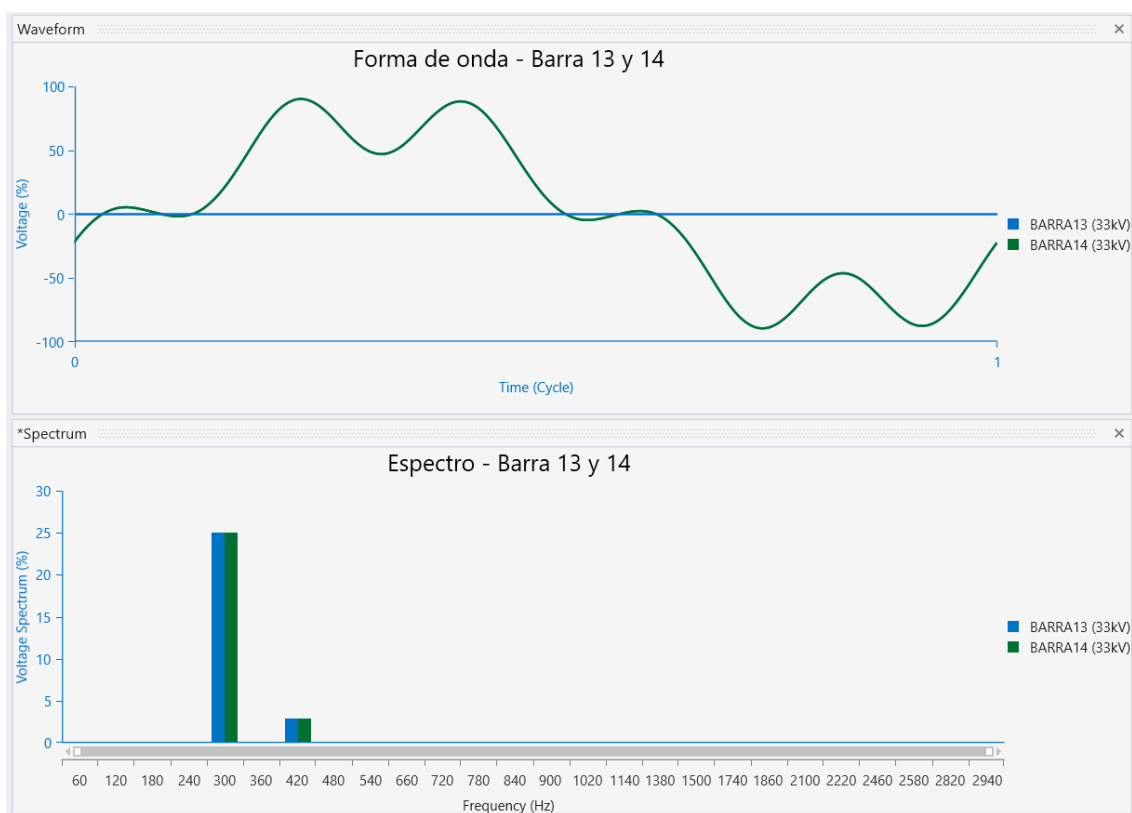


Figura 12. Forma de onda y espectro de las barras 13 y 14

4. CAPITULO 4

DESARROLLO Y METODOLOGIA

4.1 UBICACIÓN ÓPTIMA DEL SISTEMA DE COMPENSACIÓN REACTIVA

Los generadores son máquinas síncronas que tienen un impacto significativo en todo el sistema eléctrico donde están conectados. Teniendo impacto en la estabilidad de voltaje, calidad de energía, eficiencia y factor de potencia del sistema. Para que operen varios generadores en paralelo y puedan suministrar energía estable al sistema, deben estar sincronizados en términos de frecuencia, fase y voltaje.

En este sistema de 14 barras la localización del “GENERADOR 1” y “GENERADOR 2” se da en la “BARRA 1” y “BARRA 2” respectivamente para que pueden trabajar en paralelo suministrando energía al sistema.

En los resultados del flujo de potencia del sistema, se observa que el generador “GENERADOR 1” presenta un factor de potencia bajo de 71,63%. Recordemos que los generadores son máquinas síncronas que afectan a todo el sistema, por lo tanto, se realizará una compensación reactiva a través de un banco de condensadores conectado a la barra “BARRA 1” debido a que está conectado directamente al “GENERADOR 1” y paralelamente a la “BARRA 2”, teniendo un impacto directo en el “GENERADOR 2”.

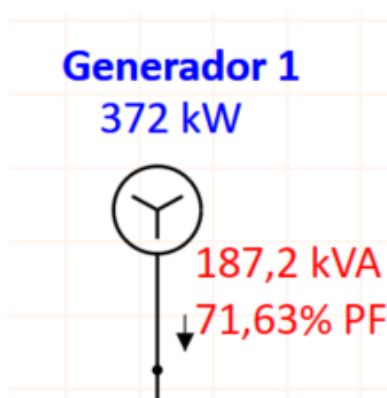


Figura 13. Factor de potencia del generador 1

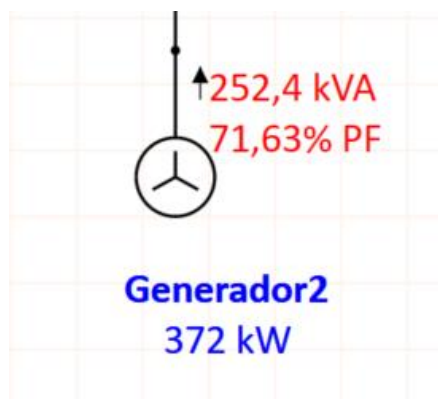


Figura 14. Factor de potencia del generador 2

4.1.1 FORMULACIÓN DE CALCULOS PARA LA CORECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA

Hay que recordar que el factor de potencia indica el rendimiento y efectividad de una instalación, expresado por la siguiente ecuación:

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{Q}{P}\right)^2}}$$

Ecuación 2. Cálculo del factor de potencia

P: Potencia activa (MW), genera trabajo en el sistema.

Q: Potencia reactiva (MVAR), genera el campo magnético necesario para el funcionamiento de equipos inductivos.

S: Suma vectorial de potencia activa y reactiva, encargada de alimentar la carga en MVA.

Se podrá establecer la potencia reactiva que será suministrada por el banco de condensadores que elevará el factor de potencia con la siguiente fórmula:

$$Q_c = [\tan(\cos^{-1}PF_{old}) - \tan(\cos^{-1}PF_{new})] * P$$

Ecuación 3. Cálculo de la potencia reactiva

Donde:

Q_c= Potencia reactiva del banco de condensadores en MVAR.

PF_{old}= Factor de potencia actual.

PF_{new}= Factor de potencia objetivo.

P= Potencia activa (MW).

Donde se pueda remplazar el siguiente factor por “**a**”:

$$a = [\tan(\cos^{-1}PF_{old}) - \tan(\cos^{-1}PF_{new})]$$

Se continua con la siguiente ecuación:

$$Q_c = a * P$$

Con la **Ecuación 2**, se obtiene:

$$FP = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{E_{REACTIVA}}{E_{ACTIVA}}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{0.131}{0.134}\right)^2}} =$$

$$FP = 0.715$$

	ID	MW	Mvar	% PF
▶ 1	Generador 1	0,134	0,131	71,63
2	Generador2	0,181	0,176	71,63

Figura 15. Factor de potencia de los generadores

Es necesario aumentar este valor para evitar multas e interrupciones de servicio debido al deficiente factor disponible.

4.1.2 DIMENSIONAMIENTO DEL BANCO DE CAPACITORES

De los resultados anteriores se tiene que:

$$PF_{old} = 0.715$$

Potencia total del equipo:

$$P = 0.372 \text{ MW}$$

Factor de potencia objetivo:

$$PF_{new} = 0.97$$

Para mejorar el factor de potencia será necesario cubrir la potencia reactiva en el “GENERADOR 1”, a través de compensación reactiva realizada en un banco de condensadores. El factor “ a ”, será obtenido de la *Tabla 14*.

Antes de la compensación		Potencia del condensador en kVAr a instalar por kW de carga para aumentar el factor de potencia ($\cos \phi$) o la $\text{tg } \phi$ a un valor dado.													
$\text{tg } \phi$	$\cos \phi$	0,75	0,59	0,48	0,46	0,43	0,40	0,36	0,33	0,29	0,25	0,20	0,14	0,0	
$\text{tg } \phi$	$\cos \phi$	0,80	0,86	0,90	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	1,00	
2,29	0,40	1,557	1,691	1,805	1,832	1,861	1,895	1,924	1,959	1,998	2,037	2,085	2,146	2,288	
2,22	0,41	1,474	1,625	1,742	1,769	1,798	1,831	1,840	1,896	1,935	1,973	2,021	2,082	2,225	
2,16	0,42	1,413	1,561	1,681	1,709	1,738	1,771	1,800	1,836	1,874	1,913	1,961	2,022	2,164	
2,10	0,43	1,356	1,499	1,624	1,651	1,680	1,713	1,742	1,778	1,816	1,855	1,903	1,964	2,107	
2,04	0,44	1,290	1,441	1,558	1,585	1,614	1,647	1,677	1,712	1,751	1,790	1,837	1,899	2,041	
1,98	0,45	1,230	1,384	1,501	1,532	1,561	1,592	1,628	1,659	1,695	1,737	1,784	1,846	1,988	
1,93	0,46	1,179	1,330	1,446	1,473	1,502	1,533	1,567	1,600	1,636	1,677	1,725	1,786	1,929	
1,88	0,47	1,130	1,278	1,397	1,425	1,454	1,485	1,519	1,532	1,588	1,629	1,677	1,758	1,881	
1,83	0,48	1,076	1,228	1,343	1,370	1,400	1,430	1,464	1,497	1,534	1,575	1,623	1,684	1,826	
1,78	0,49	1,030	1,179	1,297	1,326	1,355	1,386	1,420	1,453	1,489	1,530	1,578	1,639	1,782	
1,73	0,50	0,982	1,232	1,248	1,276	1,303	1,337	1,369	1,403	1,441	1,481	1,529	1,590	1,732	
1,69	0,51	0,936	1,087	1,202	1,230	1,257	1,291	1,323	1,357	1,395	1,435	1,483	1,544	1,686	
1,64	0,52	0,894	1,043	1,160	1,188	1,215	1,249	1,281	1,315	1,353	1,393	1,441	1,502	1,644	
1,60	0,53	0,850	1,000	1,116	1,144	1,171	1,205	1,237	1,271	1,309	1,349	1,397	1,458	1,600	
1,56	0,54	0,809	0,959	1,075	1,103	1,130	1,164	1,196	1,230	1,268	1,308	1,356	1,417	1,559	
1,52	0,55	0,769	0,918	1,035	1,063	1,090	1,124	1,156	1,190	1,228	1,268	1,316	1,377	1,519	
1,48	0,56	0,730	0,879	0,996	1,024	1,051	1,085	1,117	1,151	1,189	1,229	1,277	1,338	1,480	
1,44	0,57	0,692	0,841	0,958	0,986	1,013	1,047	1,079	1,113	1,151	1,191	1,239	1,300	1,442	
1,40	0,58	0,665	0,805	0,921	0,949	0,976	1,010	1,042	1,078	1,114	1,154	1,202	1,263	1,405	
1,37	0,59	0,618	0,768	0,884	0,912	0,939	0,973	1,005	1,039	1,077	1,117	1,165	1,226	1,368	
1,33	0,60	0,584	0,733	0,849	0,878	0,905	0,939	0,971	1,005	1,043	1,083	1,131	1,192	1,334	
1,30	0,61	0,549	0,699	0,815	0,843	0,870	0,904	0,936	0,970	1,008	1,048	1,096	1,157	1,299	
1,27	0,62	0,515	0,665	0,781	0,809	0,836	0,870	0,902	0,936	0,974	1,014	1,062	1,123	1,265	
1,23	0,63	0,483	0,633	0,749	0,777	0,804	0,838	0,870	0,904	0,942	0,982	1,030	1,091	1,233	
1,20	0,64	0,450	0,601	0,716	0,744	0,771	0,805	0,837	0,871	0,909	0,949	0,997	1,058	1,200	
1,17	0,65	0,419	0,569	0,685	0,713	0,740	0,774	0,806	0,840	0,878	0,918	0,966	1,027	1,169	
1,14	0,66	0,388	0,538	0,654	0,682	0,709	0,743	0,775	0,809	0,847	0,887	0,935	0,996	1,138	
1,11	0,67	0,358	0,508	0,624	0,652	0,679	0,713	0,745	0,779	0,817	0,857	0,905	0,966	1,108	
1,08	0,68	0,329	0,478	0,595	0,623	0,650	0,684	0,716	0,750	0,788	0,828	0,876	0,937	1,079	
1,05	0,69	0,299	0,449	0,565	0,593	0,620	0,654	0,686	0,720	0,758	0,798	0,840	0,907	1,049	
1,02	0,70	0,270	0,420	0,536	0,564	0,591	0,625	0,657	0,691	0,729	0,769	0,811	0,878	1,020	
0,99	0,71	0,242	0,392	0,508	0,536	0,563	0,597	0,629	0,663	0,701	0,741	0,783	0,850	0,992	
0,96	0,72	0,213	0,364	0,479	0,507	0,534	0,568	0,600	0,634	0,672	0,712	0,754	0,821	0,963	
0,94	0,73	0,186	0,336	0,452	0,480	0,507	0,541	0,573	0,607	0,645	0,685	0,727	0,794	0,936	
0,91	0,74	0,159	0,309	0,425	0,453	0,480	0,514	0,546	0,580	0,618	0,658	0,700	0,767	0,909	
0,88	0,75	0,132	0,282	0,398	0,426	0,453	0,487	0,519	0,553	0,591	0,631	0,673	0,740	0,882	
0,86	0,76	0,105	0,255	0,371	0,399	0,426	0,460	0,492	0,526	0,564	0,604	0,652	0,713	0,855	
0,83	0,77	0,079	0,229	0,345	0,373	0,400	0,434	0,466	0,500	0,538	0,578	0,620	0,687	0,829	
0,80	0,78	0,053	0,202	0,319	0,347	0,374	0,408	0,440	0,474	0,512	0,552	0,594	0,661	0,803	
0,78	0,79	0,026	0,176	0,292	0,320	0,347	0,381	0,413	0,447	0,485	0,525	0,567	0,634	0,776	
0,75	0,80	–	0,150	0,266	0,294	0,321	0,355	0,387	0,421	0,459	0,499	0,541	0,608	0,750	
0,72	0,81	–	0,124	0,240	0,268	0,295	0,329	0,361	0,395	0,433	0,473	0,515	0,582	0,724	
0,70	0,82	–	0,098	0,214	0,242	0,269	0,303	0,335	0,369	0,407	0,447	0,489	0,556	0,898	
0,67	0,83	–	0,072	0,188	0,216	0,243	0,277	0,309	0,343	0,381	0,421	0,463	0,530	0,672	
0,65	0,84	–	0,046	0,162	0,190	0,217	0,251	0,283	0,317	0,355	0,395	0,437	0,504	0,645	
0,62	0,85	–	0,020	0,136	0,164	0,191	0,225	0,257	0,291	0,329	0,369	0,417	0,478	0,620	
0,59	0,86	–	–	0,109	0,140	0,167	0,198	0,230	0,264	0,301	0,343	0,390	0,450	0,593	
0,57	0,87	–	–	0,083	0,114	0,141	0,172	0,204	0,238	0,275	0,317	0,364	0,424	0,567	
0,54	0,88	–	–	0,054	0,085	0,112	0,143	0,175	0,209	0,246	0,288	0,335	0,395	0,538	
0,51	0,89	–	–	0,028	0,059	0,086	0,117	0,149	0,183	0,230	0,262	0,309	0,369	0,512	
0,48	0,90	–	–	–	0,031	0,058	0,089	0,121	0,155	0,192	0,234	0,281	0,341	0,484	

Tabla 14. Tabla de corrección de factor de potencia de la IEEE

Se reemplaza en la ecuación los valores obtenidos.

$$a = 0.712$$

$$P = 0.372 MW$$

$$Q_c = a * P$$

$$Q_c = 0.712 * 0.372$$

$$Q_c = 0.264 MVAR$$

4.1.3 INSTALACIÓN DEL BANCO DE CAPACITORES

Se parametriza el banco en ETAP tal como se muestra en el resultado de la ecuación:

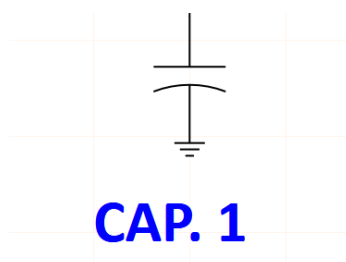


Figura 16. Banco de capacitores

13.8 kV 1 x 0.264 Mvar		
Rating		
kV	Mvar / Bank	# of Banks
13.8	0.264	1
Max. kV	<input checked="" type="radio"/> Mvar	<input type="radio"/> Bank # x Mvar
0		

Figura 17. Parámetros ingresados en el banco de condensadores

4.2 DIMENSIONAMIENTO Y POSICIONAMIENTO DE LOS FILTROS DE ARMÓNICOS

Se utilizarán filtros pasivos debido a que al usar la herramienta "**HARMONIC LOAD FLOW**" de ETAP se obtuvieron resultados de distorsión de onda excesiva en el sistema donde se busca atenuar en contra de esta señal distorsionada (THD).

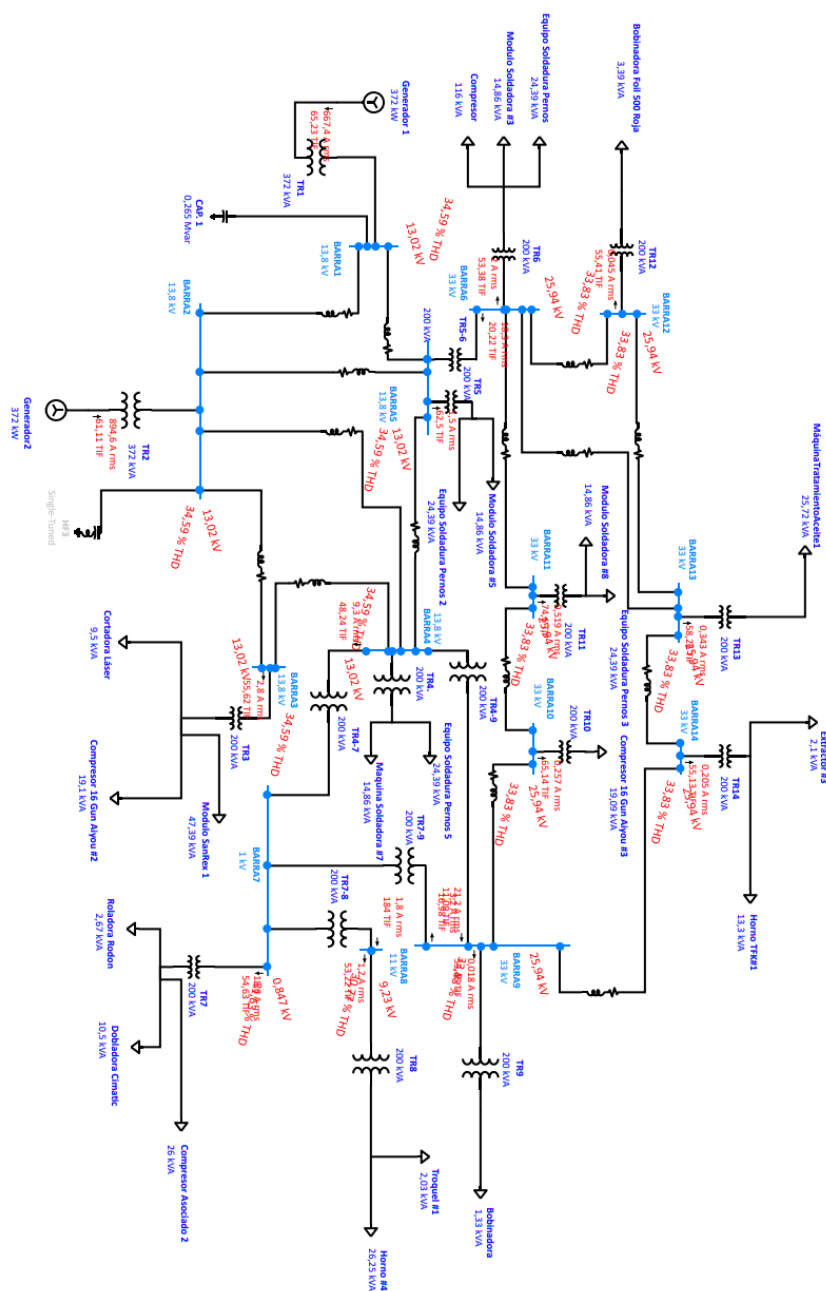


Figura 18. Flujo de carga armónica del sistema

Al realizar un “**ARMONIC LOAD FLOW**” en el sistema, se encuentra que sobrepasa los límites máximos establecidos por la regulación “**ARCERNNR 002/20**” donde estipula que el THD (%) recomendado no debe ser exceder $\pm 5\%$ en voltajes mayores a 0.6kV y menores a 40kV.

Se comprueba que el mayor THD (%) del sistema se encuentra en las barras “**BARRA 1**”, “**BARRA 2**”, “**BARRA 3**”, “**BARRA 4**” y “**BARRA 5**”. Como estas barras se encuentran conectadas paralelamente se utilizará el filtro propuesto en la “**BARRA 2**” para atenuar en contra del THD en todas estas barras a su vez.

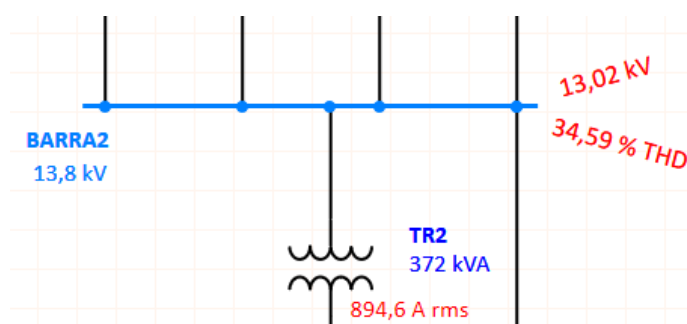


Figura 19. Porcentaje de THD presente en la barra 2

Teniendo en cuenta que el THD (%) es la suma de los armónicos (3ro + 5to + 7mo +n), y que los armónicos de orden impar son los que más afectan la calidad de la energía eléctrica (sobre todo el 3er y 5to armónico), se atenuará en contra del 5to armónico debido a que el “**HARMONIC LOAD FLOW**” muestra que el 5to armónico tiene una mayor distorsión en comparación del resto.

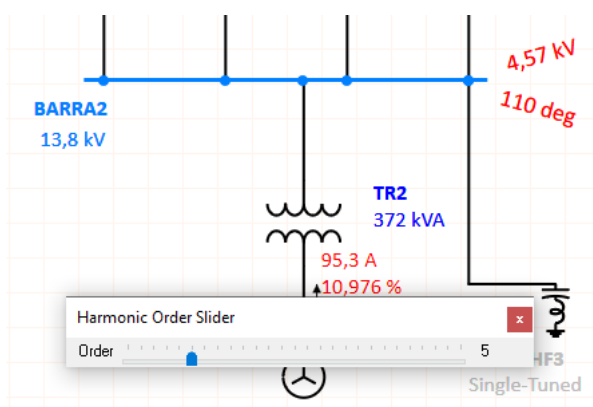


Figura 20. Mayor distorsión en el quinto armónico

Se dimensiona el filtro en base al 5to armónico que tiene una corriente armónica de 95.3 A, con PF de 98.68% y potencia aparente de 188.1 kVA.

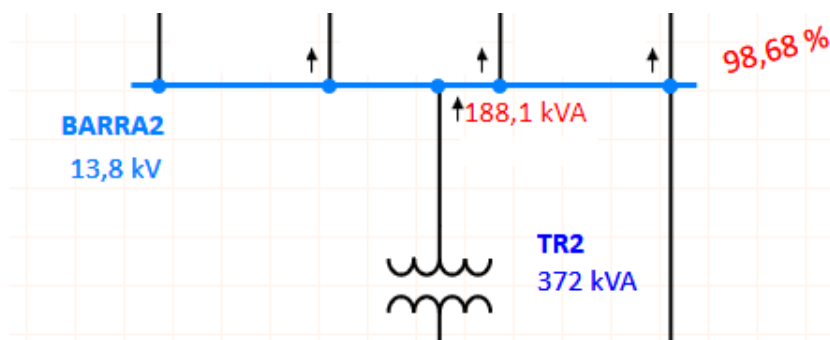


Figura 21. Mejoramientos del factor de potencia

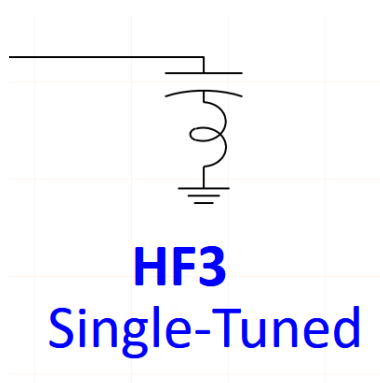


Figura 22. Filtro de armónico

Harmonic Filter Sizing		
Harmonic Info Harmonic Order: 5 Harmonic Current: 95,3 Amp <input type="checkbox"/> Include Filter Overloading		Sizing Option <input checked="" type="radio"/> PF Correction <input type="radio"/> Minimize Initial Cost <input type="radio"/> Minimize Operating Cost
Initial Installation Cost Unit Cost Capacitor: 0 \$/kvar Inductor: 0 \$/kvar		Operating Cost Loss Factor Capacitor: 1 %
PF Correction Existing PF: 98,68 % Desired PF: 99 % Load MVA: 0,188		

Figura 23. Dimensionamiento del filtro armónico

5. CAPITULO 5

ANALISIS DE LOS RESULTADOS

5.1 RESULTADOS Y COMPARACIONES DEL MEJORAMIENTO DEL FACTOR DE POTENCIA DE GENERADORES

	ID	MW	Mvar	% PF
▶ 1	Generador 1	0,135	0,131	71,69
2	Generador2	0,181	0,176	71,69

Figura 24. Parámetros del generador antes de la compensación reactiva

	ID	MW	Mvar	% PF
▶ 1	Generador 1	0,139	0,0234	98,62
2	Generador2	0,188	0,0316	98,62

Figura 25. Parámetros de los generadores después de la compensación reactiva

La **Figura 25**, muestra los resultados del nuevo flujo de potencia con influencia del banco de condensadores.

Se observa una reducción de la energía reactiva de los generadores después de la incorporación del banco de capacitores previamente diseñado, mejorando el factor de potencia, significando un uso más eficiente de energía en todo el sistema, reduciendo pérdidas que evitan la óptima distribución energética.

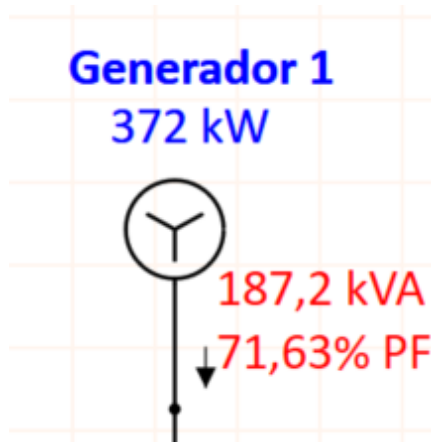


Figura 26. Factor de potencia del generador 1 previo a la compensación reactiva.

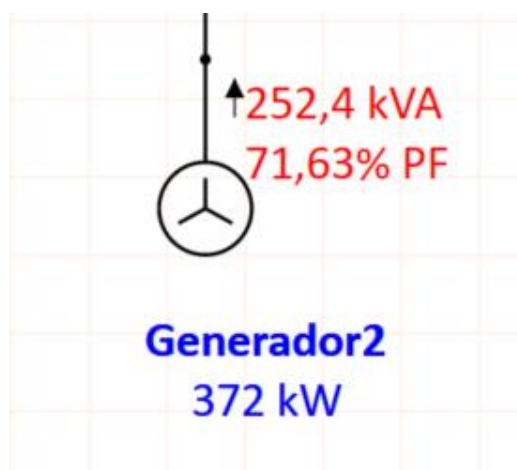


Figura 27. Factor de potencia del generador 2 previo a la compensación reactiva.

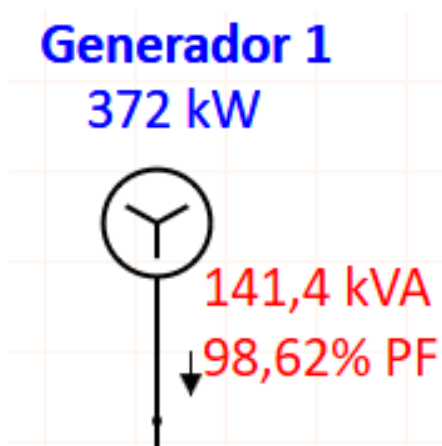


Figura 28. Resultados del banco de condensadores en el generador 1

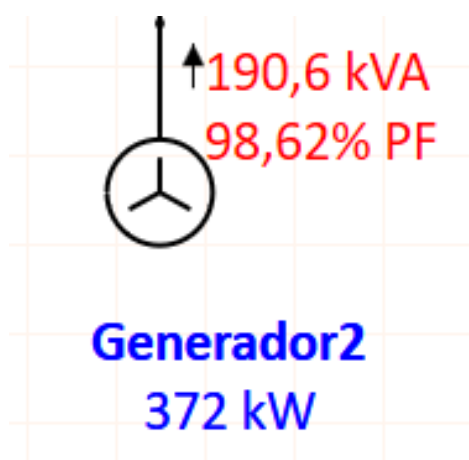


Figura 29. Resultados del banco de condensadores en el generador 2

5.2 RESULTADOS Y COMPARACIONES DEL MEJORAMIENTO DE VARIACIÓN DE VOLTAJE EN BARRAS

Al realizar un análisis de flujo de carga se encontraba una variación de voltaje no permitida según las regulaciones vigentes. Recordando que la regulación “ARCERNNR 002/20” establece que los niveles de voltaje no deben sobrepasar una variación en medio voltaje de $\pm 6.0\%$.

	Bus ID	Nominal kV	Voltage	kW Loading	kvar Loading
▶ 1	BARRA1	13,8	96,56	132,3	123,9
2	BARRA2	13,8	96,56	244	223,9
3	BARRA3	13,8	96,56	69,27	69,92
4	BARRA4	13,8	96,56	173,5	154,5
5	BARRA5	13,8	96,56	135,9	126
6	BARRA6	33	93,1	90,6	91,13
7	BARRA7	1	93,81	55,97	57,4
8	BARRA8	11	93,19	17,03	17,49
9	BARRA9	33	93,1	100,6	84,17
10	BARRA10	33	93,1	67,93	56,02
11	BARRA11	33	93,1	53,98	47,29
12	BARRA12	33	93,1	2,58	2,1
13	BARRA13	33	93,1	22,56	17,82
14	BARRA14	33	93,1	31,83	27,32

Figura 30. Parámetros de las barras antes de la compensación reactiva

Al incorporar el banco de capacitores, se evita una variación de voltaje que sobrepase los parámetros establecidos por la regulación “ARCERNR 002/20”.

	Bus ID	Nominal kV	Voltage	kW Loading	kvar Loading
▶ 1	BARRA1	13,8	98,68	138,2	277,5
2	BARRA2	13,8	98,68	255,4	217,3
3	BARRA3	13,8	98,67	72,4	71,01
4	BARRA4	13,8	98,67	181,2	161,4
5	BARRA5	13,8	98,67	141,9	137,7
6	BARRA6	33	95,13	94,62	95,17
7	BARRA7	1	95,86	58,45	59,94
8	BARRA8	11	95,23	17,78	18,26
9	BARRA9	33	95,13	105	87,89
10	BARRA10	33	95,13	70,94	58,5
11	BARRA11	33	95,13	56,37	49,38
12	BARRA12	33	95,13	2,7	2,19
13	BARRA13	33	95,13	23,56	18,61
14	BARRA14	33	95,13	33,24	28,53

Figura 31. Parámetros de las barras después de la compensación reactiva

5.3 RESULTADOS Y COMPARACIONES DE LA PRESENCIA DE ARMÓNICOS EN LA BARRA 2

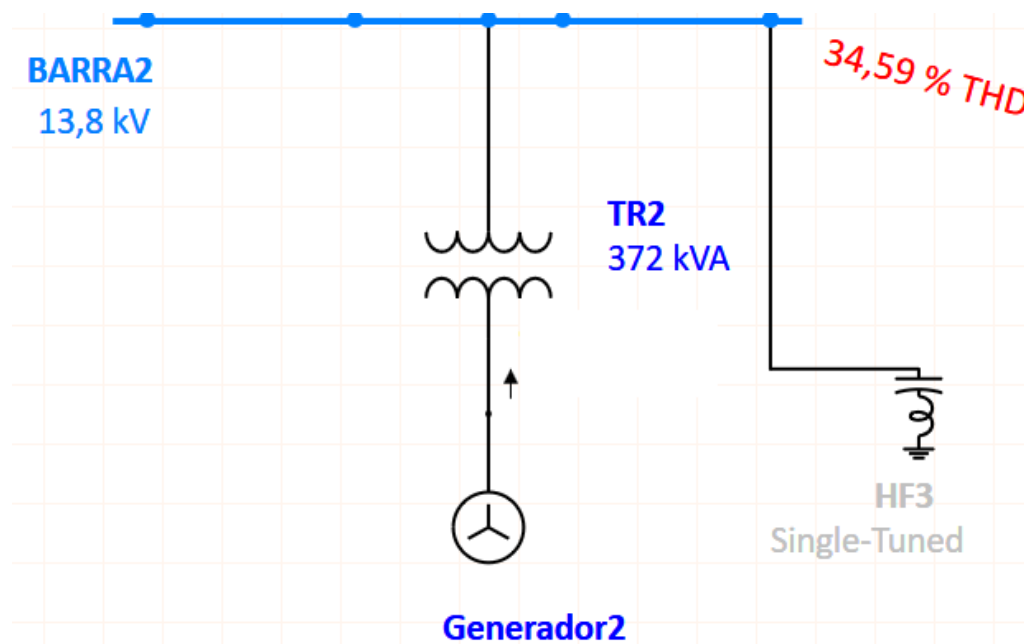


Figura 32. Parámetros del THD en la BARRA 2 sin filtro armónico activado

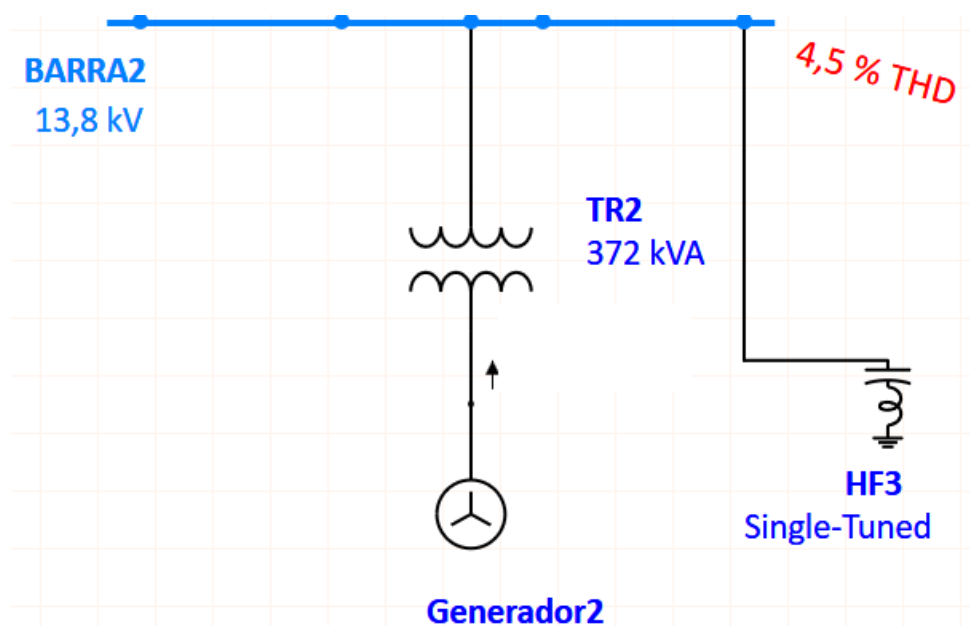


Figura 33. Parámetros del THD en la BARRA 2 con filtro armónico activado

Se observa una mejoría armónica de la distorsión de onda desde el 34,59% al 4,5%, evitando pérdidas en la calidad de la energía eléctrica y cumpliendo con la regulación “ARCERNNR 002/20” que estipula que THDI (%) no debe sobrepasar $\pm 5\%$.

5.4 RESULTADOS Y COMPARACIONES DE LA PRESENCIA DE ARMÓNICOS EN LA BARRA

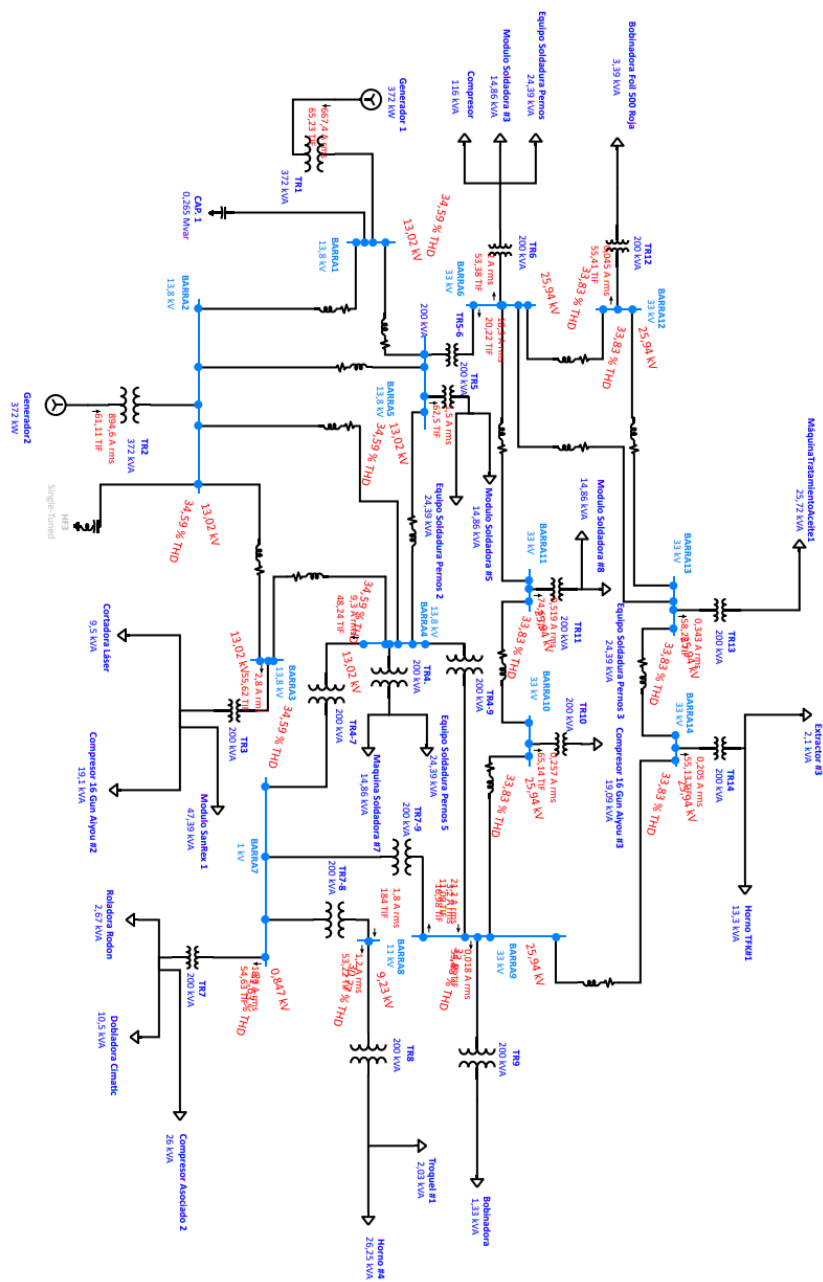


Figura 34. THD de las barras del sistema sin filtro de armónicos

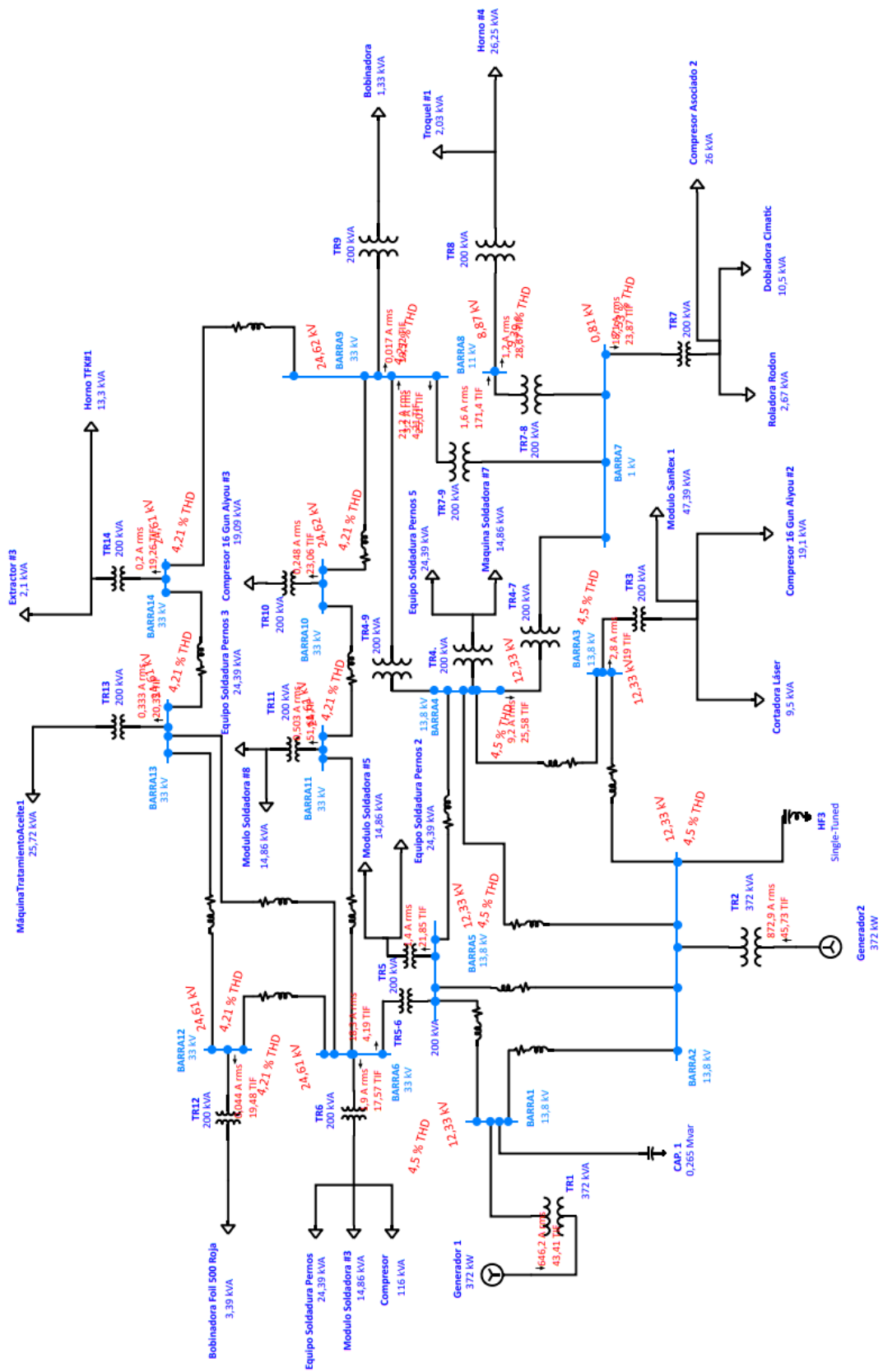


Figura 35. THD de las barras del sistema con filtro de armónicos.

La regulación "ARCERNNR 002/20" establece que, si el 90% o más de los registros de variaciones de voltaje y THD se encuentran dentro del rango admisible, se encuentran en el punto de cumplimiento de niveles de voltaje.

La *Figura 35* muestra al sistema regulado según los niveles permitidos debido a la incorporación del filtro de armónicos.

5.5 RESULTADOS Y COMPARACIONES DE LA PRESENCIA DE ARMÓNICOS EN LA FORMA DE ONDA DE LAS BARRAS DE 13,8 kV

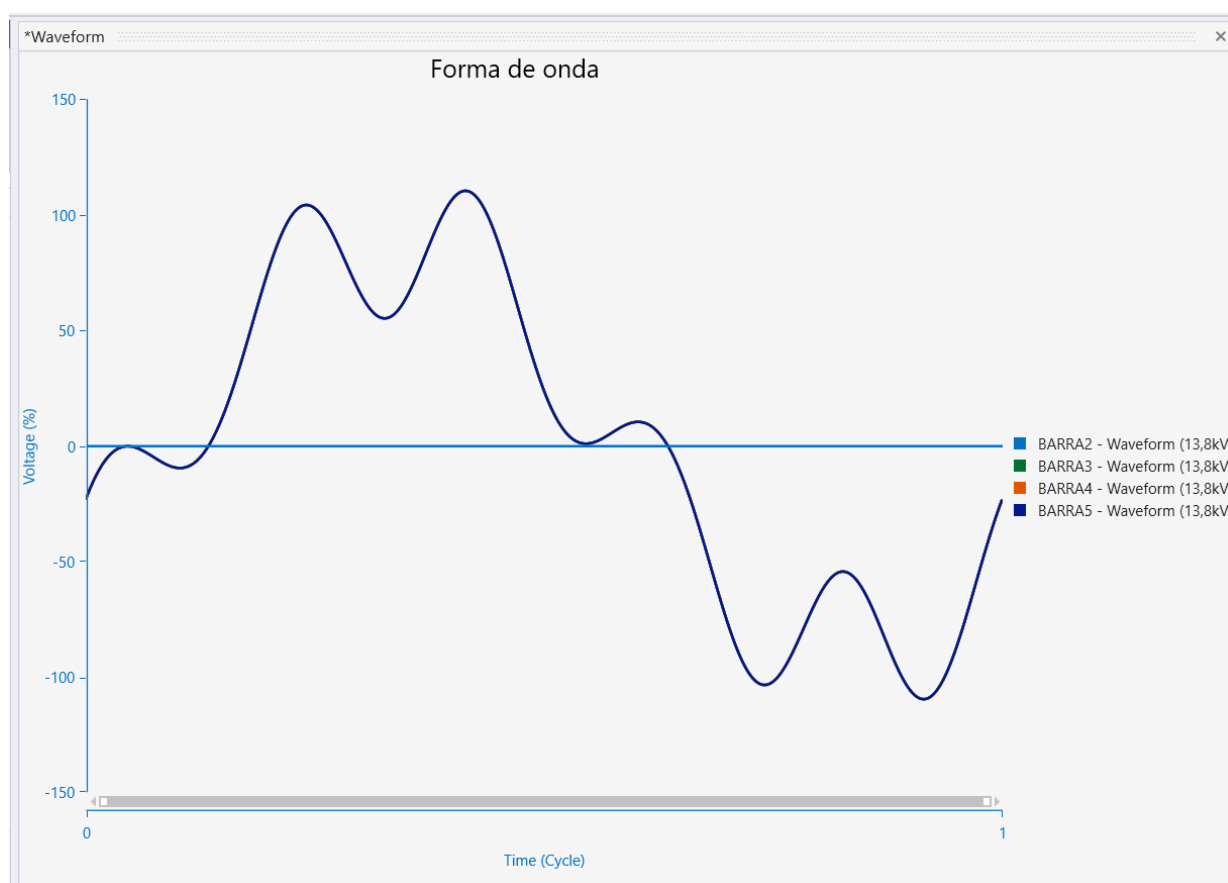


Figura 36. Onda armónica sin filtros en las barras en paralelo a la barra 2.

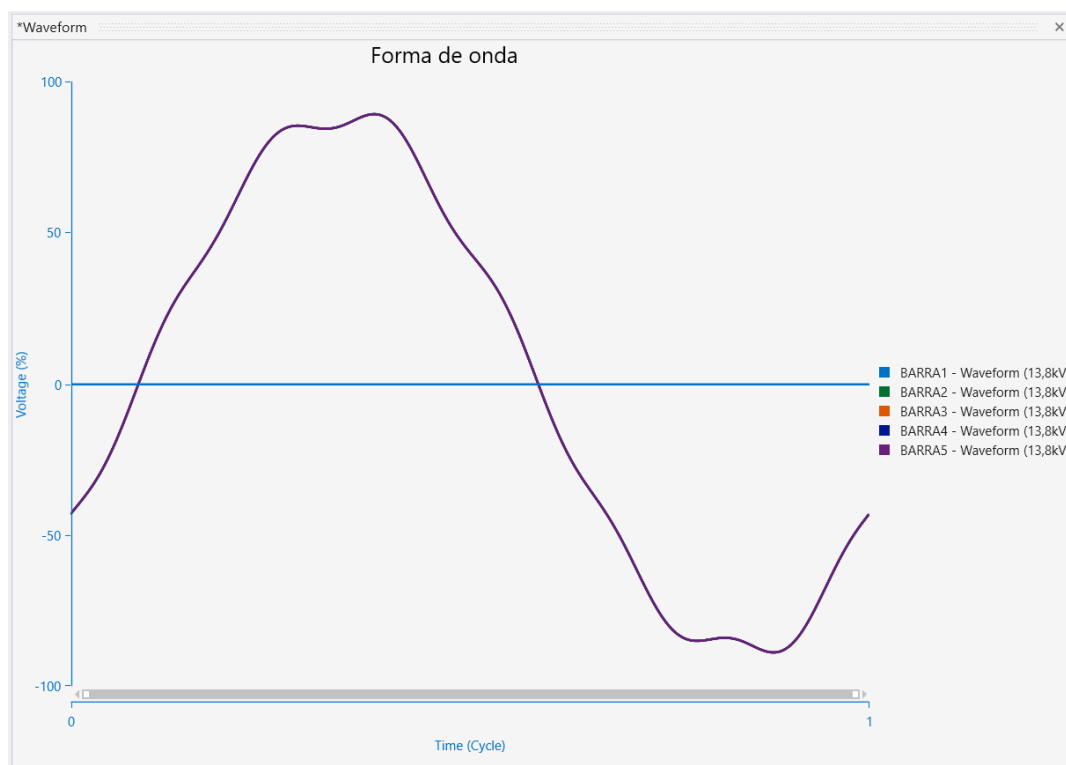


Figura 37. Onda armónica con filtros en las barras en paralelo a la barra 2.

Se observa una mejoría en la forma de onda de las barras más afectadas por la distorsión armónica (barras en paralelo a la “**BARRA 2**”), ya que el tener un filtro el THD disminuye, contrarrestando armónicos perjudiciales para el sistema y evitando excesos en la onda de distorsión del sistema.

PARAMETROS COMPARATIVOS		
BARRAS DE 13,8 kV	SIN FILTRO	CON FILTRO
	% THD	% THD
BARRA 1	34,59	4,5
BARRA 2	34,59	4,5
BARRA 3	34,59	4,5
BARRA 4	34,59	4,5
BARRA 5	34,59	4,5

Tabla 15. Parámetros comparativos de los THD en las barras de 13,8 kV

5.6 RESULTADOS Y COMPARACIONES DE LA PRESENCIA DE ARMÓNICOS EN LA FORMA DE ONDA DE LA BARRA DE 1 kV

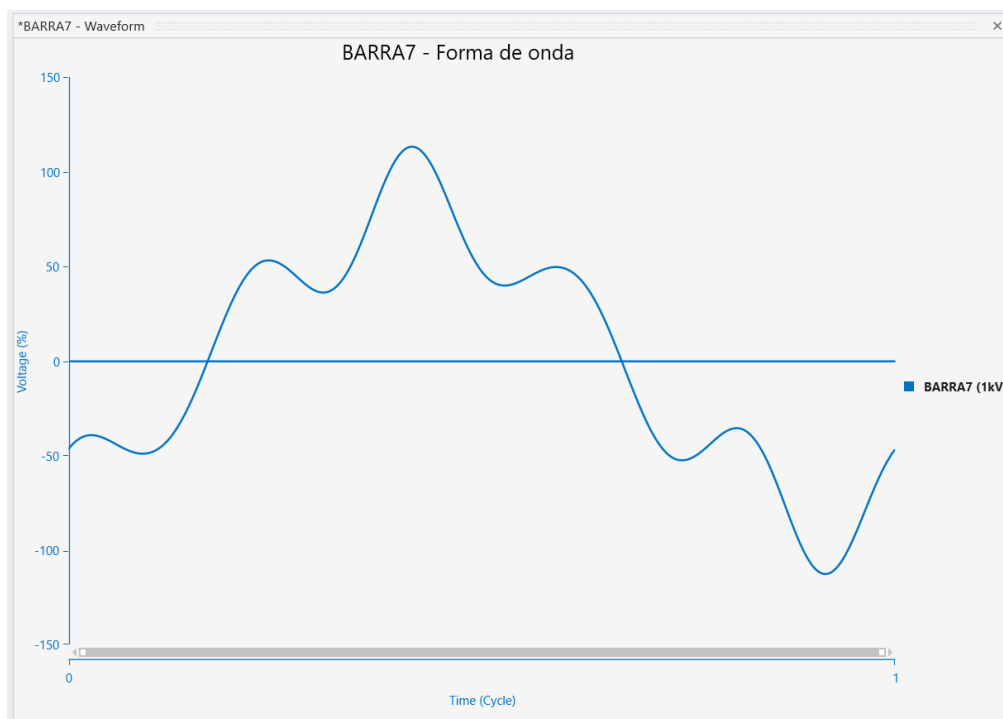


Figura 38. Onda armónica sin filtros en la barra 7 de 1 kV

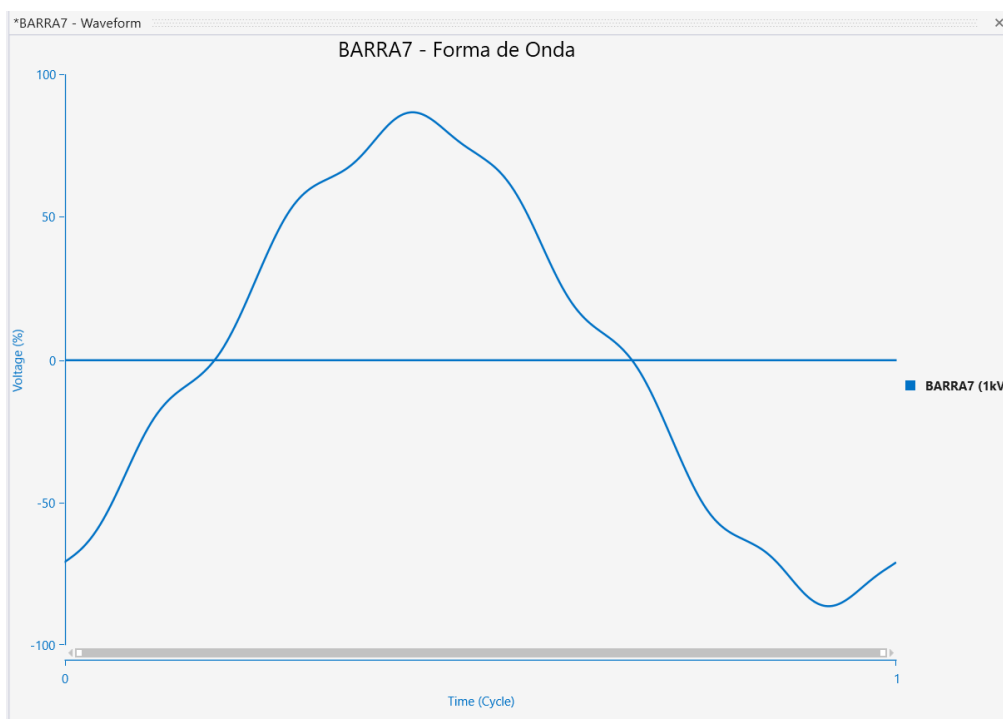


Figura 39. Onda armónica con filtros en la barra 7 de 1 kV

PARAMETROS COMPARATIVOS		
BARRAS DE 1 kV	SIN FILTRO	CON FILTRO
	% THD	% THD
BARRA 7	31,63	7,53

Tabla 16. Parámetros comparativos de los THD en las barras de 1 kV

La mejora de porcentaje de THD en la “**BARRA 7**” se muestra en la *Tabla 16*, pero es importante recalcar que la barra no está dentro de los rangos tolerables según la regulación, pero la misma establece que si el 90% de los THD presenten en el sistema se encuentran dentro de los rangos admisibles el sistema es válido.

5.7 RESULTADOS Y COMPARACIONES DE LA PRESENCIA DE ARMÓNICOS EN LA FORMA DE ONDA DE LA BARRA DE 11 Kv

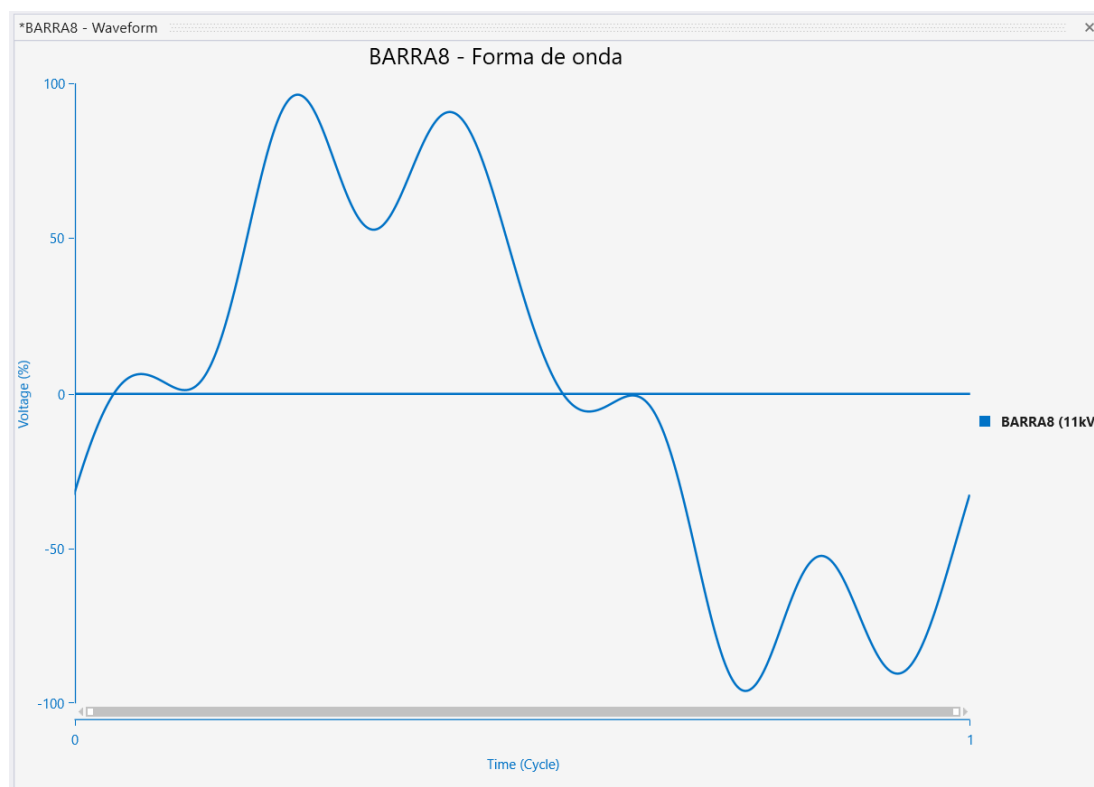


Figura 40. Onda armónica sin filtros en la barra 8 de 11 kV

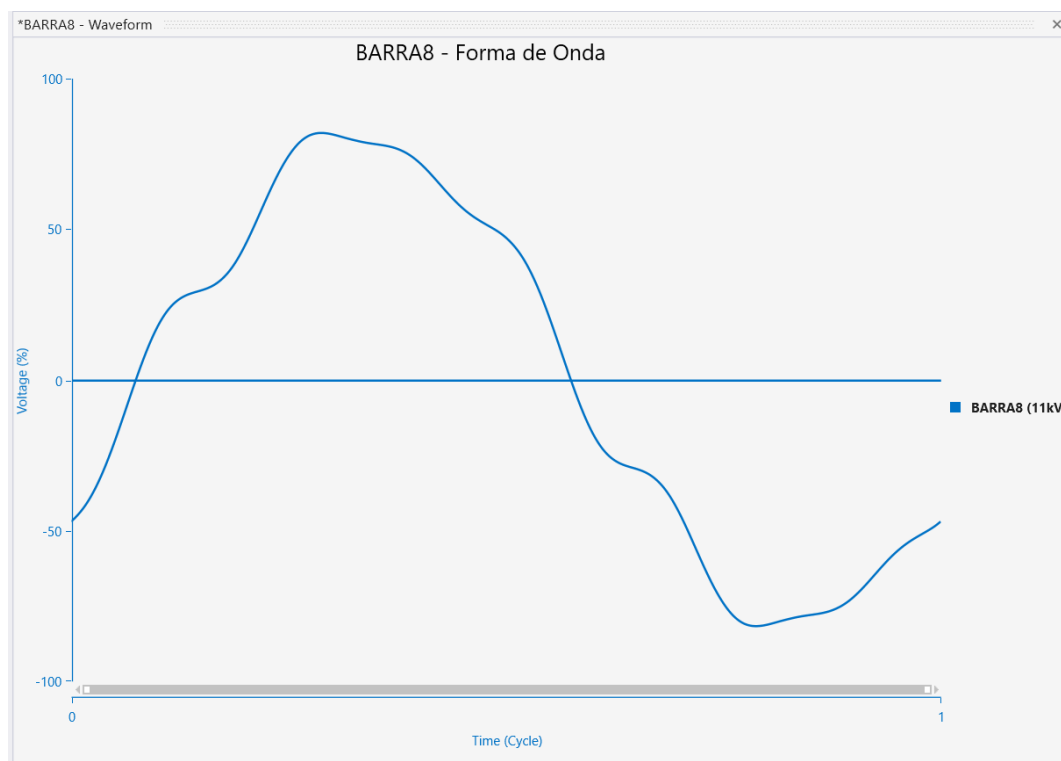


Figura 41. Onda armónica con filtros en la barra 8 de 11 Kv

PARAMETROS COMPARATIVOS		
BARRAS DE 11 kV	SIN FILTRO	CON FILTRO
	% THD	% THD
BARRA 8	30,77	9,39

Tabla 17. Parámetros comparativos de los THD en las barras de 11 kV

La **Tabla 17** también presenta una mejora enorme en el porcentaje de THD de la “**BARRA 8**”, pero al igual que en la “**BARRA 7**” no se encuentra dentro de los rangos aceptables según la regulación. Pero al ser solo estas dos únicas barras las cuales no llegan a los valores establecidos, la normativa expresa que el sistema es aceptable una vez que el 90% de los THD del sistema estén de acuerdo con los parámetros correctos.

5.8 RESULTADOS Y COMPARACIONES DE LA PRESENCIA DE ARMÓNICOS EN LA FORMA DE ONDA DE LAS BARRAS DE 33 kV

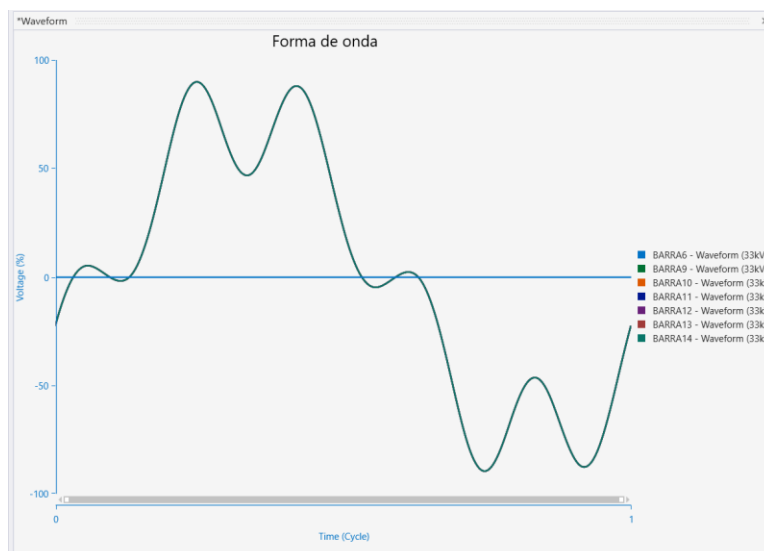


Figura 42. Onda armónica sin filtros en las barras de 33 kV

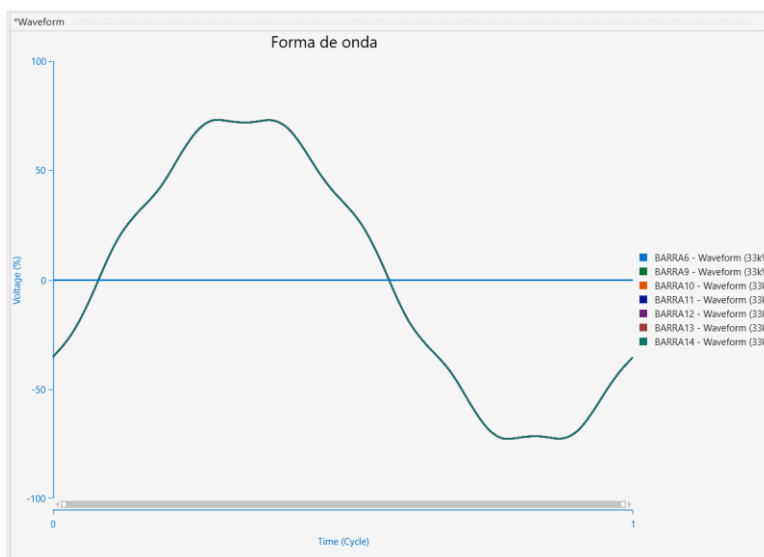


Figura 43. Onda armónica con filtros en las barras de 33 kV

Se evidencia una mejora en la forma de onda de las barras afectadas por la distorsión armónica. Al incorporar un filtro, se conduce a una disminución en el Distorsión Armónica Total (THD). Este proceso contrarresta la presencia de armónicos perjudiciales para el sistema, evitando excesos en la onda de distorsión del sistema.

PARAMETROS COMPARATIVOS		
BARRAS DE 33 kV	SIN FILTRO	CON FILTRO
	%THD	%THD
BARRA 6	33,83	4,21
BARRA 9	33,83	4,21
BARRA 10	33,83	4,21
BARRA 11	33,83	4,21
BARRA 12	33,83	4,21
BARRA 13	33,83	4,21
BARRA 14	33,83	4,21

Tabla 18. Parámetros comparativos de los THD en las barras de 33kV

Mediante la **Tabla 18**, podemos ver los porcentajes de THD de las barras de 33 kV, la mejora de la distorsión armónica total es evidente en comparación a los parámetros que tenía el sistema sin la corrección de los armónicos. También es importante destacar que los porcentajes de THD con el filtro de armónicos se encuentran dentro de los rangos admisibles por la regulación “**ARCERNR 002/20**”.

CONCLUSIONES

- Modelar un sistema de distribución aislado expresado en el sistema de 14 barras de la IEEE, ayudó a comprender de mejor manera como afectan los bajos niveles de factor de potencia en el desempeño de la industria. Para que el sistema pudiera operar con los valores adecuados de voltaje, factores de potencia, atenuación de armónicos, se tomaron en cuenta los valores o parámetros establecidos por normas o reglamentos, dependientemente de aquello se determinó la capacidad de potencia reactiva del banco de condensadores, el tipo de filtro a utilizar y la ubicación óptima de cada uno.
- Al ejecutar las respectivas simulaciones, se lograron analizar tanto los problemas que se presentaron como sus resultados mediante tablas, gráficas o reportes que generó el software, de manera que se reconocieran las deficiencias y buscar la forma de que el sistema consiguiera operar con los niveles adecuados de factor de potencia. El proyecto demostró con éxito la técnica de compensación de potencia reactiva utilizando una simulación en ETAP. Esta misma puede ser empleado para modelar cargas y poder incrementar el factor de potencia a un nivel deseado, disminuyendo considerablemente la cantidad de potencia reactiva de un sistema.
- Uno de los objetivos principales de este proyecto técnico se centró en la atenuación de armónicos, su presencia fue por causa de las cargas no lineales como dispositivos que operaron en condición de saturación y particularmente en cargas electrónicas. Es por ello que se buscó la atenuación de los armónicos, dando como solución la estabilidad de la vida útil de los equipos, lo que ocasionó una operación eficiente generando más demanda en la industria.
- Los resultados nos ayudaron a concluir que la colocación del banco de capacitores proporcionó una reducción de potencia reactiva a la red y como consecuencia se obtuvo una reducción de pérdidas totales en contraste con el sistema base sin compensación reactiva y minimizando las pérdidas en las líneas, mejorando los perfiles de voltaje y factor de potencia, disminuyendo la desviación máxima de voltaje y desviación promedio de voltaje.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda a los estudiantes de las diferentes carreras de ingeniería que se familiaricen de mejor manera con los softwares correspondientes a cada ingeniería, permitiendo demostrar o realizar análisis con el uso de los mismos. Esto permitirá que sus oportunidades laborales se amplíen mucho más ya sea en el área de mantenimiento o diseños de sistemas eléctricos.
- Como otro caso de estudio se recomienda que el sistema presentado en este proyecto sea analizado de diferente manera, sustituyendo los generadores presentes en el sistema por una **“POWER GRID”** simulando una red eléctrica, de esta manera se podrá realizar una comparativa de los valores que se obtengan.
- Para cualquier otro caso de estudio que se desee realizar en base a este sistema, se recomienda que sus resultados sean basados bajo una normativa o reglamento que se encuentre vigente donde se estipulan los rangos de voltaje y la distorsión armónica total admitidos.

BIBLIOGRAFÍAS

- [1] “Compensacion_de_potencia_reactiva_en_sistemas_desb”, Accessed: Nov. 24, 2023. [Online]. Available: https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-33052012000300002
- [2] “Prototipo para compensación de armónicos en sistemas trifásicos.”, doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.4.a07.
- [3] “ÓPTIMA UBICACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE D-STATCOM PARA LA COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA EN REDES DE DISTRIBUCIÓN CONSIDERANDO LA INCIDENCIA DE ARMÓNICOS.”
- [4] S. Guayaquil, P. De Titulación, J. Augusto, and M. Andrade, “UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA.”
- [5] D. E. Potencias Un Sistema De Distribución Usando Técnicas De Compensación, “ANÁLISIS MULTI-OBJETIVO PARA LA MINIMIZACIÓN DE PÉRDIDAS.”
- [6] “UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE QUITO CARRERA: INGENIERÍA ELÉCTRICA Tesis previa a la obtención del título de: INGENIERO ELÉCTRICO.”

- [7] W. Hoffman, J. Schlabbach, and W. Just, *Reactive Power Compensation*. Chichester: John Wiley & Sons, 2012. Accessed: Aug. 15, 2023. [Online]. Available: <https://bibliotecas.ups.edu.ec:2708/lib/upsal/reader.action?docID=861625&query=reactive+compensation>
- [8] K. R. Padiyar, *Facts Controllers in power transmission and distribution*. Bangalore: NEW AGE INTERNATIONAL, 2007. Accessed: Aug. 15, 2023. [Online]. Available: <https://bibliotecas.ups.edu.ec:2708/lib/upsal/reader.action?docID=418812&query=reactive+compensation>
- [9] “KK_BK-T-95_ENG_internet”.
- [10] W.: Www, A. Chandra, and T. Agarwal, “International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering Capacitor Bank Designing for Power Factor Improvement,” 2008. [Online]. Available: www.ijetae.com
- [11] N. G. Hingorani, Laszlo. Gyugyi, and M. E. El-Hawary, *Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems*. IEEE Press, 2000.
- [12] M. Eremia, A. Gole, and L. Toma, “Static VAR Compensator (SVC),” in *Advanced Solutions in Power Systems: HVDC, FACTS, and AI Techniques*, Wiley-IEEE Press, 2016, pp. 271–338. doi: 10.1002/9781119175391.ch5.
- [13] Lab-Volt (Québec) Itée, *Static Synchronous Compensator (STATCOM). Instructor guide, 86371-10*.
- [14] “Power Factor-The Basics.”
- [15]: A Bhatia, “PDHonline Course E144 (4 PDH) Power Factor in Electrical Energy Management 2020.” [Online]. Available: www.PDHcenter.com
- [16] C. L. Wadhwa, *Generation, distribution and utilization of electrical energy*, 3rd ed. Royal Tunbridge Wells: NEW ACADEMIC SCIENCE LIMITED, 2013. Accessed: Aug. 15, 2023. [Online]. Available: <https://bibliotecas.ups.edu.ec:2708/lib/upsal/reader.action?docID=3440191&query=energy+distribution>
- [17] P. S. G. Dana and P. S. Ion, “Study of the harmonics of current and voltage for a synchronous generator in the context of railway constraints,” IEEE, Capri, 2016.
- [18] B. B. Jazi, H. A. Abyaneh, and M. Abedi, “Power quality improvement using active filter capability in back to back convertor installed for variable speed DFIG wind energy system,” IEEE, Tehran, 2011.
- [19] A. Arranz-Gimon, A. Zorita-Lamadrid, D. Morinigo-Sotelo, and O. Duque-Perez, “A review of total harmonic distortion factors for the measurement of harmonic and interharmonic pollution in modern power systems,” *Energies*, vol. 14, no. 20. MDPI, Oct. 02, 2021. doi: 10.3390/en14206467.
- [20] Periyazhagar D, “A survey of harmonic distortion and reduction techniques,” 2016. [Online]. Available: www.ijptonline.com
- [21] Siddhant College of Engineering, Institute of Electrical and Electronics Engineers. Bombay Section., and Institute of Electrical and Electronics Engineers, *2018 3rd International Conference for Convergence in Technology (I2CT) : the Gateway Hotel, XION Complex, Wakad Road, Pune, India. Apr 06-08, 2018*.
- [22] Juan José González de la Rosa, “Análisis y Diseño Electrónico Basados en el Amplificador Operacional,” Ediciones Diaz de Santos S.A., 2021.
- [23] Ángel A. San Blas Oltra, “Problemas Resueltos de Señales y Sistemas,” Universidad Miguel Hernández, 2015.
- [24] R. Pinyol, “HARMONICS: CAUSES, EFFECTS AND MINIMIZATION.”

- [25] G. Dana, *Study of the harmonics of current and voltage for a synchronous generator in the context of railway constraints*. IEEE, 2016. Accessed: Aug. 15, 2023. [Online]. Available:
<https://bibliotecas.ups.edu.ec:2095/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7525930>