

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
ESCUELA DE POSGRADO
DOCTORADO EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO
AMBIENTE



TESIS

COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA Y ANÁLISIS DE
ARMÓNICOS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA UNA -
PUNO 2018 - 2019

PRESENTADA POR:

LEONARDO PAYÉ COLQUEHUANCA

PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:

DOCTOR EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE

PUNO, PERÚ

2020

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
ESCUELA DE POSGRADO
DOCTORADO EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE



TESIS

COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA Y ANÁLISIS DE ARMÓNICOS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA – UNA PUNO 2018 – 2019

PRESENTADA POR:

LEONARDO PAYÉ COLQUEHUANCA

PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:

DOCTOR EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE

APROBADA POR EL SIGUIENTE JURADO:

PRESIDENTE

.....
Dr. WALTER ALEJANDRO ZAMALLOA CUBA

PRIMER MIEMBRO

.....
Dr. DANTE ATILIO SALAS ÁVILA

SEGUNDO MIEMBRO

.....
Dr. LEÓNIDAS VILCA CALLATA

ASESOR DE TESIS

.....
Dr. JOSE EMMANUEL CRUZ DE LA CRUZ

Puno, 21 de enero de 2020.

ÁREA: Ciencias, tecnología y medio ambiente.

TEMA: Potencia reactiva y análisis armónicos en sistemas de distribución eléctrica una-puno.

LÍNEA: Impacto tecnológico y ambiental.

DEDICATORIA

A la memoria de mis padres Cayetano y madre María, mis hermanos Abel y Justa y mi sobrino Fredy, porque en mi inculcaron valores, ética, responsabilidad y profesionalismo.

A mi esposa Ely, mis hijas Ibet, Ely, Arlet e Indira, mis nietos Arianna, Leonard, Thiago y Leonardo, por su apoyo e inspiración.

A mis hermanos Federico, Valeriana, Andrés y Roberto por su comprensión.

AGRADECIMIENTOS

- A la Universidad Nacional del Altiplano - Puno (UNAP), a través de la escuela de Posgrado, por la oportunidad en estas dos etapas de mi formación profesional.
- Al Dr. José Emmanuel Cruz de la Cruz, por el apoyo como director de tesis.
- A los miembros del Jurado integrados por:
 - Dr. Walter Alejandro Zamalloa Cuba
 - Dr. Dante Atilio Salas Ávila.
 - Dr. Leonidas Vilca Callata

Por las sugerencias para el mejor desarrollo del presente trabajo.

ÍNDICE GENERAL

| | Pág. |
|-------------------|-------------|
| | i |
| DEDICATORIA | i |
| AGRADECIMIENTOS | ii |
| ÍNDICE GENERAL | iii |
| ÍNDICE DE TABLAS | vi |
| ÍNDICE DE FIGURAS | vii |
| ÍNDICE DE ANEXOS | ix |
| RESUMEN | x |
| ABSTRACT | xi |
| INTRODUCCIÓN | 1 |

CAPÍTULO I**REVISIÓN DE LITERATURA**

| | |
|--|----|
| 1.1 Marco teórico. | 3 |
| 1.1.1 Normatividad | 3 |
| 1.1.1.1 Norma UNE en 50160 | 3 |
| 1.1.1.2 Norma IEC 61000-3-2. | 4 |
| 1.1.1.3 Norma IEC 61000-2-4. | 5 |
| 1.1.1.4 Norma IEC 61000-4-30. | 6 |
| 1.1.1.5 Estándar IEEE 1159. | 6 |
| 1.1.1.6 Norma IEC 5552. | 7 |
| 1.1.1.7 Estándar IEEE 519 | 7 |
| 1.1.2 Definiciones | 10 |
| 1.1.3 Tipos de cargas | 15 |
| 1.1.3.1 Cargas resistivas | 18 |
| 1.1.3.2 Cargas inductivas | 20 |
| 1.1.3.3 Cargas capacitivas | 21 |
| 1.1.3.4 Cargas combinadas | 23 |
| 1.1.4 El triángulo de potencias | 23 |
| 1.1.5 Problemas causados por los armónicos | 24 |
| 1.2 Antecedentes. | 25 |

CAPITULO II**PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

| | | |
|-------|-----------------------------|----|
| 2.1 | Identificación del Problema | 28 |
| 2.2 | Enunciado del problema | 30 |
| 2.2.1 | Problema general. | 30 |
| 2.2.2 | Problemas específicos | 30 |
| 2.3 | Justificación | 30 |
| 2.4 | Objetivos | 31 |
| 2.4.1 | Objetivo general | 31 |
| 2.4.2 | Objetivos específicos | 31 |
| 2.5 | Hipótesis | 31 |
| 2.5.1 | hipótesis General | 31 |
| 2.5.2 | Hipótesis específicas | 32 |

CAPÍTULO III**MATERIALES Y METODOS**

| | | |
|-------|---|----|
| 3.1 | Lugar de estudio | 33 |
| 3.2 | Población | 34 |
| 3.3 | Muestra | 34 |
| 3.4 | Método de Investigación | 34 |
| 3.4.1 | Método | 34 |
| 3.4.2 | Tipo de Investigación | 34 |
| 3.4.3 | Diseño de Investigación | 34 |
| 3.5 | Técnicas, instrumentos de recolección de datos y diseño | 35 |
| 3.5.1 | Técnicas | 35 |
| 3.5.2 | Instrumentos | 35 |
| 3.5.3 | Técnicas de procesamiento y análisis de resultados | 35 |
| 3.6 | Recursos computacionales y de hardware | 38 |
| 3.7 | Método. | 40 |
| 3.7.1 | Análisis de armónicos en redes de MT y BT | 40 |
| 3.7.2 | Análisis de Fourier | 41 |
| 3.7.3 | Índices para la medición de armónicos | 42 |
| 3.7.4 | Filtros de armónicos. | 44 |
| 3.7.5 | Bancos de condensadores en presencia de armónicos | 47 |
| 3.7.6 | Criterios de selección | 48 |

| | | |
|-------------------------------|--|----|
| 3.8 | Método de cálculo de compensación | 48 |
| 3.8.1 | Significado de la compensación en redes de alimentación. | 48 |
| CAPÍTULO IV | | |
| RESULTADOS Y DISCUSIÓN | | |
| 4.1 | Aspectos generales | 51 |
| 4.2 | Resultados de flujo de potencia. | 53 |
| 4.3 | Análisis de resultados. | 56 |
| 4.3.1 | Consumos de potencia y energía | 56 |
| 4.3.2 | Resultado de espectro de armónicos | 58 |
| 4.3.3 | Resumen de resultados | 63 |
| 4.4 | Interpretación de resultados. | 67 |
| CONCLUSIONES | | 68 |
| RECOMENDACIONES | | 69 |
| BIBLIOGRAFÍA | | 70 |
| ANEXOS | | 72 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| 1. Consumo de máxima demanda ciudad universitaria UNAP | 52 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Clasificación de la normatividad en categorías | 3 |
| Limites según norma UNE EN 50160 | 4 |
| Límites para los equipos clase A según norma 61000-3-2 | 5 |
| Límites de corta y larga duración según la norma IEEE 1159 | 7 |
| Limites según la norma IEEE 1159 | 8 |
| Límites de distorsión según la norma IEEE 1159 | 9 |
| Distorsión armónica en la forma de onda de tensión | 11 |
| Onda afectada por hendiduras | 12 |
| Onda de tensión afectada con SAG | 13 |
| Onda de tensión con swell | 13 |
| Onda de tensión afectada por un transitorio | 14 |
| Interrupción típica de una onda de tensión | 14 |
| Onda de tensión con impulso | 15 |
| Caída permanente de tensión | 15 |
| Elemento lineal y no lineal | 16 |
| Formas de onda lineal y no lineal | 17 |
| Descomposición de la onda armónica | 18 |
| Diagrama fasorial de un circuito resistivo | 19 |
| Onda de tensión y corriente en fase | 20 |
| Diagrama fasorial de un circuito inductivo | 20 |
| Onda de corriente atrasada 90° respecto a la tensión | 21 |
| Diagrama fasorial de un circuito capacitivo | 22 |
| Onda de corriente adelantada 90° respecto a la tensión | 22 |
| Triangulo de potencias | 23 |
| Triangulo de potencias con presencia de armónicos | 24 |
| Resumen de efectos de los armónicos | 25 |
| Forma de onda fundamental y de 2°, 3°, 4° y armónicos | 29 |
| Onda deformada compuesta por la superposición de la fundamental a 60 Hz. y menores armónicos de 3° y 5 orden | 30 |
| Área de influencia | 33 |
| Diagrama de flujo de método | 36 |
| | vii |

| | |
|--|----|
| Instrumento PowerQ4plus (Metrel) | 37 |
| Tipo de conexión del sistema | 39 |
| Conexión del instrumento a la red | 39 |
| Principio de funcionamiento de un filtro pasivo | 45 |
| Principio de funcionamiento de un filtro activo | 46 |
| Principio de funcionamiento de un filtro híbrido | 47 |
| Compensación de la potencia reactiva | 49 |
| Flujo de potencia con valores nominales | 54 |
| Flujo de potencia con valores actuales de carga | 55 |
| Evolución de la máxima demanda de potencia | 56 |
| Evolución del consumo de energía | 56 |
| Costo del consumo de potencia activa | 57 |
| Costo del consumo de potencia reactiva | 57 |
| Espectro de armónicos SED 01 | 59 |
| Espectro de armónicos SED 02 | 60 |
| Espectro de armónicos SED 03 | 61 |
| Espectro de armónicos SED 04 | 62 |
| Cuadro resumen de armónicos por SED | 63 |
| Flujo de potencia considerando armónicos | 64 |
| Diagrama de Flujo considerando filtros | 66 |
| Evaluación económica | 67 |

ÍNDICE DE ANEXOS

| | Pág. |
|---|-------------|
| Recibos de consumo de energía | 72 |
| Resultados de flujo de carga en condiciones nominales | 73 |
| Resultados de flujo de carga en condiciones actuales | 76 |
| Resultados de flujo de carga incluyendo armónicos | 78 |
| Resultado de flujo de carga incluyendo filtro | 80 |
| Características de banco de condensadores | 84 |
| Características de filtros de protección | 85 |
| Matriz de consistencia | 86 |

RESUMEN

Los problemas causados por un bajo factor de potencia en sistemas eléctricos de potencia, como son la regulación de tensión, funcionamiento inadecuado de máquinas eléctricas y aumento de pérdidas, lo que en definitiva se traduce en una reducción de la capacidad y eficiencia eléctrica del sistema. En el presente trabajo primero fue la obtención de información a través de un analizador de redes marca METREL PowerQ4 Plus instalados en cada uno de las siete sub estaciones de distribución eléctrica que cuenta la universidad Nacional del Altiplano Puno, luego se bajó la información del equipo a la PC a través del software PowerView v3.0, el cual nos dio los valores de armónicos de tensión y de corriente generados por equipos instalados en la diferentes oficinas, laboratorios y talleres de la UNAP, para luego procesarla a través del software DigSilent v15.1.7 ampliamente utilizada en cálculos de la rama de la Ingeniería Eléctrica. Los trabajos de medición se efectuaron en el transcurso del año 2018-2019, y en los intervalos establecidos por la Normatividad vigente, en coordinación con la oficina de mantenimiento de la UNAP, obteniéndose mejorar el factor de potencia de 0.946 a 0.98 y mitigar los armónicos, a través de filtros.

Palabras clave: armónicos, calidad, compensación reactiva, filtros y regulación.

ABSTRACT

The problems caused by a low power factor in electric power systems, such as voltage regulation, improper operation of electric machines and increased losses, which ultimately results in a reduction in the electrical capacity and efficiency of the system. In the present work, the first one was to obtain information through a METREL PowerQ4 Plus brand network analyzer installed in each of the seven sub-stations of electrical distribution that the National University of the Puno Highlands has, then the equipment information was downloaded to the PC through the PowerView v3.0 software, which gave us the values of voltage and current harmonics generated by equipment installed in the different offices, laboratories and workshops of UNAP, and then processed through the DigSilent v15 software .1.7 widely used in calculations of the branch of Electrical Engineering. The measurement work was carried out during the year 2018-2019, and at the intervals established by the current regulations, in coordination with the maintenance office of the UNAP, obtaining a power factor improvement of 0.946 to 0.98 and mitigating the harmonics, through filters.

Keywords: filters, harmonics, quality, reactive compensation and regulation.

INTRODUCCIÓN

Desde principios de los 90, el concepto de “*calidad de potencia*” ha ido ganando cada vez más notoriedad dentro del ámbito de la ingeniería eléctrica, y hoy día, se ha convertido en una cuestión de sumo interés tanto para las compañías productoras y distribuidoras, como para los fabricantes de equipos y los consumidores finales (IEEE, 1992) .

En el presente reporte se trata de reunir los elementos conceptuales que explican el fenómeno de la compensación reactiva en sistema eléctrico de distribución y su relación con la calidad de energía eléctrica, y que adecuadamente utilizadas permite identificar el problema y aportar los criterios para la apropiada selección y aplicación de los equipos de compensación correspondiente.

El elevado consumo de la Potencia Reactiva (aumento de la necesidad de magnetizar conforme se coloca más equipo a la red) ocasiona no solo mala regulación de voltaje o bajo voltaje en una industria, sino que también puede afectar a otros usuarios. Además, disminuirá la eficiencia con la cual los equipos conectados a la red aprovechan la energía que se les suministra.

Mejorar el factor de potencia resulta práctico y económico, por medio de la instalación de condensadores eléctricos estáticos, o utilizando motores sincrónicos disponibles en la industria. Luego se presenta un resumen de todos los elementos de un sistema de eléctrico de potencia que producen o absorben potencia reactiva explicando la naturaleza y particularidad en cada caso (Gómez *et al.*, 2016).

Las armónicas son corrientes y/o voltajes presentes en un sistema eléctrico, con un múltiplo de frecuencia múltiplo de frecuencia. Así, como las cargas monofásicas en sistemas con frecuencia de 60 Hz, las armónicas son las características en la tercera de (180 Hz), en la quinta (300 Hz), y el séptima (420 Hz), por ejemplo. Con el creciente aumento en el uso de cargas no lineales (procedentes de la electrónica de potencia), se han empezado a tener algunos problemas en las instalaciones eléctricas debido a los efectos de las componentes armónicas de corrientes y voltajes en el sistema eléctrico, que no se contemplaban anteriormente (IEEE, 1992) . Entre estos están el sobrecalentamiento de cables, transformadores y motores, corrientes excesivas en el neutro, fenómenos de resonancia entre los elementos del circuito ha sido la instalación

de bancos de condensadores para la compensación de potencia reactiva. Desafortunadamente estos bancos interactúan con el sistema eléctrico formando circuitos R-L-C que producen resonancias, siendo las frecuencias naturales del sistema una función de los componentes inductivos y capacitivos de la red. Por otro lado, la presencia de cargas no lineales modifica la onda de tensión senoidal, distorsionando los mismos, originado por corrientes armónicas, por lo que las frecuencias naturales del sistema pueden ser excitadas por alguna componente armónica cuya frecuencia está cerca o coincide con este modo natural, produciéndose una severa amplificación de voltajes y corrientes. Por lo tanto, es deseable considerar la instalación de Filtros los que deben ser capaces de aportar la potencia reactiva necesaria a la red y además absorber las corrientes armónicas, evitando su propagación hacia el resto del sistema de potencia. Esta solución requiere de un cuidadoso diseño ya que los elementos del filtro deben ser adecuadamente dimensionados y su interacción con la red debe ser analizada.

El presente trabajo está estructurado en 4 capítulos que son:

En el capítulo I, se establece los fundamentos teóricos de la investigación, pretendiendo asumir una posición de análisis de los antecedentes, bases teóricas y conceptos básicos referentes al presente estudio, que permite la concepción de definiciones y terminología básica para su comprensión.

En el capítulo II, está referido a los aspectos generales del proyecto de investigación como son planteamiento y enunciado del problema. También la justificación, hipótesis y objetivos del presente trabajo de tesis.

En el capítulo III, para concretizar el trabajo, se presenta el ámbito de estudio, el tipo de investigación y la población de estudio, asimismo la metodología empleada, técnicas e instrumentos de investigación teniendo en cuenta procedimientos pertinentes a un diseño apropiado, para cada objetivo presentado.

En el capítulo IV, se presenta los resultados de la investigación, los cuales están expresados en cuadros y gráficos para su mejor comprensión, los que fueron importantes, ya que se probó las hipótesis planteadas, considerando los objetivos presentados.

CAPÍTULO I

REVISIÓN DE LITERATURA

1.1 Marco teórico.

1.1.1 Normatividad

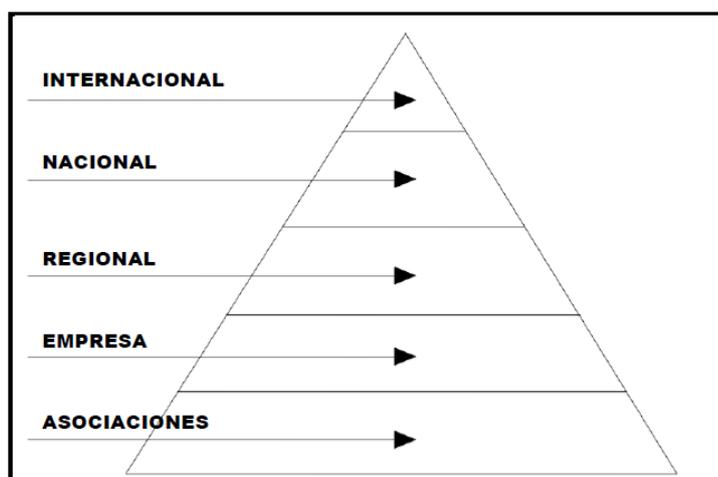


Figura 1. Clasificación de la normatividad en categorías
Fuente: Elaboración propia

1.1.1.1 Norma UNE en 50160

Esta norma describe las características principales que debe tener la tensión suministrada por una red general de distribución en baja y media tensión en condiciones normales y en el punto de entrega al cliente. Como dice su primer apartado: “esta norma da los límites o los valores de las características de la tensión que todo cliente tiene derecho a esperar, y no los valores típicos en la red general de distribución.

Define los límites para la frecuencia nominal de la tensión suministrada, la amplitud de la tensión, las variaciones de la tensión suministrada, las variaciones rápidas de la tensión (amplitud de las variaciones y severidad de los parpadeos), los huecos de tensión, las interrupciones de corta y larga duración del suministro, las sobretensiones temporales y transitorias, el desequilibrio de la tensión suministrada, las tensiones armónicas e ínter armónicas y la transmisión de señales de información por la red, así como los protocolos de medida (EN-50160, 2015).

Es importante resaltar que la norma solo es aplicable en condiciones normales de operación e incluye una lista de operaciones en las que los límites no son aplicables, como las operaciones realizadas después de una falla, acciones industriales o cortes de suministro debidos a eventos externos.

| Evento en la tensión de suministro | Magnitud | Duración |
|------------------------------------|-----------|--|
| Sags | 90 % < 1% | 10 ms < 1 minuto |
| Baja de tensión | 90 % < 1% | > 1 minuto |
| Interrupción de suministro | < 1% | < 3 minutos (breve) > 3 minutos (larga) |
| Sobretensión temporal | > 110 % | Relativamente larga |
| Sobretensión transitoria | > 110 % | Algunos milisegundos |

Figura 2. Límites según norma UNE EN 50160

Fuente: WWW.IEEE.ORG

1.1.1.2 Norma IEC 61000-3-2.

Se refiere a los límites que se deben tener para las emisiones de corriente armónica, para equipos en los cuales su entrada de corriente por fase sea ≤ 16 (Pour, 2018)

| Orden armónico h | Corriente armónica máxima permitida (A) |
|--------------------------|--|
| Armónicos Impares | |
| 3 | 2.30 |
| 5 | 1.14 |
| 7 | 0.77 |
| 9 | 0.40 |
| 11 | 0.33 |
| 13 | 0.21 |
| $15 \leq h \leq 39$ | $0.25 / h$ |
| Armónicos pares | |
| 2 | 1.08 |
| 4 | 0.43 |
| 6 | 0.30 |
| $8 \leq h \leq 40$ | $1.84 / h$ |

Figura 3. Límites para los equipos clase A según norma 61000-3-2
Fuente: WWW.IEC.ORG

Para los equipos de clase B se utilizan los valores de la tabla anterior multiplicados por un factor de 1,5.

1.1.1.3 Norma IEC 61000-2-4.

Establece los niveles de compatibilidad para las perturbaciones a nivel industrial, se puede aplicar en redes de distribución de 50 y 60 Hz, en baja y media tensión; los parámetros de variación de tensión que define son, frecuencia, forma de onda, amplitud y equilibrio de fases. Para la utilización de esta norma se debe tener en cuenta e identificar los diferentes equipos y sus características, para de esta manera establecer la clase en la cual se encuentran y así aplicar la norma (International Electrotechnical Commission, 2002) .

Clase 1: se refiere a equipos muy sensibles a perturbaciones en el suministro de energía.

Clase 2: se relaciona a puntos de conexión común y puntos de conexión interior en el entorno de la industria.

Clase 3: esta clase aplica, para alimentaciones a través de convertidores, máquinas de gran consumo de energía o motores grandes con arranques frecuentes.

1.1.1.4 Norma IEC 61000-4-30.

Define los métodos de medida de los parámetros de calidad de suministro de energía y el modo de interpretar los resultados. En la norma se indica los métodos de medir sin fijar los umbrales. Entre otros parámetros el estándar define los métodos con los cuales se detectan y evalúan, los huecos de tensión, sobretensiones temporales y las interrupciones de la tensión de suministro.

De esta manera define dos formas de utilización de la norma, denominadas clase A y B, la primera clase se refiere a medidas de baja incertidumbre, verificación de cumplimiento de las normas, aplicaciones contractuales, etc. La clase B está destinada a estudios estadísticos, o solución de problemas en instalaciones eléctricas relacionadas con la calidad de energía (Pour, Electric, & Sas, 2018b) .

1.1.1.5 Estándar IEEE 1159.

Define siete categorías distintas de fenómenos electromagnéticos en las redes eléctricas: transitorios, variaciones corta duración, variaciones de larga duración, desequilibrio de tensión, distorsión de la forma de onda, fluctuaciones de tensión y variaciones de la frecuencia (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2009) .

Las variaciones de corta duración comprenden los Sags, las interrupciones y los “swell”. Cada tipo de clasifica en instantáneo momentáneo o temporal dependiendo de su duración.

Las variaciones de corta duración (Swells, Sags e interrupciones sostenidas) se producen casi siempre por condiciones de fallo, por la conexión de cargas que requieren grandes corrientes de arranque.

Dependiendo de la ubicación de la falla se pueden producir sobretensiones, subtensiones o interrupciones temporales. Sin importar el lugar en el cual se localice la falla (lejos o cerca del punto de estudio), su efecto sobre la tensión va a ser una variación de corta duración.

| Categorías | Duración típica | Magnitud típica de la tensión |
|---------------------------------------|------------------|-------------------------------|
| 1.0 Variaciones corta duración | | |
| 1.1 Instantánea | | |
| 1.1.1 Hueco | 0.5 – 30 ciclos | 0.1 – 0.9 p.u. |
| 1.1.2 Swell | 0.5 – 30 ciclos | 1.1 – 1.8 p.u. |
| 1.2 Momentánea | | |
| 1.2.1 Interrupción | 0.5 ciclos – 3 s | < 0.1 p.u. |
| 1.2.2 Hueco | 30 ciclos – 3 s | 0.1 – 0.9 p.u. |
| 1.2.3 Swell | 30 ciclos – 3 s | 1.1 – 1.4 p.u. |
| 1.3 Temporal | | |
| 1.3.1 Interrupción | 3 s – 1 min | < 0.1 p.u. |
| 1.3.2 Hueco | 3 s – 1 min | 0.1 – 0.9 p.u. |
| 1.3.3 Swell | 3 s – 1 min | 1.1 – 1.2 p.u. |
| 2. variaciones larga duración | | |
| 2.1 Interrupción | > 1 min | 0.0 p.u. |
| 2.2 Subtension | > 1 min | 0.8 – 0.9 p.u. |
| 2.3 Sobretension | > 1 min | 1.1 – 1.2 p.u. |

Figura 4. Límites de corta y larga duración según la norma IEEE 1159
Fuente: WWW.IEEE.ORG

1.1.1.6 Norma IEC 5552.

La norma establece las exigencias sobre armónicas que deben cumplir todos aquellos equipos que consumen menos de 16 Amperios por fase en la red 220 V a 415 V, entre ellos figuran los computadores personales y los televisores. La norma establece los límites en base a valores eficaces (rms) de cada armónica, la relación entre el valor eficaz y el valor máximo eficaz y valor máximo.

1.1.1.7 Estándar IEEE 519

En la recomendación (IEEE, 1992) encontramos las “Recomendaciones Prácticas y Requerimientos para el Control de armónicas en Sistemas Eléctricos de Potencia”. Existe un efecto combinado de todas las cargas no lineales sobre el sistema de distribución la cual tienen una capacidad limitada para absorber corrientes armónicas. Los operadores de red de energía eléctrica, tienen la responsabilidad de suministrar óptimo nivel de tensión y forma de onda. La IEEE 519 hace referencia no solo al nivel absoluto de armónicos producido por una fuente individual sino también a su magnitud con respecto a la red de abastecimiento.

Donde existan problemas, a causa de la inyección excesiva de corriente armónica o distorsión de tensión, es obligatorio para el suministrador y el

consumidor, resolver estos problemas. Por tal motivo el propósito de esta norma es el de recomendar límites en la distorsión armónica de acuerdo básicamente a dos criterios:

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

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

Todos los valores de distorsión de corriente se dan en base a la máxima corriente de carga (demanda). La distorsión total está en términos de la distorsión total de la demanda (TDD) en vez del término más común THD. En la siguiente tabla se muestra los límites de corriente para componentes de armónicas individuales, así como también distorsión armónica total. Por ejemplo, un consumidor con un SCR entre 50 y 100 tiene un límite recomendado de 12.0% para TDD, mientras que para componentes armónicas impares individuales de ordenes menores a 11, el límite es del 10%.

| Límites de Corriente Armónica para Carga no lineal en el Punto Común de acoplamiento con Otras Cargas, para voltajes entre 120 - 69,000 volts. | | | | | | |
|--|------|---------|---------|---------|------|------|
| Máxima Distorsión Armónica Impar de la Corriente, en % del Armónico fundamental | | | | | | |
| ISC/IL | <11 | 11≤h<17 | 17≤h<23 | 23≤h<35 | 35≤h | TDD |
| <20* | 4.0 | 2.0 | 1.5 | 0.6 | 0.3 | 5.0 |
| 20<50 | 7.0 | 3.5 | 2.5 | 1.0 | 0.5 | 8.0 |
| 50<100 | 10.0 | 4.5 | 4.0 | 1.5 | 0.7 | 12.0 |
| 100<1000 | 12.0 | 5.5 | 5.0 | 2.0 | 1.0 | 15.0 |
| >1000 | 15.0 | 7.0 | 6.0 | 2.5 | 1.4 | 20.0 |

Figura 5. Límites según la norma IEEE 1159

Fuente: WWW.IEEE.ORG

La IEEE 519 establece también otros parámetros de la calidad de la energía eléctrica como lo son los siguientes:

Flicker de Tensión: Los lineamientos para el parpadeo de tensión ocasionado por consumidores individuales, se encuentran recomendados en la IEEE 519.

El segundo conjunto de parámetros eléctricos establecidos por la IEEE 519 se refiere a los límites de distorsión de la tensión. Los límites armónicos de tensión recomendados se basan en niveles lo suficientemente pequeños como para garantizar que el equipo de los suscriptores opere satisfactoriamente. La figura 6 contempla los límites de distorsión armónica de voltaje según IEEE 519.

| Voltaje de barra en el punto de acoplamiento común | Distorsión individual de Tensión (%) | Distorsión total del voltaje THD (%) |
|--|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Hasta 69 KV | 3.0 | 5.0 |
| De 69 KV a 137.9 KV | 1.5 | 2.5 |
| 138 KV y mas | 1.0 | 1.5 |

Nota: Los sistemas de alto voltaje pueden llegar hasta un 2.0% en THD cuando lo que causa es un alto voltaje terminal DC, el cual podría ser atenuado.

Figura 6. Límites de distorsión según la norma IEEE 1159

Fuente: WWW.IEEE.ORG

Como es común, los límites se imponen sobre componentes individuales y sobre la distorsión total para la combinación de todos los voltajes armónicos (distorsión armónica). Lo diferente en esta tabla, sin embargo, es que se muestran tres límites diferentes. Ellos representan tres niveles de voltaje; hasta 69 KV, de 69 a 161 KV, y por encima de 161 KV. Al aumentar los voltajes disminuyen los límites de distorsiones, al igual que para los límites de corrientes.

1.1.2 Definiciones

Según el Ministerio de Energía y Minas. (2011) plantea las siguientes definiciones:

a. Líneas de suministro eléctrico: Aquellos conductores utilizados para transmitir energía eléctrica y sus estructuras de soporte de contención.

b. Suministro: Conjunto de instalaciones que permiten la alimentación de la energía eléctrica en forma segura y que llega hasta el punto de entrega.

c. Calidad de energía eléctrica: Esta relacionado con las perturbaciones electromagnéticas y eléctricas que pueden afectar las condiciones eléctricas de un suministro (tensión y/o corriente) y ocasionar el mal funcionamiento o daño a equipos eléctricos y procesos industriales.

d. Calidad de voltaje: Está referido aun voltaje ideal que es una onda senoidal a una sola frecuencia que tiene una magnitud y frecuencia constante.

e. Calidad de corriente: El cual es referido a una corriente ideal, el cual es una onda senoidal de una sola frecuencia que tiene una magnitud y frecuencia constante.

f. Potencia activa: Por definición, una potencia activa es la energía eléctrica que realiza un trabajo activo tales como brindar luz a los focos y encender los ejes de motor para suministrar potencia eléctrica, o “Es la potencia que consume una carga durante un periodo tiempo (Edminister, 1999).

g. Potencia reactiva: Es la medida de la cantidad de corriente que conforma el componente reactivo. El componente VAR de un sistema eléctrico fluye fuera de fase con respecto al componente real y típicamente está retrasado al flujo de potencia activa. Se necesitan los VAR para sostener los campos magnéticos en los transformadores y los devanados de los motores.

Según la norma IEC 61000 (Pour, Electric, & Sas, 2018a) se tiene los siguientes conceptos:

h. Calidad de la energía eléctrica: Se define en términos de compatibilidad electromagnética y es la capacidad de un aparato, equipo o sistema para funcionar

en su entorno electromagnético de forma satisfactoria y si producir el mismo perturbaciones electromagnéticas intolerables para todo aquello que se encuentre en este entorno.

El estándar IEC 61000-4-30 define Power Quality como las “características de la electricidad en un punto dado de una red de energía eléctrica, evaluadas con relación a un conjunto de parámetros técnicos de referencia” (Freddy & Victor, 2009)

El estándar IEEE 1159-1995 define la calidad de la energía eléctrica como “una gran variedad de fenómenos electromagnéticos que caracterizan la tensión y la corriente en un instante dado y en un punto determinado de la red eléctrica” (Freddy & Victor, 2009)

i. Armónico: componente senoidal de una onda periódica con una frecuencia que es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental. La Figura 7 muestra una distorsión armónica en la forma de onda de la tensión. Los armónicos generalmente no son producidos por la empresa de energía, son más bien generados por los consumidores como cargas industriales no lineales y si estos armónicos son de suficiente magnitud, pueden desplazarse hacia el sistema de potencia y afectar a otros consumidores.

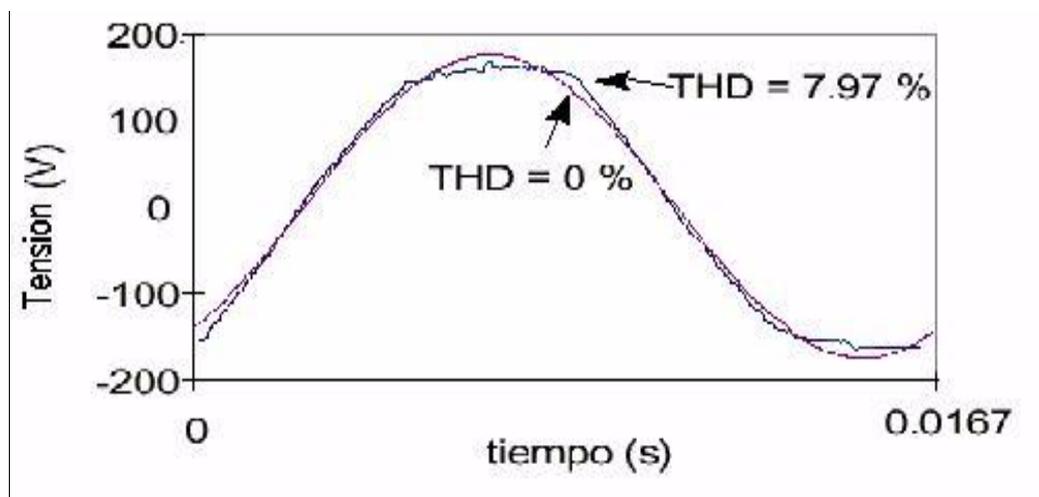


Figura 7. Distorsión armónica en la forma de onda de tensión

Fuente: Texto CSEE- S. Ramírez

j. Hendidura (Notching): hace referencia a depresiones sustractivas de tensión. Hay casos en los cuales puede perderse totalmente la señal hasta por medio ciclo. Los notching se presentan durante el periodo de conmutación de los puentes convertidores, debido a la acción de conmutación de los elementos que lo componen. La figura 8 es un ejemplo de ello.

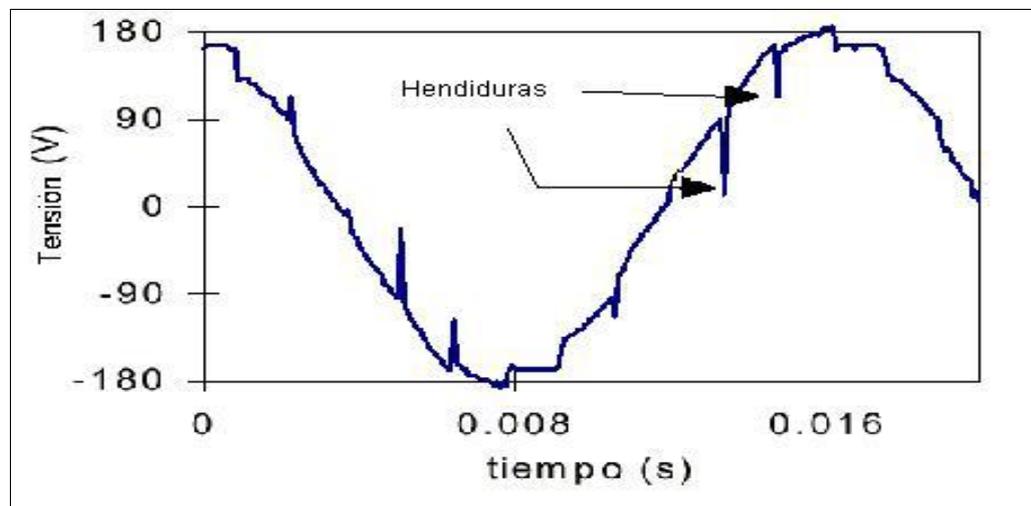


Figura 8. Onda afectada por hendiduras
Fuente: Texto CSEE- S. Ramírez

k. Caída momentánea de tensión (Sag –DIPS): es una reducción en la tensión RMS por debajo de lo permitido a frecuencia industrial con una duración mayor a medio ciclo, pero menor a 2 minutos (ver Figura 9). Puede ser causada por fallas en sistemas de transmisión o distribución, o por suicheo de corrientes elevadas, causar emplazamiento de cargas sensibles y mala operación.

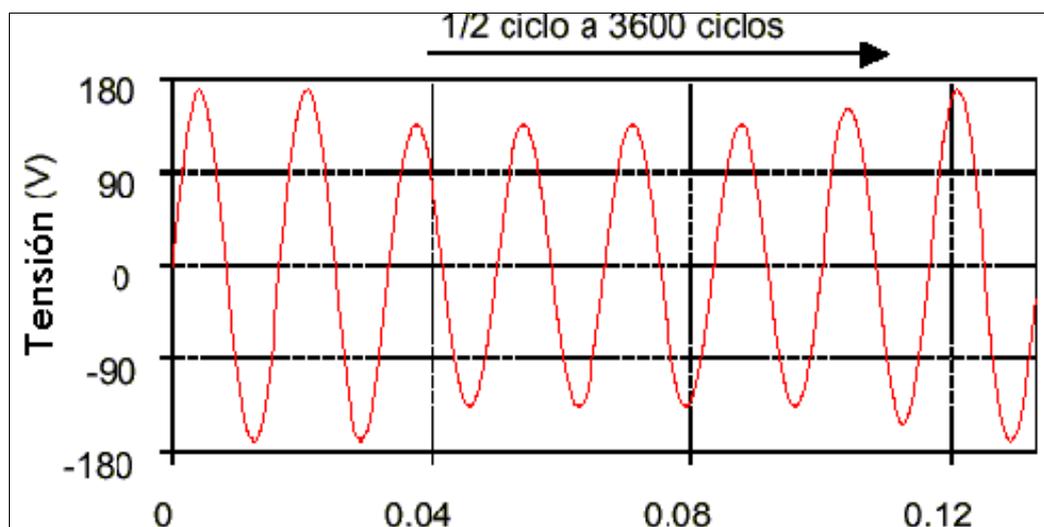


Figura 9. Onda de tensión afectada con SAG
Fuente: Texto CSEE- S. Ramírez

l. Elevación momentánea de tensión (Swell): incremento en la tensión RMS por encima de lo permitido a frecuencia industrial, con duración mayor a medio ciclo y menor a unos pocos segundos. Se presenta en las fases no falladas de un sistema trifásico, durante una falla monofásica a tierra. La figura 10 muestra una onda de tensión con swell.

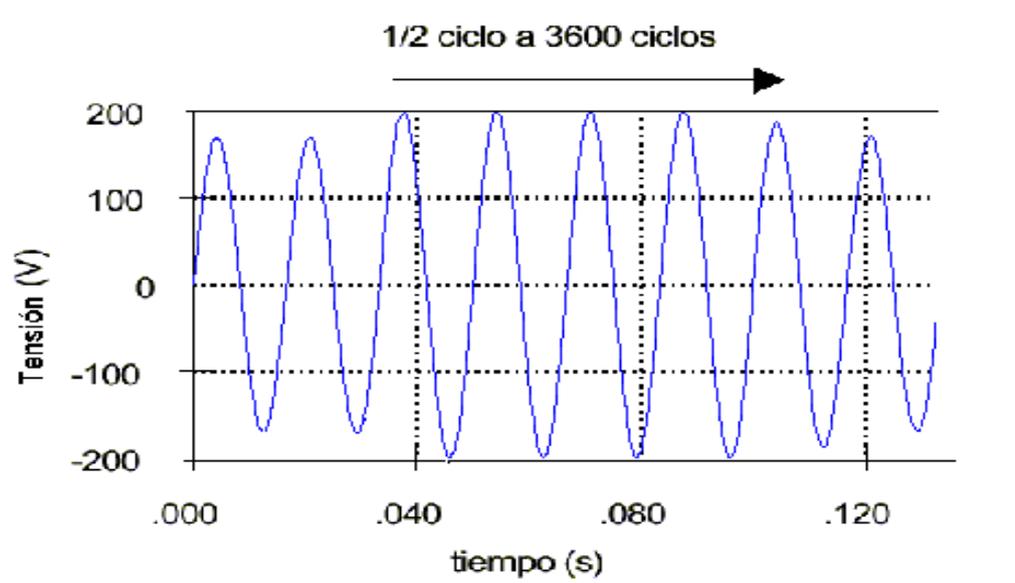


Figura 10. Onda de tensión con swell
Fuente: Texto CSEE- S. Ramírez

m. Transitorio: es un evento de alta frecuencia sobrepuesto a la señal AC. La duración es por lo general inferior a medio ciclo, puede ser aditivo o sustractivo y decae oscilatoriamente. Observe la figura 11.

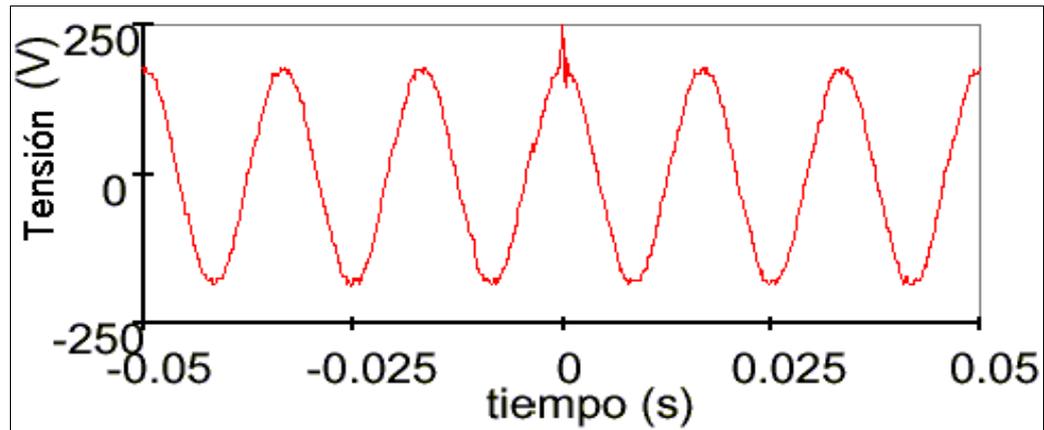


Figura 11. Onda de tensión afectada por un transitorio

Fuente: Texto CSEE- S. Ramírez

n. Interarmónico: es una componente senoidal cuya frecuencia no es un múltiplo entero de la frecuencia industrial.

o. Cortes, salidas o interrupciones (Outage): son pérdidas de tensión desde 30 ciclos hasta muchas horas, inclusive días. Usualmente son causados por fallas en la operación de breakers o fusibles. Las interrupciones pueden ser temporales o permanentes. Un outage describe el estado de un componente cuando no está disponible para ejecutar su función asignada, debido a algunos eventos directamente asociados con ese componente. Una outage puede o no causar una interrupción del servicio a los consumidores dependiendo de la configuración del sistema. La figura 12 muestra una interrupción en la onda de tensión.

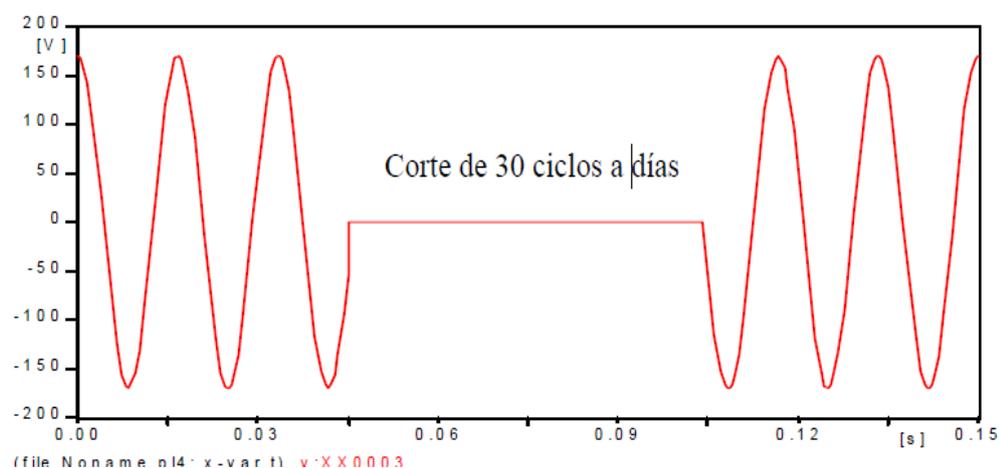


Figura 12. Interrupción típica de una onda de tensión

Fuente: Texto CSEE- S. Ramírez

p. Impulsos (descargas atmosféricas o impulsos por maniobras): son transitorios de tensión o de corriente de muy corta duración y muy alta magnitud. Son producidos por rayos y por operaciones de suicheo de las cargas de los usuarios y de la empresa de energía. Usualmente son de 100 a 500 voltios y no causan problemas perceptibles. La figura 13 muestra una onda de tensión con impulso.

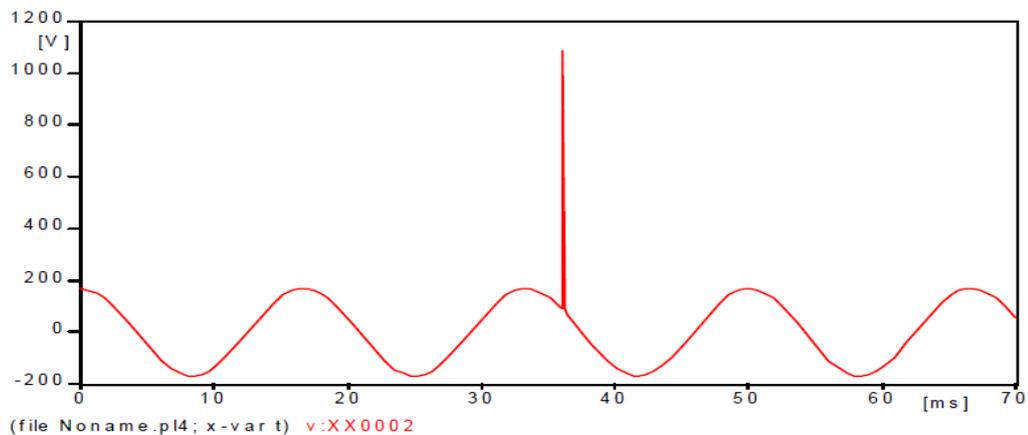


Figura 13. Onda de tensión con impulso
Fuente: Texto CSEE- S. Ramírez

q. Caídas de tensión (Under voltage – voltage drop): la figura 14 ilustra una caída permanente de tensión.

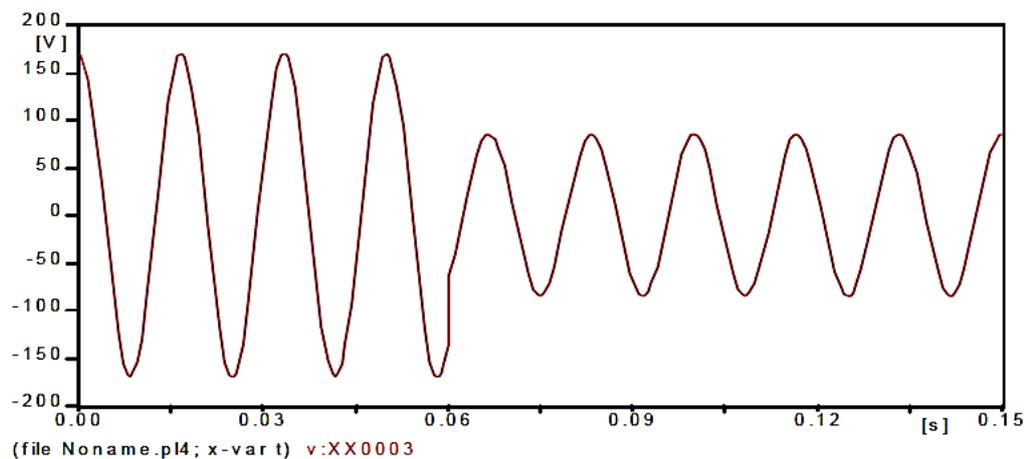
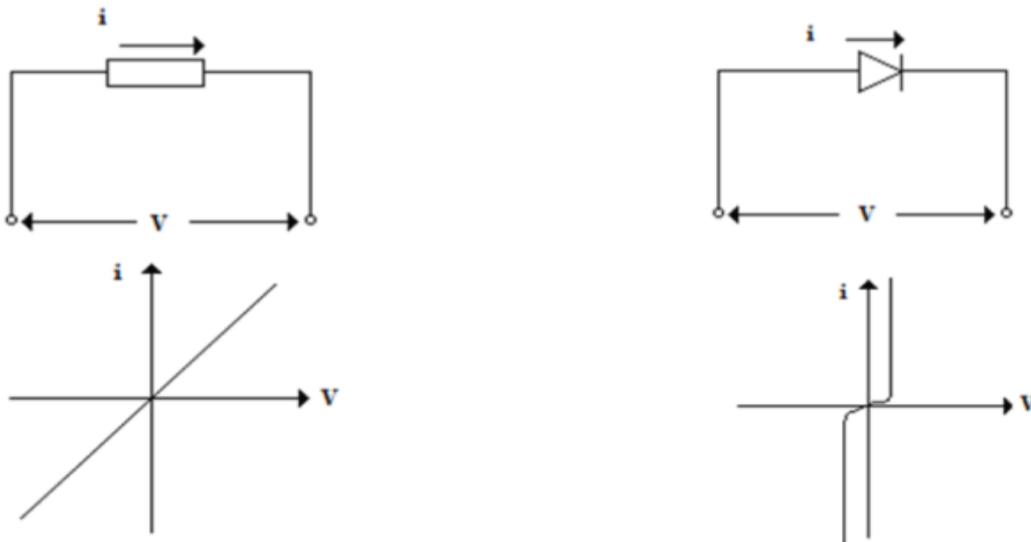


Figura 14. Caída permanente de tensión
Fuente: Texto CSEE- S. Ramírez

1.1.3 Tipos de cargas

Una carga es un elemento que consume energía eléctrica, en general existen dos tipos de cargas dentro de los sistemas eléctricos: *Cargas lineales* y las *Cargas no*

lineales. Una carga es lineal cuando la tensión aplicada a sus extremos y la corriente que pasan por ella están estrechamente relacionadas como se puede observar en la figura 13 a). Por el contrario, se dice que una carga es no lineal cuando la relación tensión/corriente no es constante lo cual se representa en la figura 15).



a) Elemento Lineal.

b) Elemento no lineal.

Figura 15. Elemento lineal y no lineal

Las cargas no lineales conectadas a la red de corriente alternan absorben corrientes que no son senoidales. Esto se observa en la figura 16.

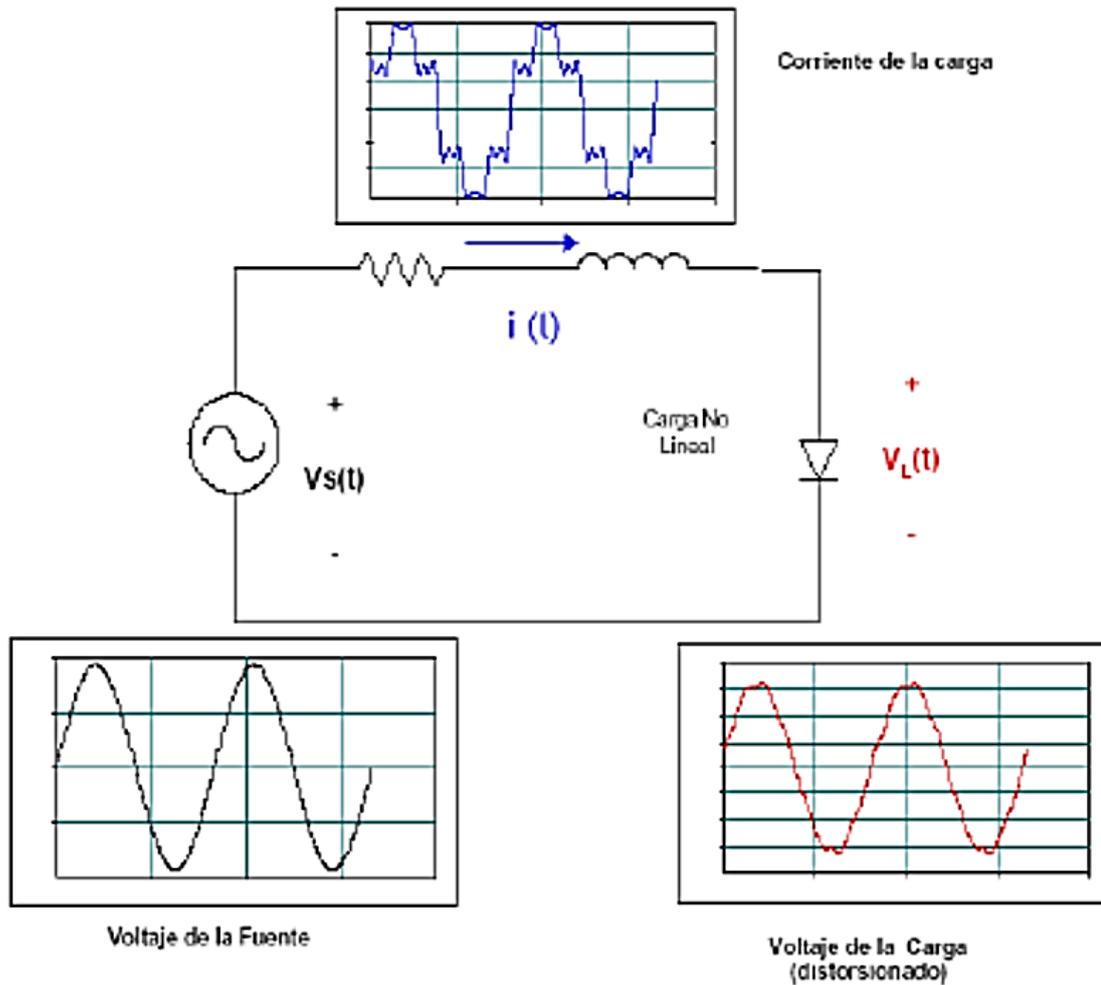


Figura 16. Formas de onda lineal y no lineal
Fuente: www.elprisma.com

A continuación, se citan algunas cargas típicas no lineales :

- Equipos electrónicos, en general monofásicos, que internamente trabajan con corriente continua (ordenadores, impresora, autómatas programables, etc.).
- Instalaciones de iluminación con lámparas de descarga.
- Transformadores, reactancias con núcleos de hierro, etc., cuya curva de magnetización es no lineal.

Cuyo comportamiento es como se detalla en la figura 17.

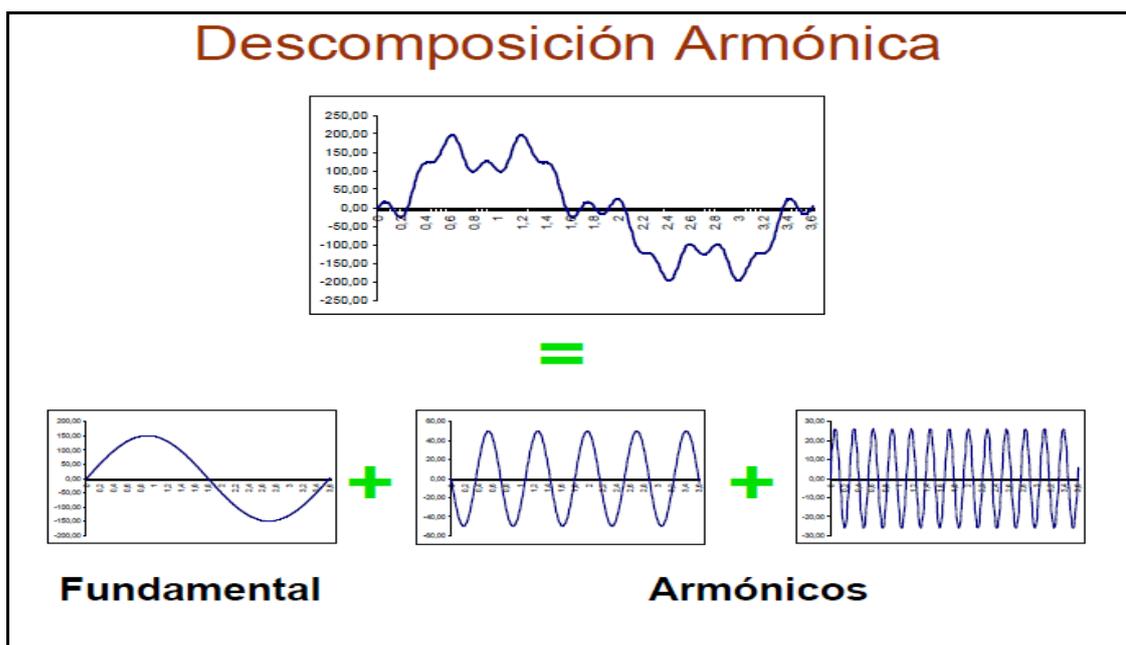


Figura 17. Descomposición de la onda armónica

Fuente: www.circuitor.com

1.1.3.1 Cargas resistivas

Tales cargas son referidas como si tuvieran una resistencia eléctrica designada con la letra R y expresada en Ohm (Ω). Las cargas resistivas pueden encontrarse en equipos como lámparas incandescentes, planchas y estufas eléctricas, en donde la energía que requieren para funcionar es transformada en energía lumínica o energía calorífica, en cuyo caso el factor de potencia toma el valor de 1.0.

En un circuito puramente resistivo, la corriente está en fase con la tensión y es función inmediata de la tensión. Por lo tanto, si la tensión y la corriente están en fase, tenemos que:

$$I = \frac{V}{R} \dots \dots \dots (1)$$

Donde:

I = Corriente eléctrica (A).

V = Tensión eléctrica (V).

R = Resistencia eléctrica (Ω).

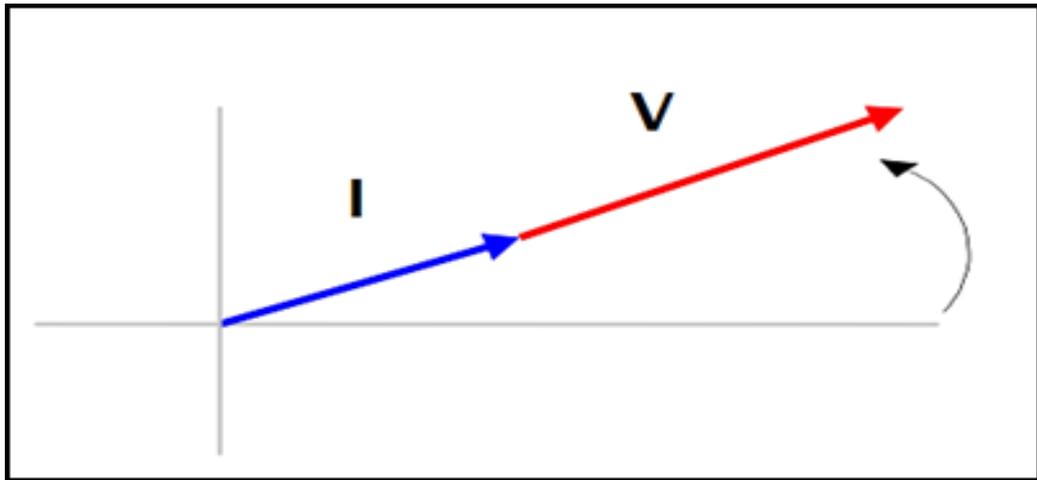


Figura 18. Diagrama fasorial de un circuito resistivo

Fuente: Elaboración Propia

La resistencia eléctrica absorbe potencia en Watts igual a:

$$P = VI = RI^2 = \frac{V^2}{R} \dots\dots\dots (2)$$

Donde:

P = Potencia activa (W).

Las cargas de tipo resistivo que se encuentran más comúnmente en los sistemas eléctricos ya sea residencial, industrial o comercial son los siguientes:

- Hornos eléctricos.
- Calefactores.
- Planchas.
- Alumbrado incandescente.

En la figura 19, se muestran las ondas senoidales de tensión y corriente eléctrica en función del tiempo y el desfase que existe entre ellas, la cual es igual a cero, es decir, se encuentran en fase.

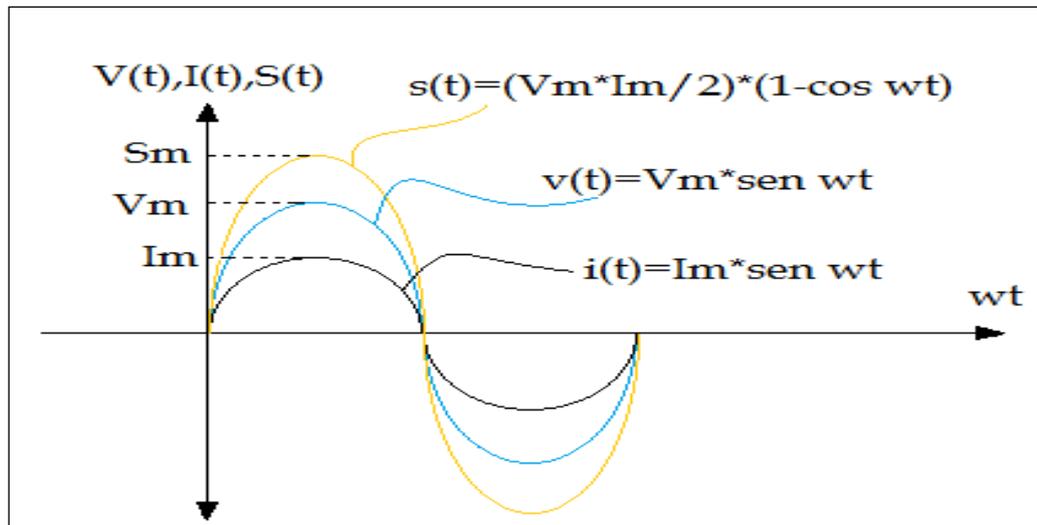


Figura 19. Onda de tensión y corriente en fase
Fuente: Elaboración Propia

1.1.3.2 Cargas inductivas

Las cargas inductivas son encontradas en cualquier lugar donde haya bobinados involucrados, por ejemplo, en los equipos del tipo electromecánicos como los motores, balastos, transformadores, entre otros; además de consumir potencia activa, requieren potencia reactiva para su propio funcionamiento, por lo cual trabajan con un factor de potencia menor a 1.0. En un circuito puramente inductivo la corriente no está en fase con la tensión ya que va atrasada 90° con respecto a la tensión. En la figura 20, se presenta el diagrama fasorial correspondiente a las cargas inductivas.

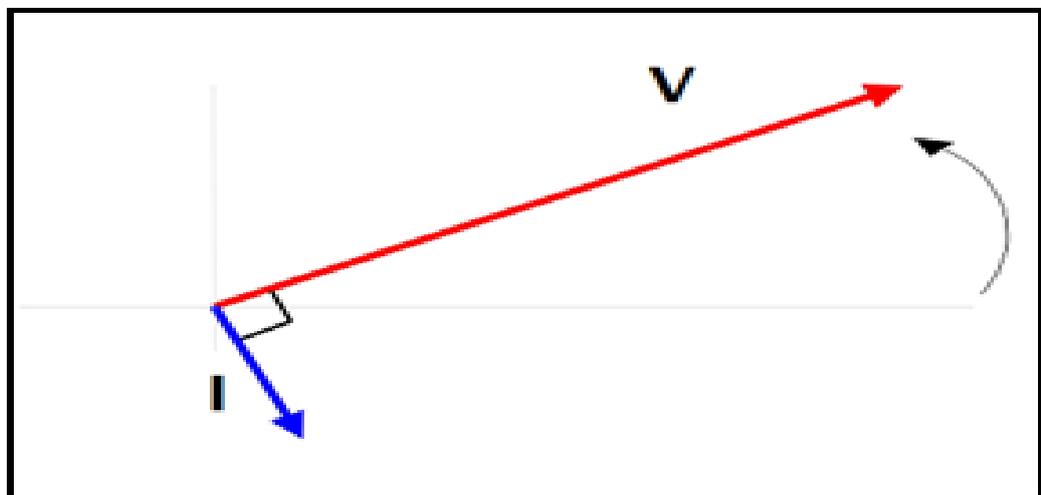


Figura 20. Diagrama fasorial de un circuito inductivo
Fuente: Elaboración Propia

Algunos equipos de cargas del tipo inductivo son los siguientes:

- Transformadores.
- Motores de inducción.
- Alumbrado fluorescente
- Maquinas soldadoras.

En la figura 21 se muestran las ondas senoidales de tensión y corriente eléctrica en función del tiempo y el desfase de 90° de la corriente con respecto a la tensión.

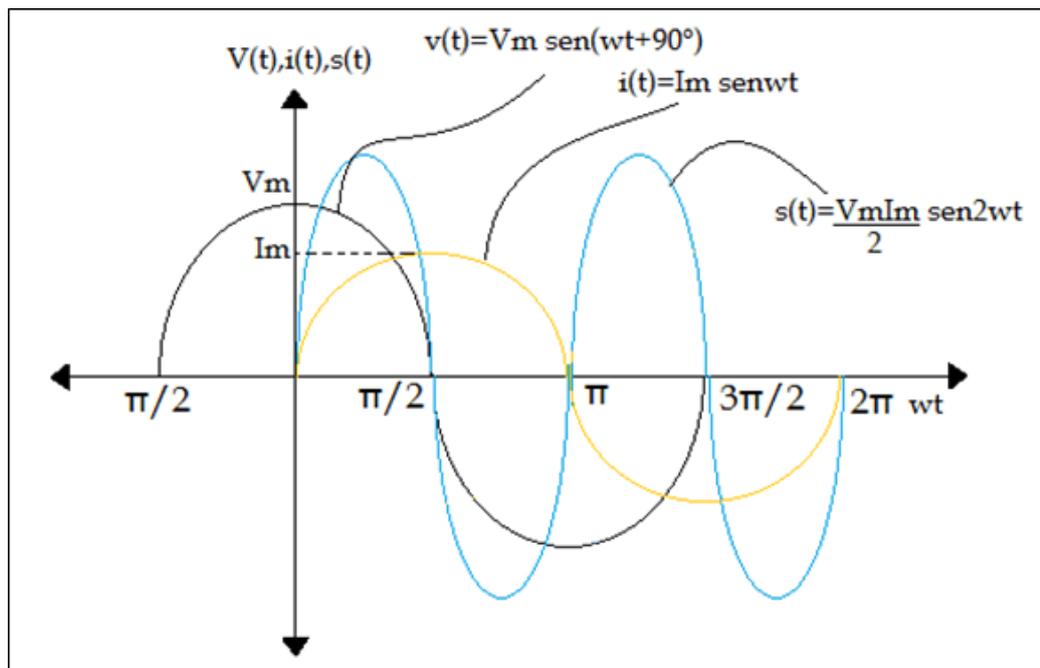


Figura 21. Onda de corriente atrasada 90° respecto a la tensión

Fuente: Elaboración Propia

1.1.3.3 Cargas capacitivas

Las cargas capacitivas se presentan en los capacitores y se caracterizan porque la corriente se encuentra adelantada respecto de la tensión 90° . En la figura 22 se presenta el diagrama fasorial correspondiente a las cargas capacitivas.

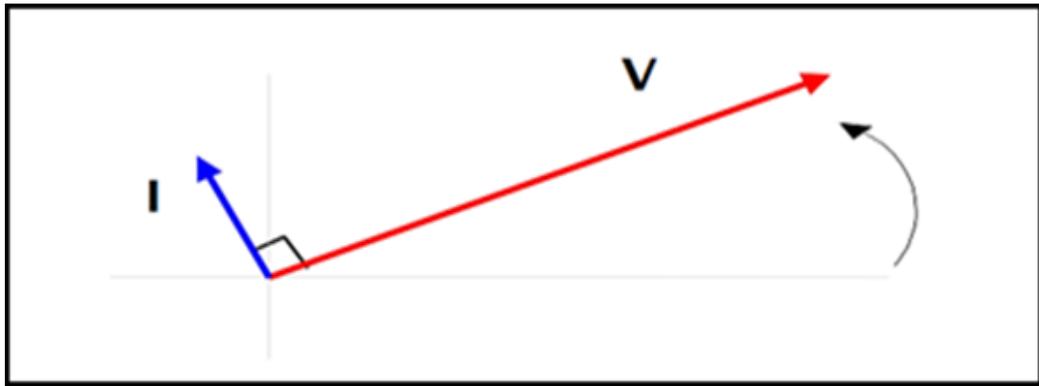


Figura 22. Diagrama fasorial de un circuito capacitivo

Fuente: Elaboración Propia

Las cargas de tipo capacitivo son:

- Bancos de capacitores.
- Motores síncronos.

En un circuito puramente capacitivo, no existe consumo de energía aún si hay corriente circulando.

Las cargas capacitivas generan potencia reactiva expresada en volts amperes reactivos (VAr). En la figura 23 se muestran las ondas senoidales de tensión y corriente eléctrica en función del tiempo, para este caso la corriente se adelanta 90° con respecto a la tensión.

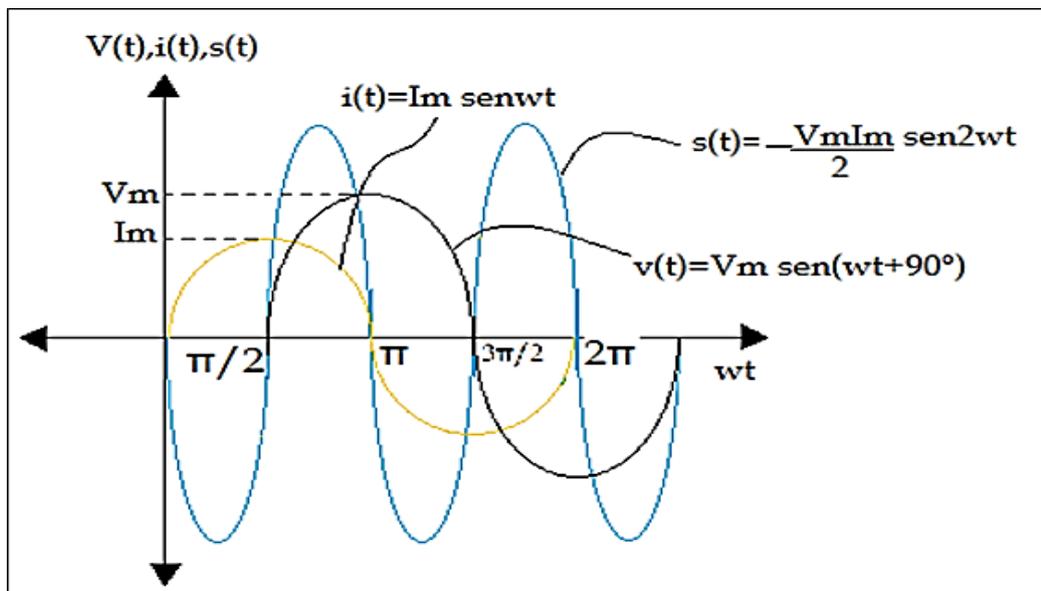


Figura 23. Onda de corriente adelantada 90° respecto a la tensión

Fuente: Elaboración Propia

1.1.3.4 Cargas combinadas

En la práctica una carga no está constituida solamente por cargas resistivas, inductivas o capacitivas, ya que estas tres cargas con frecuencia coexisten en los circuitos eléctricos.

Sin embargo, para el caso de una industria la carga más predominante es la carga inductiva, de ahí que sea el factor por el cual se realiza este trabajo.

Las diversas cargas son usualmente abastecidas directamente de la red principal de suministro eléctrico, sin embargo, el suministro de potencia reactiva puede ser suministrado por equipos conectados en un punto de la red eléctrica, normalmente se utiliza para ello los bancos de capacitores que son fuentes suministradoras de potencia reactiva.

1.1.4 El triángulo de potencias

El llamado triángulo de potencias es la mejor forma de observar y comprender de forma gráfica qué es el factor de potencia o $\cos \varphi$ y su estrecha relación con los restantes tipos de potencia presentes en un circuito eléctrico de corriente alterna, además de observar la interacción de una potencia con respecto a las otras dos ya que al modificar una potencia repercutiría en la modificación de las otras dos potencias.

El factor de potencia sin presencia de armónicos, lo podemos deducir a través del triángulo de potencias de la figura 24.

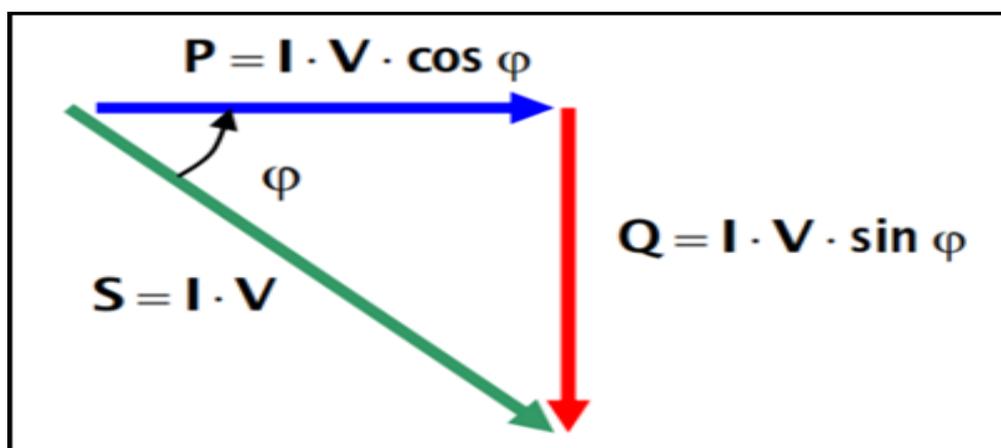


Figura 24. Triangulo de potencias
Fuente: Elaboración Propia

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \tag{1}$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \tag{2}$$

El factor de potencia con presencia de armónicos:

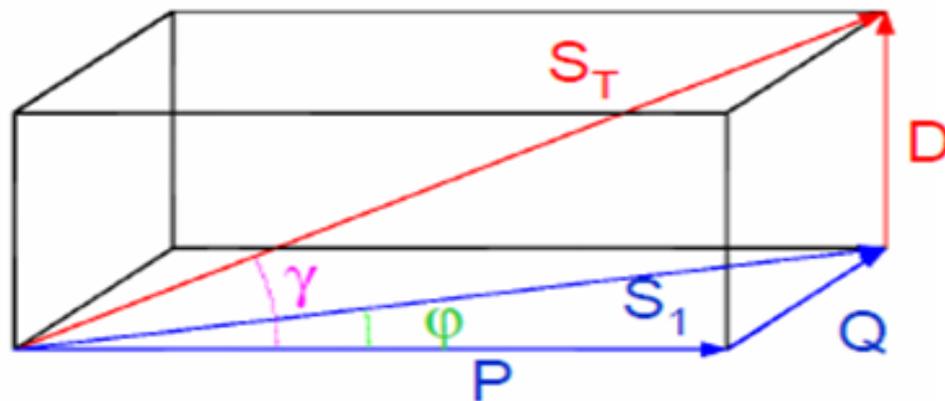


Figura 25. Triangulo de potencias con presencia de armónicos

Fuente: Elaboración Propia

$$FP = \frac{P}{S} \tag{3}$$

$$FP = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \tag{4}$$

1.1.5 Problemas causados por los armónicos

La siguiente tabla muestra un resumen realizado por el Ministerio de Energía y Minas (MEM, 2017) sobre los efectos observados por los armónicos en la vida de los equipos.

| EQUIPO | EFFECTOS OBSERVADOS |
|------------------------|---|
| Transformador | Sobrecalentamiento si en factor “k” es elevado (superior a 2,7), y la carga es superior al 90% de la nominal |
| Capacitores | Los capacitores pueden llegar a quemarse si la corriente es 1,3 veces la corriente nominal |
| Motores de Inducción | Sobrecalentamiento y vibraciones excesivas si la distorsión de tensión es superior a 5% |
| Cables de conexión | Sobrecalentamiento si el valor efectivo de la corriente es superior a la que soporta el cable |
| Equipos de computación | Pérdidas de algunos datos y daños en algunas componentes electrónicas debido a que el voltaje máximo es superior al nominal o a que existe una diferencia de voltaje entre neutro y tierra. |

Figura 26. Resumen de efectos de los armónicos

Fuente: Ministerio de Energía y Minas

La filosofía del desarrollo de límites armónicos recomienda:

- Limitar la inyección armónica de consumidores individuales para que ellos no causen niveles de distorsión de voltaje inaceptables para características normales del sistema, estos límites dependerán del tamaño del consumidor (corriente de cortocircuito del mismo).
- Limitar la distorsión armónica global del sistema de alimentación de voltaje por la subestación alimentadora (IEEE-519, 1992).

1.2 Antecedentes.

En el estudio que se realiza de sistemas con cargas no-lineales el flujo de carga debe ser modificado para incluir la respuesta del sistema a distintas frecuencias armónicas. Se plantean las principales metodologías de solución al flujo de carga armónico y se presenta un método enfocado hacia los sistemas radiales. Para esto se utiliza un algoritmo de barrido iterativo. El procedimiento se presenta para sistemas balanceados pero puede ser expandido fácilmente a sistemas desbalanceados (Garces *et al.*, 2004).

Inicialmente empieza con el modelamiento de los componentes del sistema eléctrico de potencia, para luego aplicar el método del barrido.

Los armónicos son distorsiones o deformaciones de las ondas senoidales de tensión y/o corriente de los sistemas eléctricos de potencia, debidos principalmente al uso de cargas con impedancia no lineal (computadores, televisores, variadores de velocidad, rectificadores, hornos de arco, lámparas fluorescentes, arrancadores electrónicos, etc.), al uso de materiales ferromagnéticos en las máquinas eléctricas, a operaciones de conmutación en subestaciones y en general al uso de equipos que necesiten realizar conmutaciones en su operación normal. El efecto del uso de estos dispositivos es la aparición, en los sistemas eléctricos, de unas corrientes y/o tensiones adicionales con unas frecuencias diferentes a la frecuencia fundamental de la onda senoidal original. La circulación de corrientes y/o tensiones adicionales en el sistema eléctrico de potencia hace que se presenten problemas como el aumento de pérdidas de potencia activa, sobretensiones en los condensadores, errores de medición, mal funcionamiento de protecciones, daño en los aislamientos, deterioro de dieléctricos y disminución de la vida útil de los equipos, entre otros. (Rios *et al.*, 2013)

Suárez *et al.* (2010) analizan potenciales variables que afectan a la corriente de neutro cuando los receptores conectados presentan características no lineales. Se simula en el programa Alternative Transients Program distintos escenarios combinando el tipo y número de unidades de cargas, alimentadas sucesivamente con tensiones senoidales, simétricas, balanceadas, asimétricas y desbalanceadas. También ha sido estudiado el efecto de armónicos en la tensión de alimentación. A los efectos de contrastar resultados se registraron mediciones de campo en un centro de cómputos. Como producto de las simulaciones con fuentes asimétricas y desbalanceadas se comprobó variaciones en la corriente de neutro de hasta un 5%. Los análisis de los efectos diversidad y atenuación registraron variaciones más importantes: 10% y 20% respectivamente. Los resultados muestran que las asimetrías y desbalances en las fuentes de alimentación tienen una ligera incidencia en la corriente de neutro, mientras que los efectos diversidad y atenuación fueron más importantes.

En sistemas trifásicos de cuatro hilos, se espera que la corriente en el conductor de neutro sea inferior al 20% de la corriente de fase, si las cargas son razonablemente balanceadas.

Sin embargo, la corriente en el neutro se puede incrementar debido al desbalance de cargas y la proliferación de equipos tales como: computadoras personales, impresoras,

fax y en general, equipos electrónicos con fuentes monofásicas conmutadas. En este documento se analizan los problemas más comunes producidos por la corriente del neutro, tales como: la sobrecarga en dicho conductor, incremento del ruido en modo común (tensión neutro-tierra), distorsión de tensión y corriente, factor de diversidad y atenuación. Se presentan además medidas en dos centros de cómputo y en una instalación comercial (Cadavid & Gallego, 2013).

Según Gómez *et al.* (2016) diseñan y construye un prototipo para la compensación de armónicos de 5kVA en sistemas de distribución trifásica de 220V. Los elementos fundamentales que constituyen el hardware son: bobina de acople, condensador, dispositivos semiconductores y controlador. Los algoritmos de control que se encargan de la operación del filtro activo en cada instante de tiempo son Teoría PQ, Control Lineal-PWM y control PI. Los filtros activos de potencia son una solución a la presencia de armónicos en los sistemas de potencia. Compensan los armónicos generados por las cargas, no presentan problemas de resonancia y tienen respuesta dinámica.

Para el análisis del comportamiento completo de la distorsión armónica es necesario. Primero del estudio de flujo de carga para la obtención de las magnitudes eléctricas en la frecuencia fundamental. Para la evaluación de armónicos es necesario de introducir modelos adecuados para reproducir el fenómeno total. La herramienta de flujo de armónicos permite la evaluación de las tensiones y corrientes armónicas de redes eléctricas considerando la inyección de armónicos de corriente de las cargas no lineales.

De acuerdo a las simulaciones realizadas se observó que las armónicas orden 11, 7 y 5 son las que aportan más contaminación al sistema considerando la inclusión de variadores de velocidad de 6 pulsos (Rivas, 2016)

CAPITULO II

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 Identificación del Problema

Los armónicos son distorsiones o deformaciones de las ondas senoidales de tensión y/o corriente de los sistemas eléctricos de potencia, debidos principalmente al uso de cargas con impedancia no lineal (computadores, televisores, variadores de velocidad, rectificadores, hornos de arco, lámparas fluorescentes, arrancadores electrónicos, etc.), al uso de materiales ferromagnéticos en las máquinas eléctricas, las operaciones de conmutación en subestaciones de transformación y en general al uso de equipos que necesiten realizar conmutaciones en su operación normal (Rios *et al.*, 2013).

El uso cada vez más frecuente de cargas no lineales y el avance de la tecnología como computadoras personales (PCs), lámparas fluorescentes compactas (LFCs), lámpara LED, fuentes conmutadas de diferentes equipos electrónicos, etc. ha motivado en los últimos años la atención de los investigadores de la ingeniería eléctrica en los distintos problemas provocados por la degradación de la calidad de la energía (Suárez, Mauro, & Anaut, 2010).

Idealmente, tanto la tensión en una barra de suministro de energía eléctrica como la corriente resultante deben presentar formas de onda perfectamente senoidales, pudiendo o no existir un desfase entre los mismos. En la práctica estas formas de onda están distorsionadas o sea no son ondas perfectamente senoidales, por causa de los armónicos producidos, los cuales son señales cuya frecuencia es un múltiplo entero de la fundamental, la suma de estas señales da como resultado la señal distorsionada original, siendo esta 60 Hz, y los armónicos que más se generan en los sistemas eléctricos son los de orden impar, tales como 180 Hz el tercer armónico, 300 Hz el

quinto armónico, 420 Hz el séptimo armónico y así sucesivamente. Para efectos de estudio estas desviaciones con respecto a la fundamental se expresan en términos de distorsión armónica, (en inglés en los sistemas eléctricos de potencia) THD.

La figura 1 ilustra la onda senoidal de corriente alterna a la frecuencia fundamental (60 Hz) y su 2do, 3ro, 4to, y 5to armónico, en cada gráfica se observa la relación de frecuencia angular de las ondas (ω), entre mayor es el armónico (ω) se hace más grande.

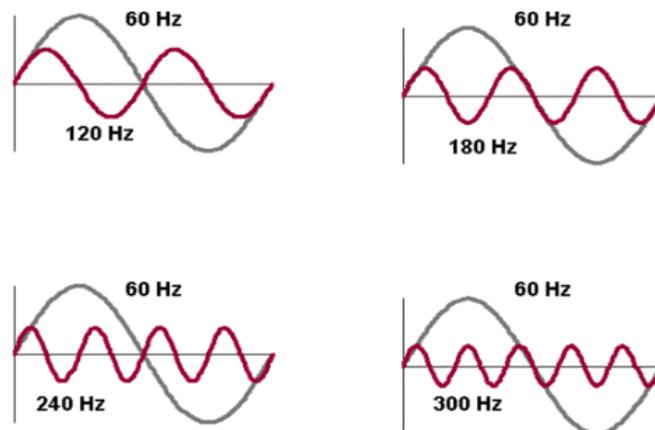


Figura 27. Forma de onda fundamental y de 2°, 3°, 4° y armónicos

Fuente: Elaboración Propia

En la figura 2 podemos observar la señal fundamental en color negro, el tercer armónico en color azul y el quinto en color rojo, se debe apreciar que el armónico mayor tiene menor amplitud que el inferior, por esta razón los estudios de calidad de energía se referencian en las mayorías de los casos a analizar los problemas de distorsión hasta el armónico 50.

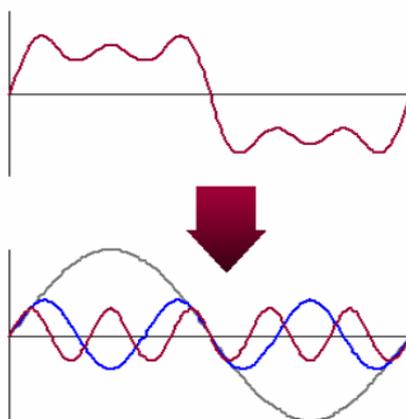


Figura 28. Onda deformada compuesta por la superposición de la fundamental a 60 Hz. y menores armónicos de 3° y 5 orden
Fuente: Elaboración Propia

2.2 Enunciado del problema

2.2.1 Problema general.

¿Será posible analizar experimentalmente la presencia de armónicos producidos por cargas no lineales en el sistema de distribución eléctrica de la UNAP, para luego mitigar y tener un servicio de calidad?

2.2.2 Problemas específicos

- ¿Qué tipos de armónicos distorsionan la calidad de servicio eléctrico en sistema de distribución de la UNAP?
- ¿Será posible mejorar el factor de potencia de sistema de distribución eléctrica de la UNAP, utilizando filtros?

2.3 Justificación

La calidad del servicio eléctrico puede definirse como el conjunto de características que se debe cumplir en la interacción entre los suministradores del servicio eléctrico, los usuarios del mismo y la población en general (Dariel, 1999). De acuerdo a la Norma Técnica de Calidad de los Servicio Eléctricos en el Perú (NTCSE) (MEM-DGE-DS-040, 2001) , los aspectos que componen, lo que se denomina calidad del servicio eléctrico son: La calidad técnica, la calidad comercial y la calidad del alumbrado público. La calidad del producto referida a la tensión, hace referencia a la Onda de

Tensión Suministrada y las perturbaciones asociadas a la misma. Engloba prácticamente todas las perturbaciones de origen técnico, salvo las interrupciones largas de suministro (calidad de suministro), que quedan bajo el apartado de continuidad del suministro o fiabilidad.

Un bajo factor de potencia y la generación de armónicos aumenta el costo de suministrar la potencia reactiva a la UNAP, porque tiene que ser transmitida más corriente, y este costo más alto se le cobra directamente al consumidor por medio de cláusulas del factor de potencia incluidas en las tarifas.

La generación de armónicos y un bajo factor de potencia también causa sobrecarga en los generadores, transformadores y líneas de distribución dentro de las mismas instalaciones, así como también las caídas de voltaje y pérdidas de potencia se tornan mayores de las que deberían ser. Todo esto representa pérdidas y desgaste en equipo que se tienen en las instalaciones de la UNAP.

2.4 Objetivos

2.4.1 Objetivo general

Existe la relación entre la compensación de potencia reactiva y los armónicos en los sistemas de distribución eléctrica de la UNA PUNO

2.4.2 Objetivos específicos

- Establecer la relación entre la compensación de potencia reactiva con los sistemas de distribución eléctrica.
- Establecer la relación de los armónicos de tensión y corriente con los sistemas de distribución eléctrica.

2.5 Hipótesis

2.5.1 Hipótesis General

Existe relación significativa entre la compensación de potencia reactiva y los armónicos con los sistemas de distribución eléctrica de la UNA PUNO.

2.5.2 Hipótesis específicas

- Existe relación significativa entre la compensación de potencia reactiva con los sistemas de distribución eléctrica.
- Existe relación significativa entre los armónicos de tensión y corriente con los sistemas de distribución eléctrica.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Lugar de estudio

El presente trabajo de investigación se realizó en el sistema de distribución eléctrica de la Universidad Nacional del Altiplano, ubicado en el distrito de Puno, provincia de Puno, departamento de Puno, cuyas coordenadas geográficas son: $15^{\circ}49'23''S$ $70^{\circ}01'02''O$. A una altura de 3840 msnm.



Figura 29. Área de influencia

Fuente: Google Earth

3.2 Población

La población está referido básicamente al sistema de distribución eléctrica en media tensión (10 kv.) de la Universidad Nacional del altiplano de Puno.

3.3 Muestra

La muestra se realizó, de acuerdo a lo que establece la normatividad vigente en el ámbito nacional e internacional, en periodos de 15 minutos por el lapso de 07 días como mínimo en cada sub estación de distribución eléctrica de la UNA Puno.

3.4 Método de Investigación

3.4.1 Método

En el presente trabajo de investigación se utilizó el método científico debido a que la investigación tiene como fin el descubrimiento o interpretación de los hechos analizados como el fin de conocer, para predecir situaciones futuras, para lo cual se requiere (Behar, 2010) .

3.4.2 Tipo de Investigación

Borja (2016) indica que cuando la investigación es de tipo aplicada, pues busca conocer, actuar, construir y modificar la problemática de compensación de la potencia reactiva y analizar los causantes de generadores de armónicos en el sistema de distribución de la UNA Puno. Así también es diacrónica, pues se investiga problemas en una sucesión de momentos temporales a fin de conocer la evolución del comportamiento del problema en un periodo dado, que permita hacer inferencias, respecto al cambio y sus consecuencias.

3.4.3 Diseño de Investigación

En la investigación se realizan los experimentos, se diseñan pruebas en las cuales se inducen cambios es decir se manipulan las variables que intervienen en un proceso o sistema deliberadamente (supuestas causas), de manera que es posible observar, identificar y analizar las causas en la respuesta obtenida; se usa la lógica y los principios encontrados en las ciencias naturales. Los experimentos pueden ser llevados a cabo en el laboratorio o en la vida real. Aquí se involucran

un número relativamente pequeño de muestras, equipos o datos y abordan una pregunta bastante enfocada (Cortés & León, 2014).

3.5 Técnicas, instrumentos de recolección de datos y diseño

3.5.1 Técnicas

La investigación no tiene sentido sin las técnicas de recolección de datos. La técnica utilizada nos conduce a la verificación del problema planteado, en este caso se establece las herramientas, instrumentos o medios que son empleados. Todo lo que va a realizar el investigador tiene su apoyo en la técnica de la observación. Aunque utilice métodos diferentes, su marco metodológico de recogida de datos se centra en la técnica de la observación y el éxito o fracaso de la investigación dependerá de cual empleó. La recolección de datos se refiere al uso de una gran diversidad de técnicas y herramientas que pueden ser utilizadas por el analista para desarrollar los sistemas de información, el cual es en base a la observación de la información y el diagrama de flujo (Behar, 2010)

3.5.2 Instrumentos

Un instrumento de recolección de datos es cualquier recurso, dispositivo o formato (en papel o digital), que se utiliza para obtener, registrar o almacenar información (Fidias, 2012).

3.5.3 Técnicas de procesamiento y análisis de resultados

A. Plan de recolección de datos y ejecución

Se siguieron los siguientes pasos para la recolección de datos y ejecución del algoritmo, en base al diagrama de flujo mostrado:

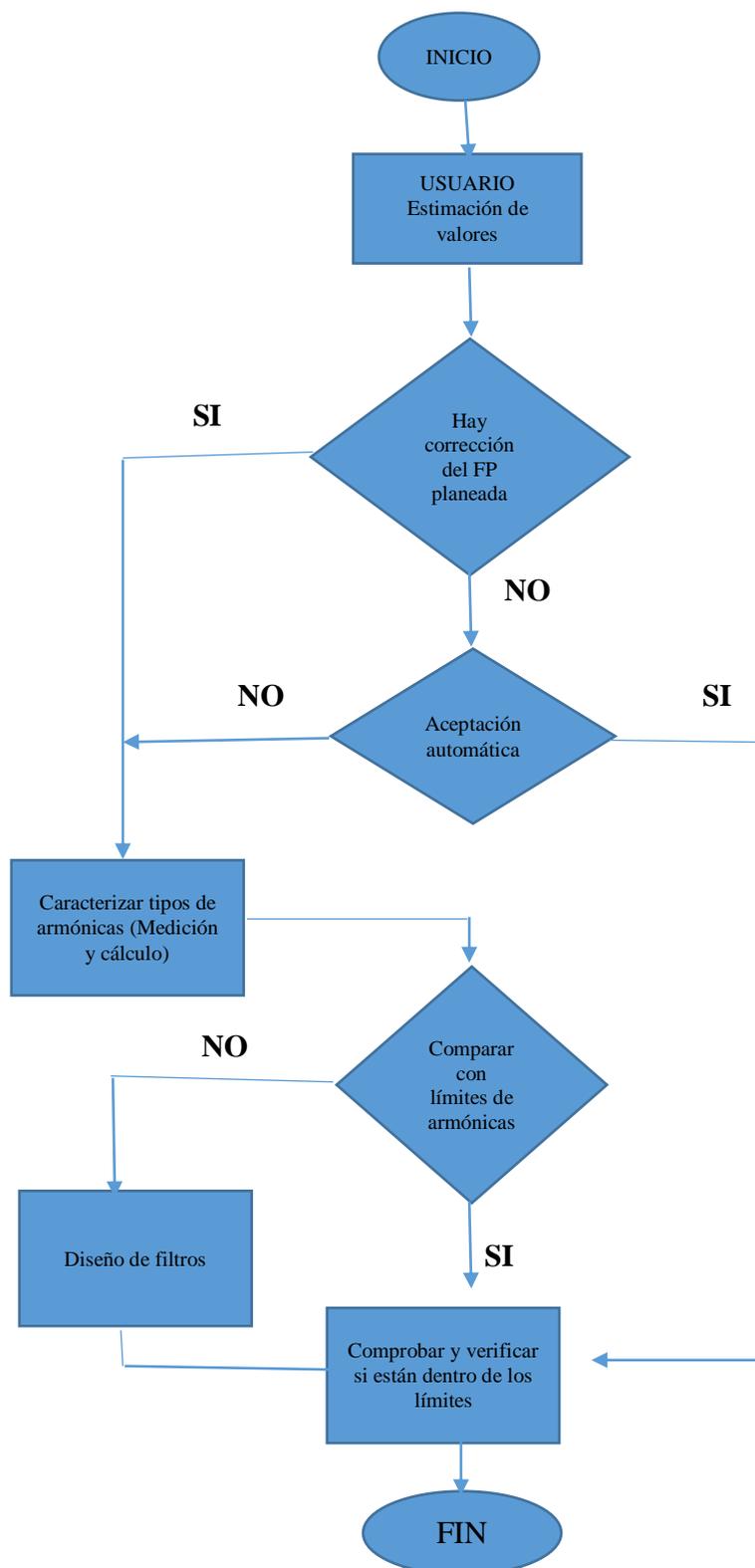


Figura 30. Diagrama de flujo de método
Fuente: Elaboración propia

B. Plan de procesamiento de datos

Para las mediciones se utilizó el analizador de redes de las siguientes características (METREL, 2011) :



Figura 31. Instrumento PowerQ4plus (Metrel)
Fuente: (METREL, 2011)

Principales características

- 4 canales de tensión con una amplia escala de medición: 0 ÷ 1000 Vrms, CAT III/1000V
- 4 canales de tensión con posibilidad de reconocimiento automático de pinzas y selección de escala “en el instrumento”.
- Conformidad con la normativa de calidad de la energía IEC 61000-4-30 Clase S. Perfil del registrador predefinido para inspecciones según la norma EN 50160.
- Mediciones de potencia conforme a las normas IEC 61557-12 e IEEE 1448.

- 8 canales simultáneos - conversión AD de 16 bit para obtener unas mediciones de potencia precisas (error mínimo de variación de fase).
- Registrador potente y fácil de utilizar con 8MB de memoria y posibilidad para registrar 524 firmas de calidad de la energía diferente.
- Medición y registro de interarmónicos y señalización de red
- Termómetro digital para la medición de la temperatura.1
- Potentes herramientas de localización de problemas: registrador de sobretensiones transitorias1, corrientes de arranque/rápidas y formas de onda.
- Captura de eventos de tensión y alarmas definidas por el usuario.
- 15 horas de alimentación autónoma (mediante pilas).

3.6 Recursos computacionales y de hardware

- **PowerView v3.0** es un software informático de acompañamiento que ofrece el modo más fácil para descargar, visualizar y analizar los datos medidos, o para imprimirlos.
 - El analizador PowerView v3.0 incluye una interfaz sencilla pero potente para descargar los datos del instrumento y analizarlos de forma rápida, intuitiva y descriptiva. La organización de la interfaz permite una rápida selección de los datos utilizando una vista en forma de árbol similar a la del Explorador de Windows.
 - El usuario puede descargar fácilmente los datos registrados y organizarlos en múltiples emplazamientos con muchos sub-emplazamientos o lugares.
 - Genere cuadros, tablas y gráficas para sus análisis de los datos de calidad de la energía, y cree informes impresos profesionales
 - Exporte o copie/pegue los datos en otras aplicaciones (p.ej. hojas de cálculo) para su posterior análisis.
 - Es posible presentar y analizar múltiples registros de datos simultáneamente. Combine diferentes datos de registro en una única medición, sincronice los

datos registrados con diferentes instrumentos con offsets de tiempo, divida los datos del registro en múltiples mediciones o extraiga datos de interés.

Para elegir este esquema de conexión, seleccione la siguiente conexión en el instrumento figura 32.

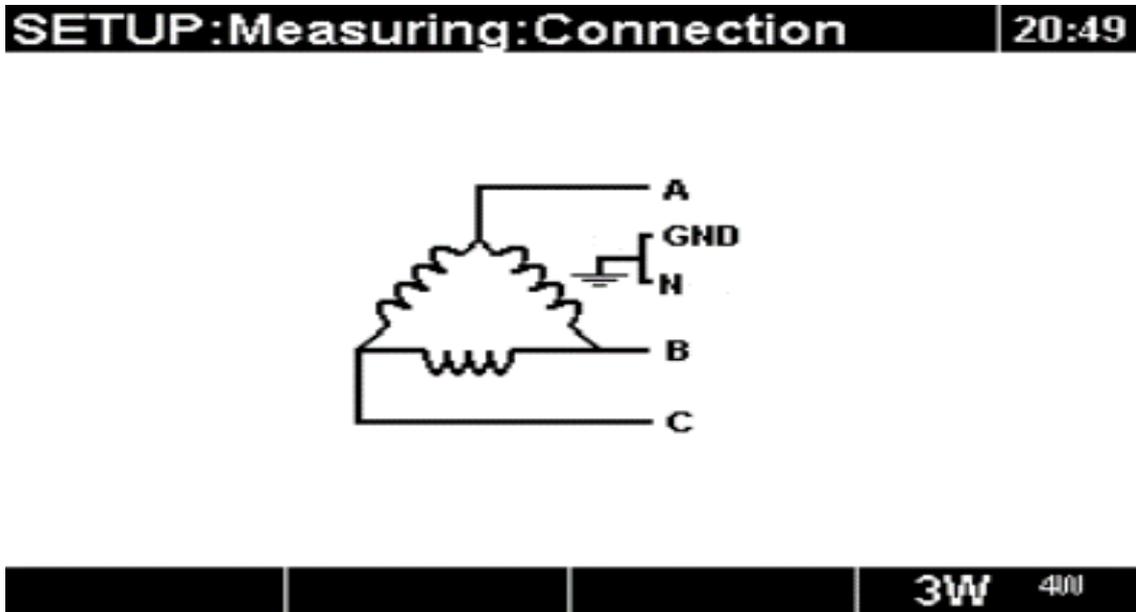


Figura 32. Tipo de conexión del sistema
Fuente: (METREL, 2011)

El instrumento se debe conectar a la red según la siguiente figura 33.

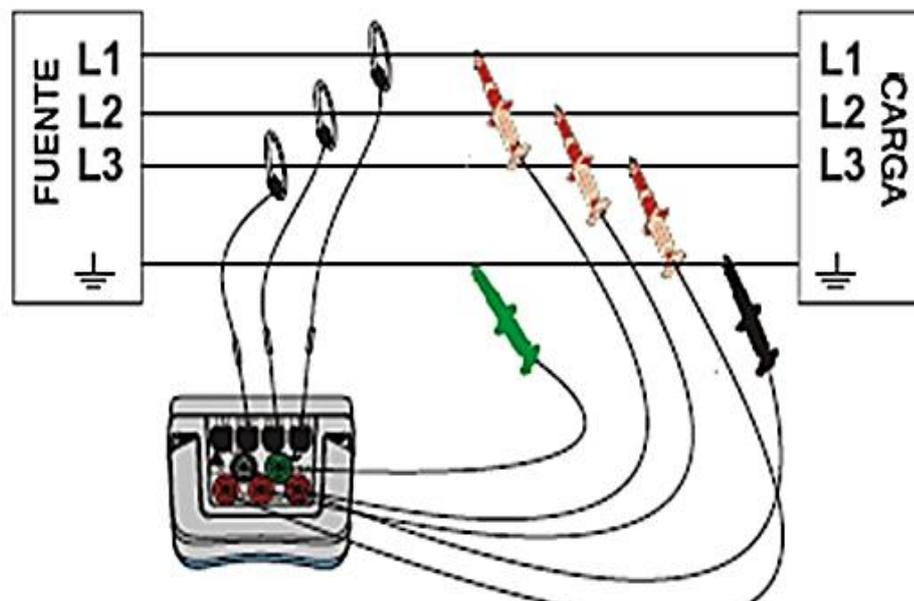


Figura 33. Conexión del instrumento a la red
Fuente: (METREL, 2011)

3.7 Método.

La mejor solución, tanto desde el punto de vista técnico como económico, se basa en los resultados de un estudio detallado.

3.7.1 Análisis de armónicos en redes de MT y BT

Un análisis de armónicos se lleva a cabo tomando en cuenta las perturbaciones que afectan a las redes de distribución eléctrica y que están equipadas con potentes equipos y software de análisis y simulación.

Los pasos para un análisis son los siguientes:

- Medición de las perturbaciones que afectan a la corriente y a las tensiones compuestas y simples en la fuente de alimentación, los circuitos de salida perturbados y las cargas no lineales.
- Simulación por ordenador del fenómeno para obtener una explicación precisa de las causas y determinar la mejor solución.
- Un informe completo del análisis presenta:
 - Los niveles de corriente de las perturbaciones. V
 - Los niveles máximos permitidos de las perturbaciones (IEC 61000, IEC 60034, etc.).
- Una propuesta que incluye soluciones con niveles de rendimiento garantizados.
- Finalmente, la aplicación de la solución seleccionada utilizando los medios y los recursos necesarios. Todo el proceso de la auditoría está certificado con la ISO 9002.7.

De acuerdo a lo especificado en cada caso, con equipos de uso múltiple o individual, se llevan a cabo mediciones independientes de cada parámetro de la Calidad de Producto. El lapso mínimo de medición de un parámetro es de siete (7) días calendario continuos, con excepción de la frecuencia cuya medición es permanente durante el Período de Control (MEM-DGE-DS-040, 2001).

3.7.2 Análisis de Fourier

El teorema de Fourier dice que toda onda periódica no sinusoidal puede ser descompuesta como la suma de ondas sinusoidales, mediante la aplicación de la serie de Fourier, siempre y cuando se cumplan las siguientes condiciones:

- Que la integral a lo largo de un periodo de la función sea un valor finito.
- Que la función posea un número finito de discontinuidades en un periodo.
- Que la función posea un número finito de máximos y mínimos en un periodo.

Cualquier función $F(x)$ con periodo 2π tiene su representación en series de Fourier de acuerdo con la siguiente expresión:

$$Y = F(x) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \operatorname{sen}(nx) + B_n \operatorname{cos}(nx)] \quad (5)$$

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F(x) dx \quad (6)$$

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} F(x) \operatorname{sen}(nx) dx \quad (7)$$

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} F(x) \operatorname{cos}(nx) dx \quad (8)$$

$$[A_n \operatorname{sen}(nx) + B_n \operatorname{cos}(nx)] = R_n \operatorname{sen}(nx + \Phi_n)$$

$$R_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \quad \Phi_n = \tan^{-1} \left(\frac{B_n}{A_n} \right) \quad (9)$$

3.7.3 Índices para la medición de armónicos

Para analizar los efectos producidos por los armónicos se utilizan generalmente unos índices que cuantifican el nivel de contaminación armónica de las ondas. Para el análisis los índices son comparados con valores límites dados por las normas o con valores de soportabilidad de los equipos. A continuación, se presentan las definiciones de los índices más utilizados.

Para corriente se tienen dos tipos de índices, los de distorsión armónica individual y los de distorsión armónica total. El índice de distorsión armónica individual de corriente se define mediante la siguiente ecuación:

$$D_i = \frac{I_i}{I_n} \times 100\% \quad (10)$$

D_i : Distorsión armónica individual de corriente.

I_i : Corriente de cada armónico.

I_n : Corriente nominal del alimentador.

La distorsión armónica total, es una medida de la coincidencia de formas entre una onda y su componente fundamental (Muhammad, 2004) y los índices de distorsión armónica total es:

$$THD_I = \frac{1}{I_L} \sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} (I_i)^2} \times 100\% \quad (11)$$

Los índice de distorsión de demanda total es:

$$TDD = \frac{1}{I_d} \sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} (I_i)^2} \times 100\% \quad (12)$$

El índice de distorsión armónica individual de tensión se define mediante la siguiente ecuación:

$$D_v = \frac{V_i}{V_n} \times 100\% \quad (13)$$

D_v : Distorsión armónica individual de tensión.

V_i : Tensión de cada armónico.

V_n : Tensión nominal del alimentador.

El índice de distorsión armónica total de tensión se define como:

$$THD_v = \frac{1}{V_n} \sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} (V_i)^2} \times 100\% \quad (14)$$

El factor de potencia con armónicos o llamado también factor de potencia de desplazamiento está dado por la siguiente relación:

$$fp = \frac{P}{S} = \frac{\sqrt{3}V_1 I_1 \cos \varphi}{\sqrt{3}V_{rms} I_{rms}} = \frac{\sqrt{3}V_1 I_1 \cos \varphi}{\sqrt{3}V_1 I_1 \sqrt{(THD_v)^2 + 1} \sqrt{(THD_i)^2 + 1}} \quad (15)$$

Donde los valores eficaces de tensión y de corriente son:

$$\begin{aligned} V_{rms} &= V_1 \sqrt{(THD_v)^2 + 1} \\ I_{rms} &= I_1 \sqrt{(THD_i)^2 + 1} \end{aligned} \quad (16)$$

V_{rms} : Valor eficaz de tensión

I_{rms} : Valor eficaz de corriente

Por consiguiente se tiene el factor de potencia total:

$$fp_T = fp_{desp} \cdot fp_{dist} \quad (17)$$

Donde:

fp_T : Factor de potencia total

$f_{p_{desp}}$: Factor de potencia de desplazamiento sin presencia de armónicos

$f_{p_{dist}}$: Factor de potencia de distribución sin presencia de armónicos

3.7.4 Filtros de armónicos.

En los casos en los que la acción preventiva indicada anteriormente sea insuficiente, es necesario equipar la instalación con sistemas de filtrado. Existen tres tipos de filtros:

- A. Pasivos.
- B. Activos.
- C. Híbridos.

A. Filtros pasivos

Las aplicaciones típicas que se tienen son los siguientes:

- Instalaciones industriales con una serie de cargas no lineales que representan más de 200 kVA (variadores de velocidad, SAI, rectificadores, etc.).
- Instalaciones que requieren corrección del factor de potencia.
- Instalaciones en las que la distorsión de tensión debe reducirse para evitar perturbar las cargas sensibles.
- Instalaciones en las que la distorsión de corriente debe reducirse para evitar sobrecargas.

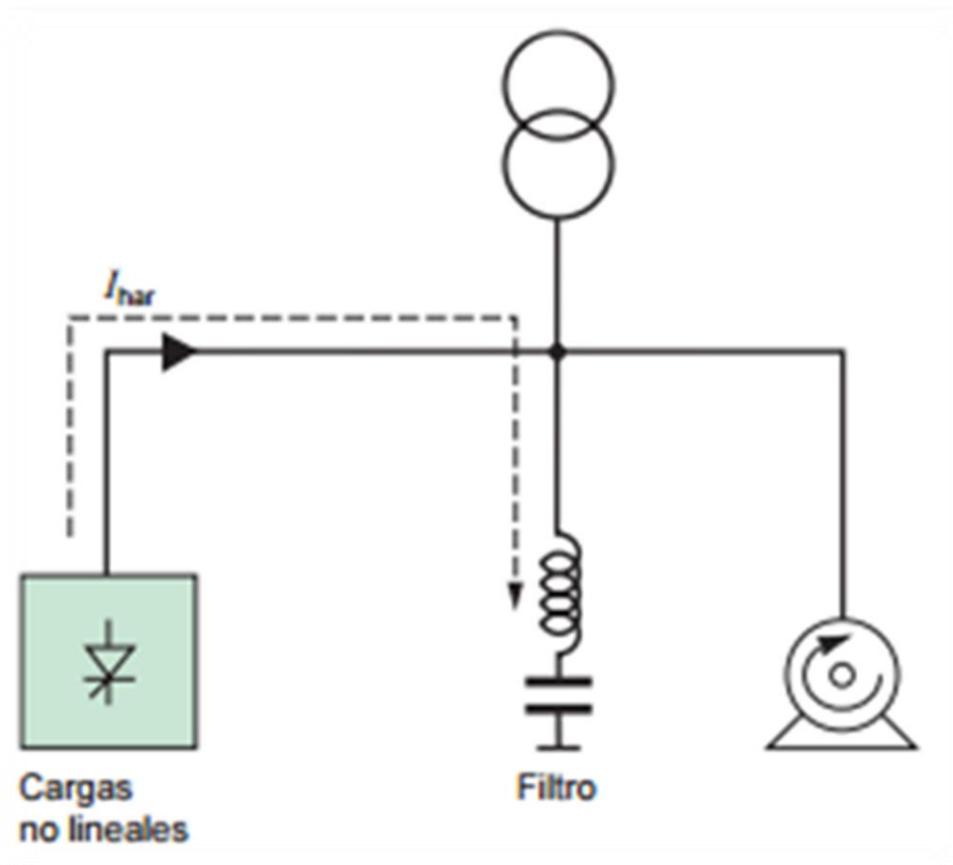


Figura 34. Principio de funcionamiento de un filtro pasivo
Fuente: Elaboración propia

B. Filtros activos (compensador activo de armónicos)

Aplicaciones típicas:

- Instalaciones comerciales con una serie de cargas no lineales que representan menos de 200 kVA (variadores de velocidad, SAI, equipos de oficina, etc.).
- Instalaciones en las que la distorsión de corriente debe reducirse para evitar sobrecargas.

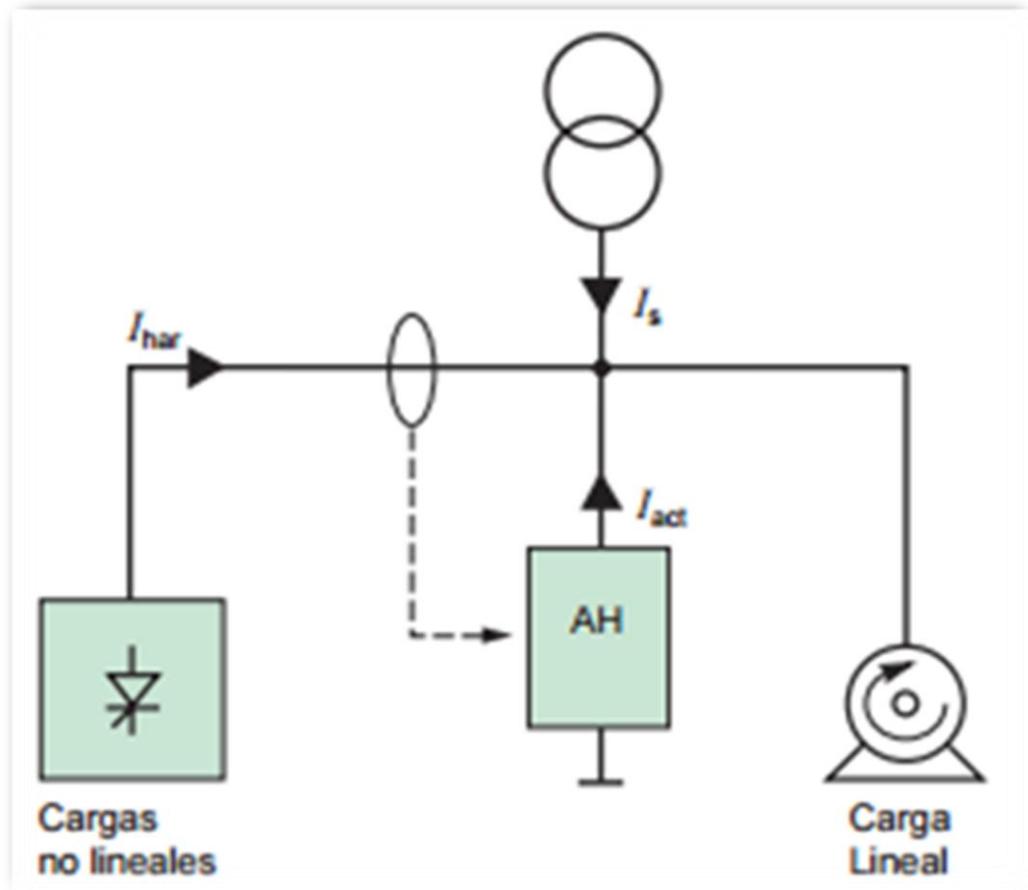


Figura 35. Principio de funcionamiento de un filtro activo

Fuente: Elaboración propia

C. Filtros híbridos

Las aplicaciones típicas son:

- Instalaciones industriales con una serie de cargas no lineales que representan más de 200 kVA (variadores de velocidad, SAI, rectificadores, etc.).
- Instalaciones que requieren corrección del factor de potencia.
- Instalaciones en las que la distorsión de tensión debe reducirse para evitar perturbar las cargas sensibles.
- Instalaciones en las que la distorsión de corriente debe reducirse para evitar sobrecargas.
- Instalaciones en las que deben cumplirse límites estrictos de emisiones de armónicas.

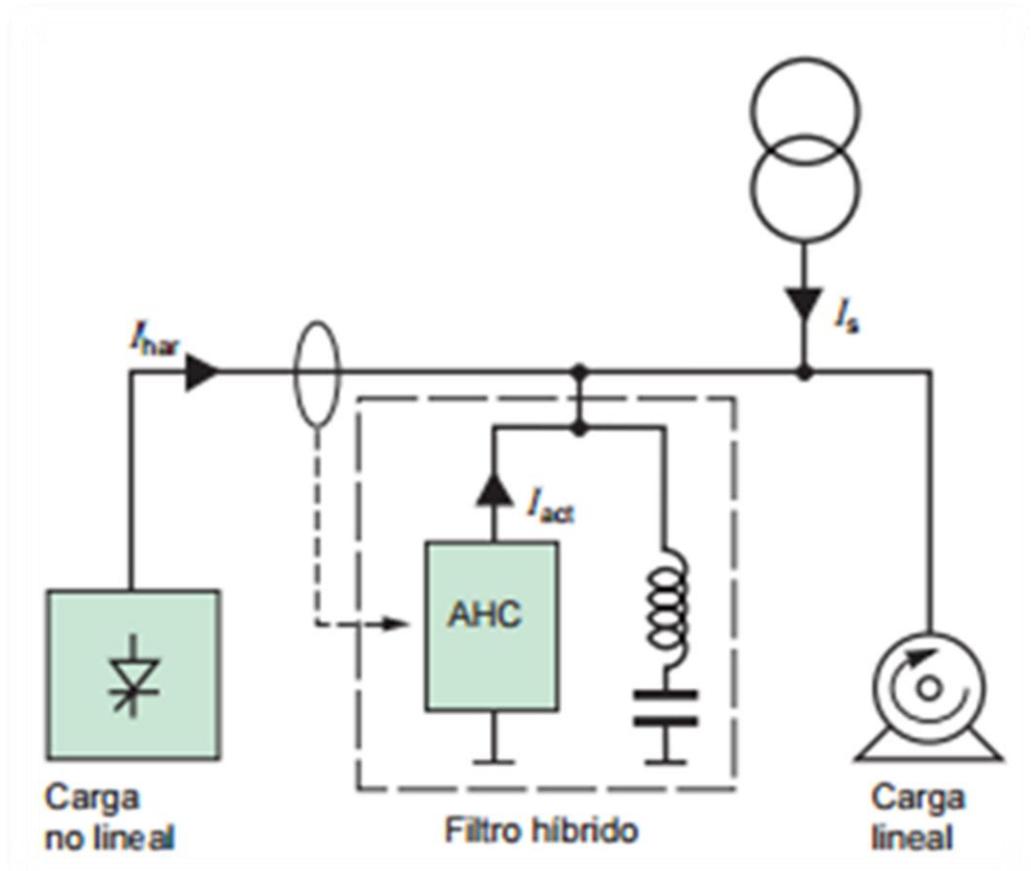


Figura 36. Principio de funcionamiento de un filtro híbrido
Fuente: Elaboración propia

3.7.5 Bancos de condensadores en presencia de armónicos

La norma IEEE-519 establece los siguientes valores en condensadores utilizados para corrección del factor de potencia cuando se encuentran presentes componentes armónicos en el sistema:

135 % de los KVA_r nominales.

110 % tensión nominal RMS.

180 % corriente nominal RMS.

Se espera que con estas capacidades de sobrecarga, se provea las márgenes necesarias ante sobretensiones en el sistema y/o ante componentes armónicas. Los kVA_r del banco de condensadores con componentes armónicos se calcula con:

$$KVAR = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \quad (18)$$

Donde:

V_h, I_h = Valores de tensión y corriente RMS

3.7.6 Criterios de selección

Filtro pasivo: Ofrece tanto corrección del factor de potencia como capacidad para el filtrado de corrientes. Los filtros pasivos también reducen las tensiones armónicas en las instalaciones en las que la tensión de alimentación tiene perturbaciones. Si el nivel de la potencia reactiva suministrada es elevado, se recomienda desactivar el filtro pasivo cuando el porcentaje de la carga sea bajo. Los estudios preliminares para un filtro deben tener en cuenta la posible presencia de una batería de condensadores que puede resultar necesario eliminar.

Acondicionadores de armónicos activos: Filtran los armónicos en un amplio rango de frecuencias y se pueden adaptar a cualquier tipo de carga. Por otro lado, las especificaciones de potencia son bajas.

Filtros híbridos: Combinan el rendimiento de los filtros activos y pasivos.

3.8 Método de cálculo de compensación

3.8.1 Significado de la compensación en redes de alimentación.

Los transformadores, motores, etc. son consumidores inductivos. Para la formación de su campo magnético estos toman potencia inductiva o reactiva de la red de alimentación, Esto significa para las plantas generadores de energía eléctrica una carga especial, que aumenta cuanto más grande es y cuanto mayor es el desfase. Esta es la causa por la cual se pide a los consumidores o usuarios mantener una factor de potencia cercano a 1. Los usuarios con una alta demanda de potencia reactiva son equipados con contadores de potencia reactiva (varmetro o vatímetro de potencia devastada).

La demanda de potencia reactiva se puede reducir sencillamente colocando condensadores en paralelo a los consumidores de potencia inductiva Q_L . Dependiendo de la potencia reactiva capacitiva Q_c de los condensadores se anula total o parcialmente la potencia reactiva inductiva tomada de la red. A este proceso se le denomina compensación.

Después de una compensación la red suministra solamente (casi) potencia real. La corriente en los conductores se reduce, por lo que se reducen las pérdidas en éstos. Así se ahorran los costos por consumo de potencia reactiva facturada por las centrales eléctricas.

Con la compensación se reducen la potencia reactiva y la intensidad de la corriente, quedando la potencia real constante, es decir, se mejora el factor de potencia.

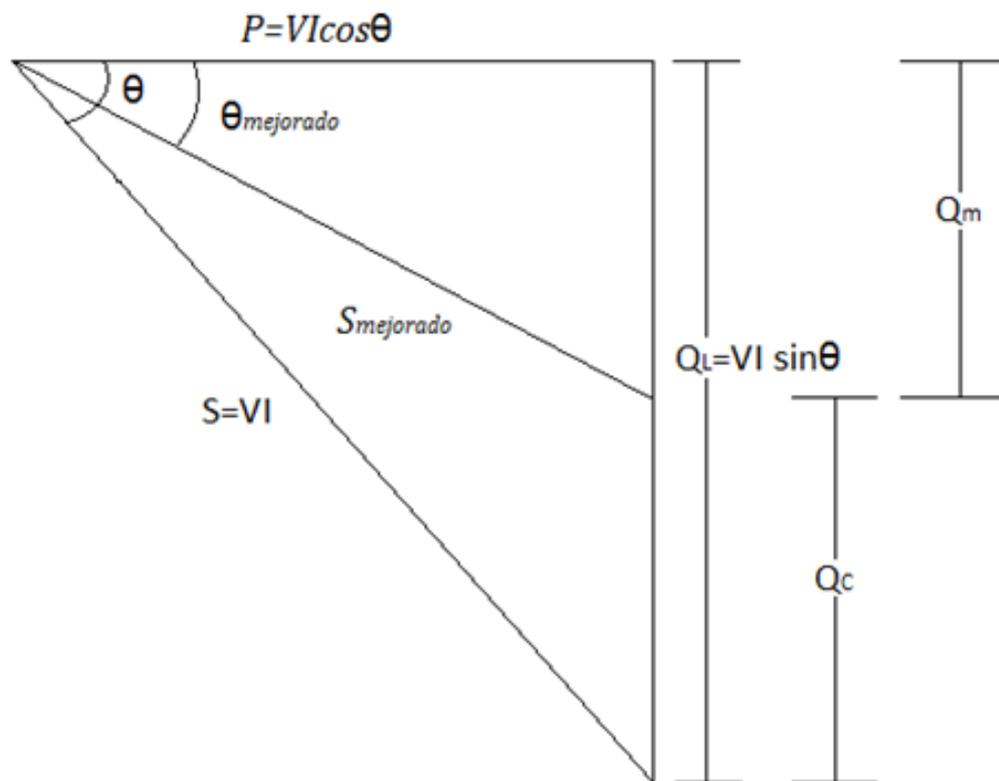


Figura 37. Compensación de la potencia reactiva
Fuente: Elaboración propia

$$\cos \theta_{mej} = \frac{P}{S_{mej}} \tag{19}$$

$$Q_m = Q_L + Q_C \quad (20)$$

$$C = \frac{Q_C}{WV^2} \quad (21)$$

Donde:

V: La tensión entre conductores exteriores (tensión concatenada), es decir, la tensión nominal del condensador.

C: La capacitancia total del condensador, es decir, la suma de las tres capacitancias.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Aspectos generales

La obra comprende la construcción de las Redes de Distribución Subterránea particular en 10 kV. para una máxima demanda de 1345 KW, los cuales abarcan los siguientes puntos:

- Redes Primarias Subterráneas en 10 Kv. desde PMI hasta las 07 Sub Estaciones tipo Caseta.
- Instalación y montaje de 07 subestaciones de transformación tipo caseta equipadas celdas compactas para una potencia total instalada de 1345 kW de 10000/220 V cada una y equipamiento de la misma a partir del punto de diseño de alimentación (fijado por Electro Puno S.A.A)
- Sistema de medición en media tensión con transformador mixto de tensión y corriente (TRAFOMIX).

A continuación, mostramos el resumen de cuadro de cargas (tabla 1).

Tabla 1
Consumo de máxima demanda ciudad universitaria UNAP

| Número de SE | Ckto | Descripción | MD (kW) | Potencia nominal [kVA] |
|------------------------|-------------------------------------|--|---------|------------------------|
| SE-01 | CG-1 | Edificio Administrativo | 12 | 320 |
| | CG-2 | E.P. Enfermería | 4,6 | |
| | | E.P. Nutrición Humana | 8,45 | |
| | CG-3 | E.P. Medicina Humana 1 | 10 | |
| | | E.P. Medicina Humana 2 | 15,84 | |
| | | Facultad de Ciencias de la Educación | 37,44 | |
| | | Guardianía puerta | 0,9 | |
| | | I.E.S. Aplicación | 3,63 | |
| | CG-4 | Laboratorios Educación | 5,62 | |
| | | Administración de Ciencias de la Salud | 19,63 | |
| | | E.P. Nutrición Humana | 8,9 | |
| | CG-5 | E.P. Odontología | 28,04 | |
| | | E.P. Odontología | 19,68 | |
| | | Enfermería | 10 | |
| CG-AP | Hospital Universitario | 15,36 | | |
| | | 7,558 | | |
| SE-02 | CG-1 | Parque de Aguas | 87,95 | 400 |
| | CG-2 | Parque de Aguas | 87,95 | |
| | CG-3 | Almacén central UNA | 3,05 | |
| | | E.P. Administración | 12,68 | |
| | | E.P. Biología | 15,61 | |
| | | E.P. Ing. Electrónica | 11 | |
| | | E.P. Ing. Estadística e Informática | 12,5 | |
| | CG-4 | E.P. Ing. Sistemas | 11,9 | |
| | | E.P. Ing. Civil | 14,23 | |
| | CG-AP | E.P. Ing. Mecánica Eléctrica | 22,99 | |
| | | | 10 | |
| CG-Re. | | 25 | | |
| SE-03 | CG-1 | Coliseo cubierto | 15,2 | 320 |
| | CG-2 | Taller de mantenimiento | 8,9 | |
| | CG-3 | E. Postgrado | 22,56 | |
| | | E.P. Educación Física | 10 | |
| | CG-4 | Entrada postgrado | 1 | |
| | | Estadio (bombas de agua) | 25 | |
| | CG-5 | Grifo UNA | 7,64 | |
| | | Auditorio Magno UNA | 15,5 | |
| | CG-6 | Librería UNA | 4,28 | |
| | | Vicerrectorado - Administración UNA | 6,5 | |
| | CG-7 | Biblioteca Central | 35,13 | |
| | | Editorial UNA | 4 | |
| | CG-8 | Comedor UNA | 17,14 | |
| | | E.P. Arquitectura y Urbanismo | 23,5 | |
| E.P. Ing. Antropología | | 4,5 | | |
| E.P. Ing. Sociología | | 5,63 | | |
| CG-AP | E.P. Ing. Topográfica y Agrimensura | 9,63 | | |
| | | 10 | | |
| SE-04 | CG-1 | Centro de convenciones | 40 | 200 |
| | CG-2 | Residencia de estudiantes | 16,75 | |
| | CG-3 | Reserva-1 | 30 | |
| | CG-4 | Reserva-2 | 50 | |
| CG-AP | | | 10 | |
| | | | | |
| SE-05 | CG-1 | Ciencias Sociales | 7,45 | 200 |
| | | E.P. Ing. Minas | 35 | |
| | | E.P. Turismo | 1,54 | |
| | | Pastoral UNA | 5 | |

| | | | | |
|-------|--------|---|-------------|-----|
| | CG-2 | Auditórium Ing. Económica | 5,13 | |
| | | E.P. Ing. Económica | 32,95 | |
| | CG-3 | Ciencias de la Comunicación | 7,2 | |
| | | E.P. Antropología | 4,5 | |
| | | E.P. Sociología | 3,63 | |
| | CG-4 | Ciencias de la Comunicación | 5,8 | |
| | | E.P. Antropología | 2 | |
| | | E.P. Arte - Danza | 6 | |
| | | E.P. MVZ | 2 | |
| | | E.P. Sociología | 2 | |
| | | E.P. Trabajo Social | 4 | |
| | | O.A.C. Contables | 3 | |
| | CG-AP | | 8 | |
| SE-06 | CG-1 | E.P. Arte - Danza | 6,76 | 200 |
| | | E.P. Trabajo Social | 4,79 | |
| | | O.A.C. Contables | 4,45 | |
| | CG-2 | Ciencias Contables | 4,32 | |
| | | Ciencias Contables y Administración | 24,48 | |
| | | Medicina Veterinaria | 4,94 | |
| | CG-3 | Estadística | 5,17 | |
| | | OAC y OTI | 73,08 | |
| | CG-4-R | Reserva | 20 | |
| | CG-AP | Alumbrado exterior | 10 | |
| SE-07 | CG-1 | E.P. Ing. Agroindustrial | 14,92 | 400 |
| | | E.P. Ing. Química | 25,21 | |
| | CG-2 | E.P. Ing. Agrícola | 15,79 | |
| | | E.P. Ing. Civil | 12,98 | |
| | | E.P. Ing. Civil, Arquitectura, Físico M. | 20,07 | |
| | | E.P. Ing. Geológica, Metalúrgica, Química | 11,7 | |
| | CG-3 | Fundición, soldadura, lab. Mecanización | 15,77 | |
| | | Servicios complementarios C. Agrarias | 10 | |
| | | | 41,06 | |
| | CG-4 | Mega laboratorio UNA | 50 | |
| | CG-5 | Aula MVZ | 4,5 | |
| | | Clínica Veterinaria | 15 | |
| | | Laboratorio Agronomía | 0,66 | |
| | | Maestría MVZ | 1,5 | |
| | CG-6 | Agrarias | 1,46 | |
| | | E.P. MVZ | 21,67 | |
| | | Facultad de Ciencias Agrarias | 10,89 | |
| | | Granja Avícola | 13,9 | |
| | CG-7 | E.P. Ing. Agroindustrial | 9,94 | |
| | | Facultad de Ciencias Agrarias | 17,52 | |
| | CG-AP | | 7 | |
| | | TOTAL GENERAL | 1510 | |

Fuente: Oficina OAC UNAP

4.2 Resultados de flujo de potencia.

Una vez obtenida toda la información, se hizo el cálculo de flujo de potencia mediante el software DigSilent POWER FACTORY15.1.

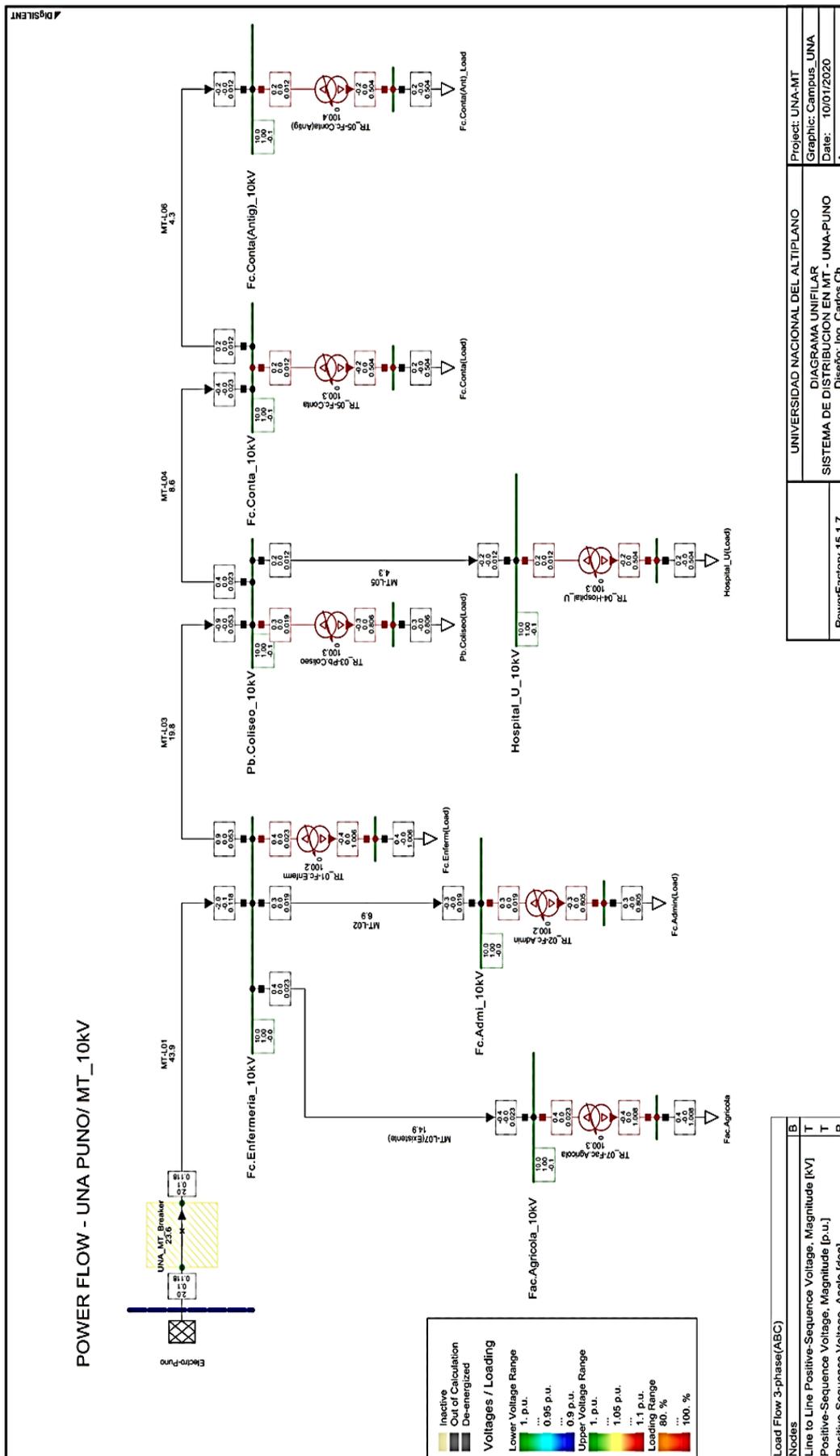


Figura 38. Flujo de potencia con valores nominales
Fuente: Elaboración propia

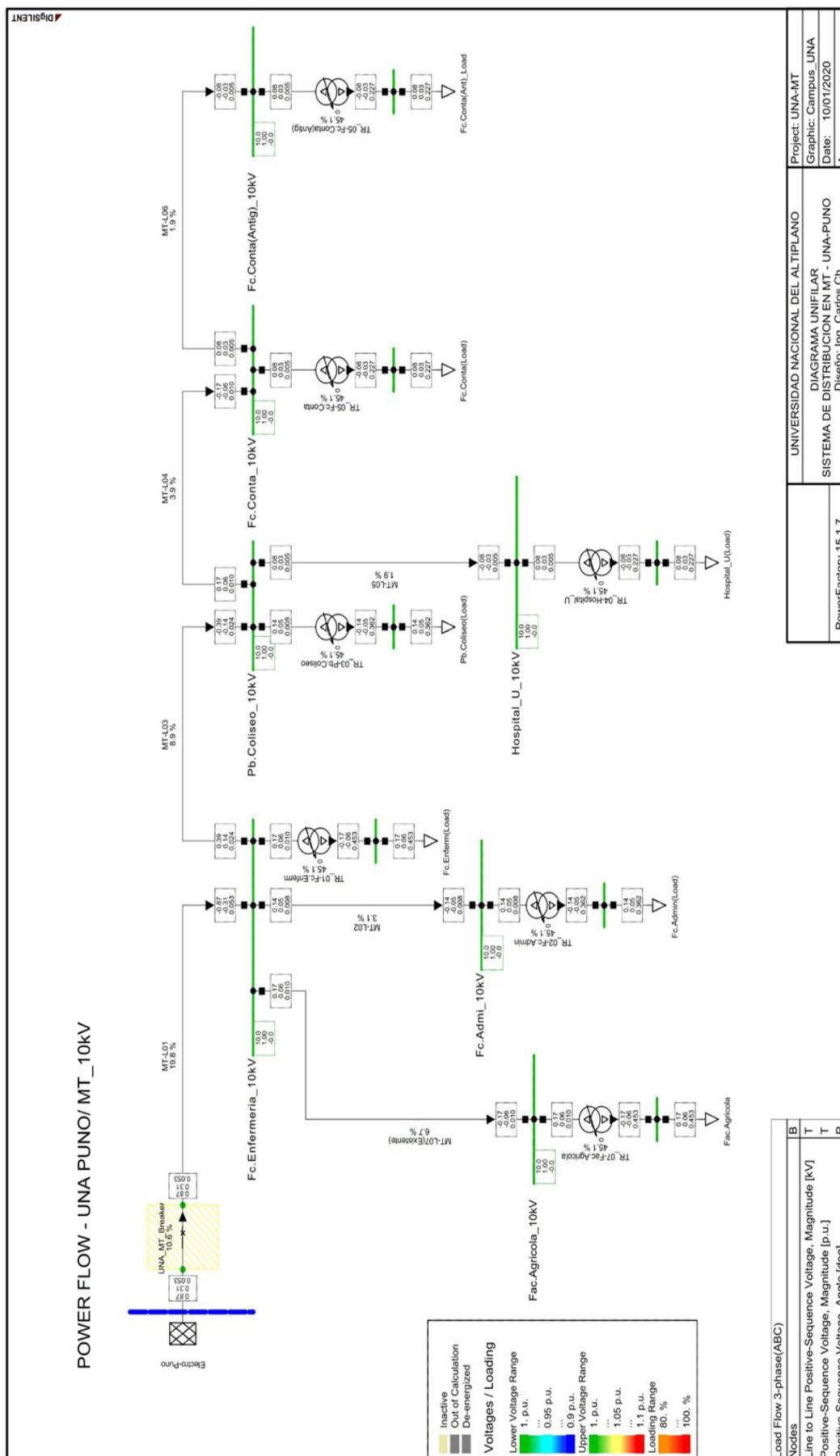


Figura 39. Flujo de potencia con valores actuales de carga
Fuente: Elaboración propia

4.3 Análisis de resultados.

4.3.1 Consumos de potencia y energía

De acuerdo a la información obtenida de la Empresa concesionaria Electro Puno S.A.A. y documentación de la oficina de abastecimientos de la UNA puno se tiene que la máxima demanda se dio en el mes de julio del año 2019, con una máxima demanda de 640.85 Kw. (Figura 40).

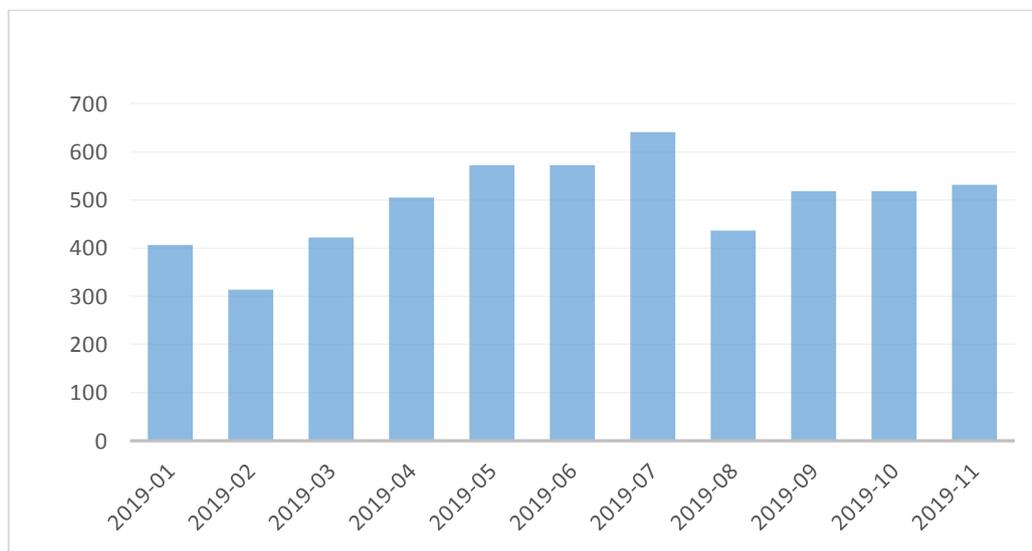


Figura 40. Evolución de la máxima demanda de potencia
Fuente: Elaboración Propia

También se tiene la evolución el consumo de energía, siendo máximo en el mes de julio del año 2019, cuyo valor fue de 148621.5 KW.h

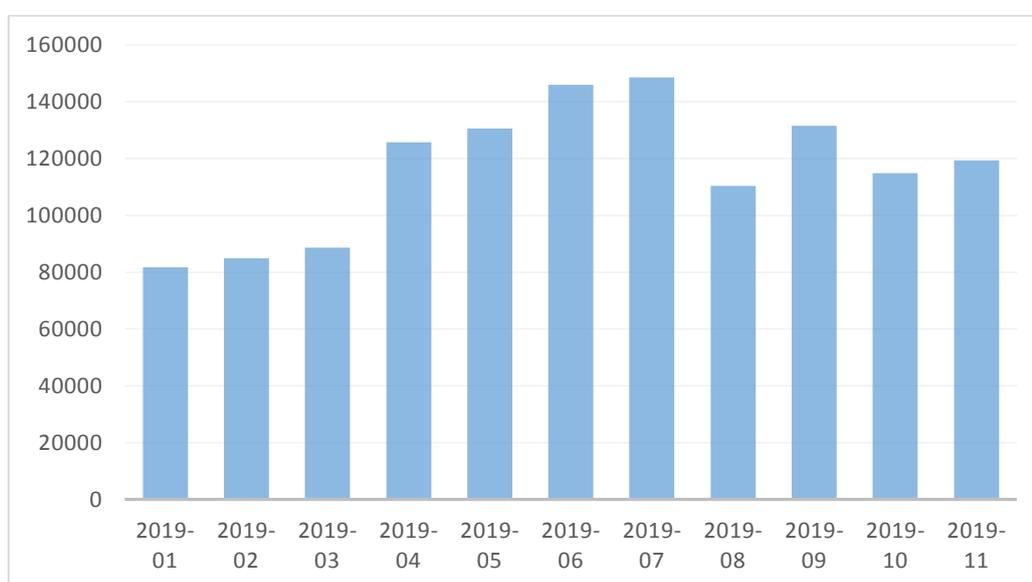


Figura 41. Evolución del consumo de energía
Fuente: con datos de ELPUNO

Para el análisis de costos se tuvo como fuente la publicación de fecha 27 de diciembre del año 2019 por parte de Electro Puno S.A.A, donde el costo por potencia activa es de 0.2276 S/. por Kw.h y el costo de potencia reactiva es de 0.0436 S/. por Kvar.h, cabe indicar que estos valores corresponden a la tarifa MT4 en la ciudad de Puno. Los mismos se presentan en la figura 42.

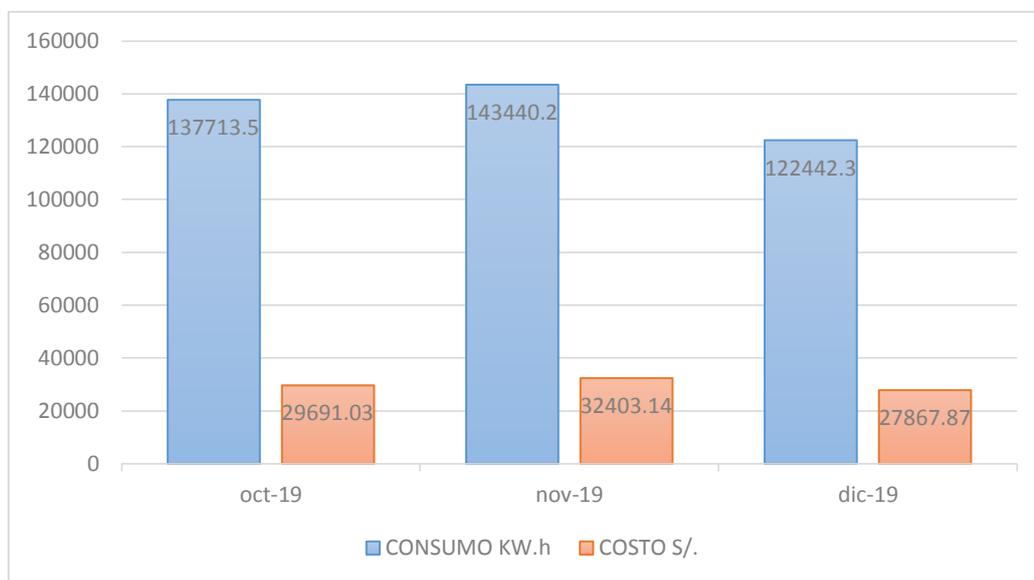


Figura 42. Costo del consumo de potencia activa
Fuente: con información de ELPU

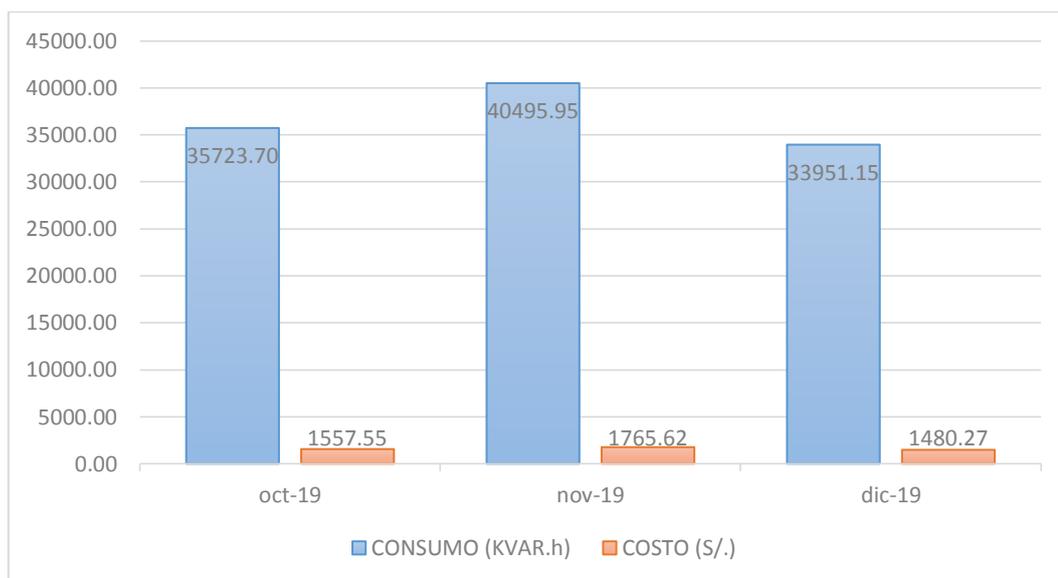


Figura 43. Costo del consumo de potencia reactiva
Fuente: con información de ELPU

4.3.2 Resultado de espectro de armónicos

A continuación, mostramos los resultados obtenidos de las mediciones efectuadas con el analizador de redes.

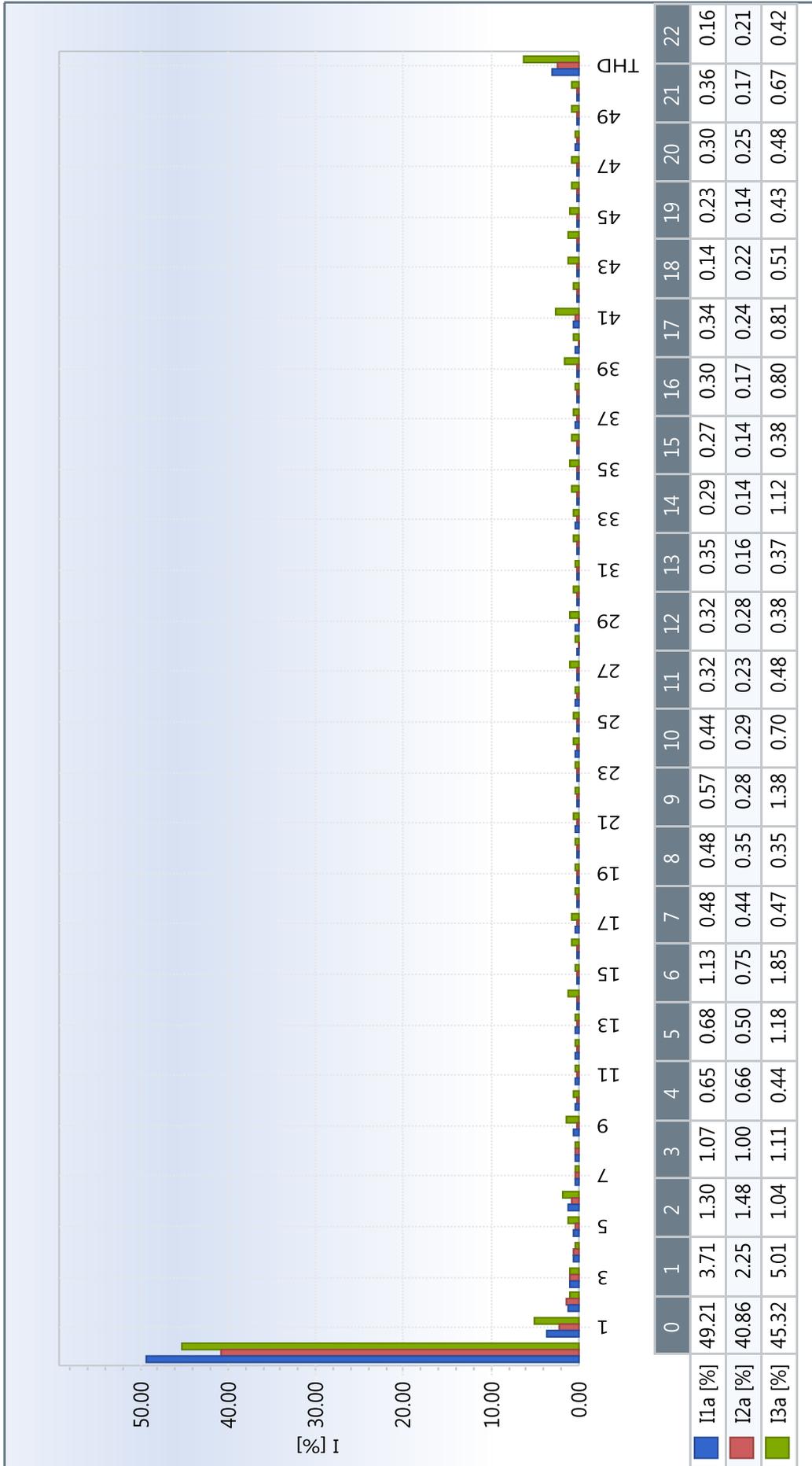


Figura 44. Espectro de armónicos SED 01

Fuente: Elaboración propia con información de analizador de redes

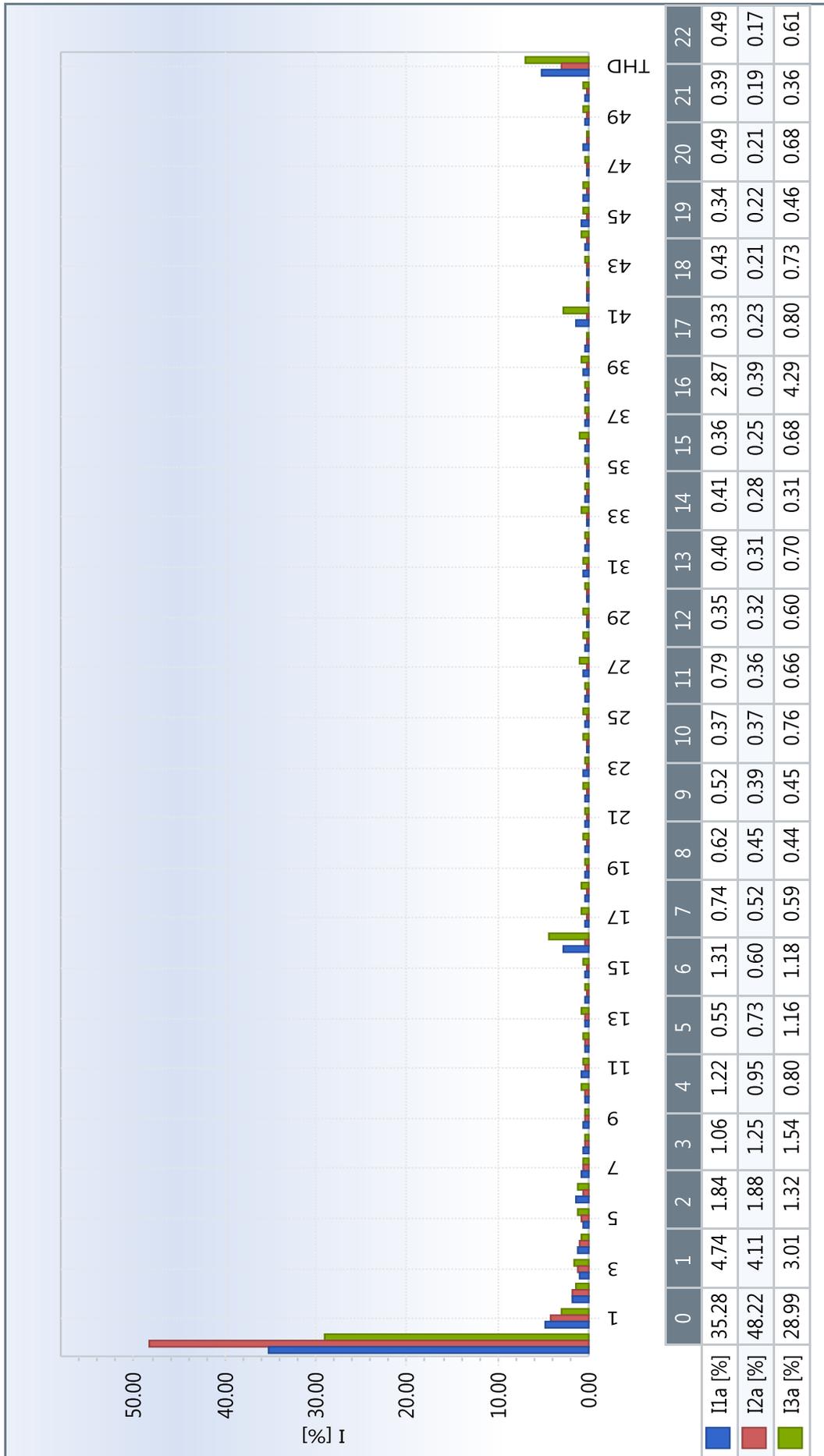


Figura 45. Espectro de armónicos SED 02

Fuente: Elaboración propia con información de analizador de redes

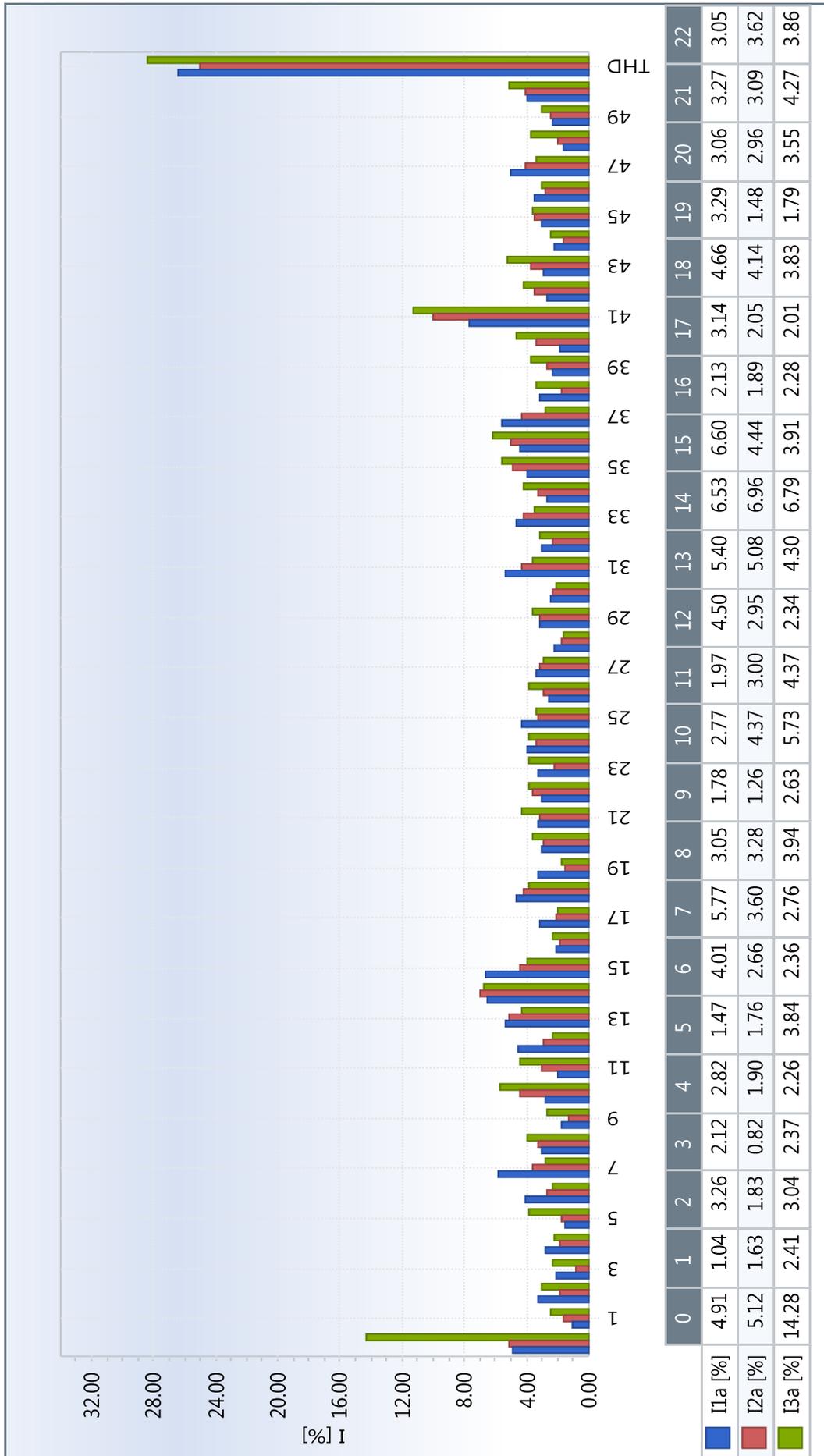


Figura 46. Espectro de armónicos SED 03

Fuente: Elaboración propia con información de analizador de redes

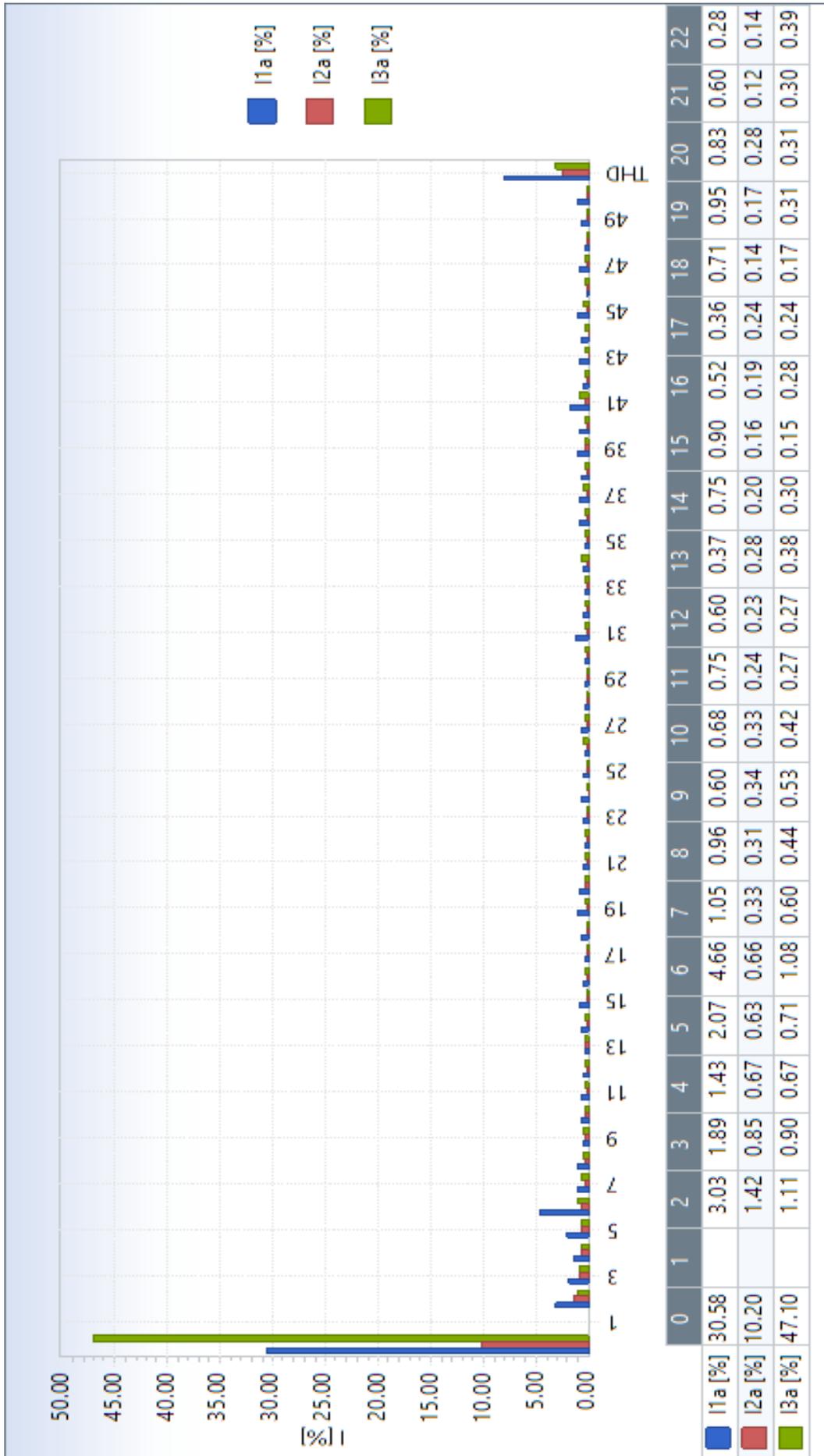


Figura 47. Espectro de armónicos SED 04

Fuente: Elaboración propia con información de analizador de redes

4.3.3 Resumen de resultados

| SED N° | ARMONICO N° | CORRIENTES | | | THD % | | |
|-----------|----------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | I1a % | I2a % | I3a % | I1a | I2a | I3a |
| 01 | 3 | 1.07 | 1.00 | 1.11 | 3.05 | 2.49 | 6.29 |
| | - | | | | | | |
| 02 | 3 | 1.06 | 1.25 | 1.54 | 5.20 | 3.01 | 6.96 |
| | 41 | 1.44 | 0.16 | 2.82 | | | |
| 03 | 15 | 6.60 | 4.44 | 3.91 | 26.36 | 25.06 | 28.35 |
| | 41 | 7.63 | 9.95 | 11.29 | | | |
| 04 | 41 | 1.77 | 0.38 | 0.87 | 8.08 | 2.39 | 3.17 |
| | - | | | | | | |
| 05 | 31 | 4.89 | 4.91 | 6.10 | 25.75 | 27.33 | 27.88 |
| | 41 | 9.11 | 9.17 | 10.28 | | | |
| 06 | 7 | 4.37 | 4.44 | 3.45 | 31.34 | 36.60 | 36.20 |
| | 41 | 4.93 | 7.37 | 7.10 | | | |
| 07 | 13 | 4.41 | 3.42 | 4.35 | 32.80 | 35.85 | 37.94 |
| | 41 | 21.62 | 23.62 | 25.06 | | | |

Figura 48. Cuadro resumen de armónicos por SED

Fuente: Elaboración propia con información de analizador de redes

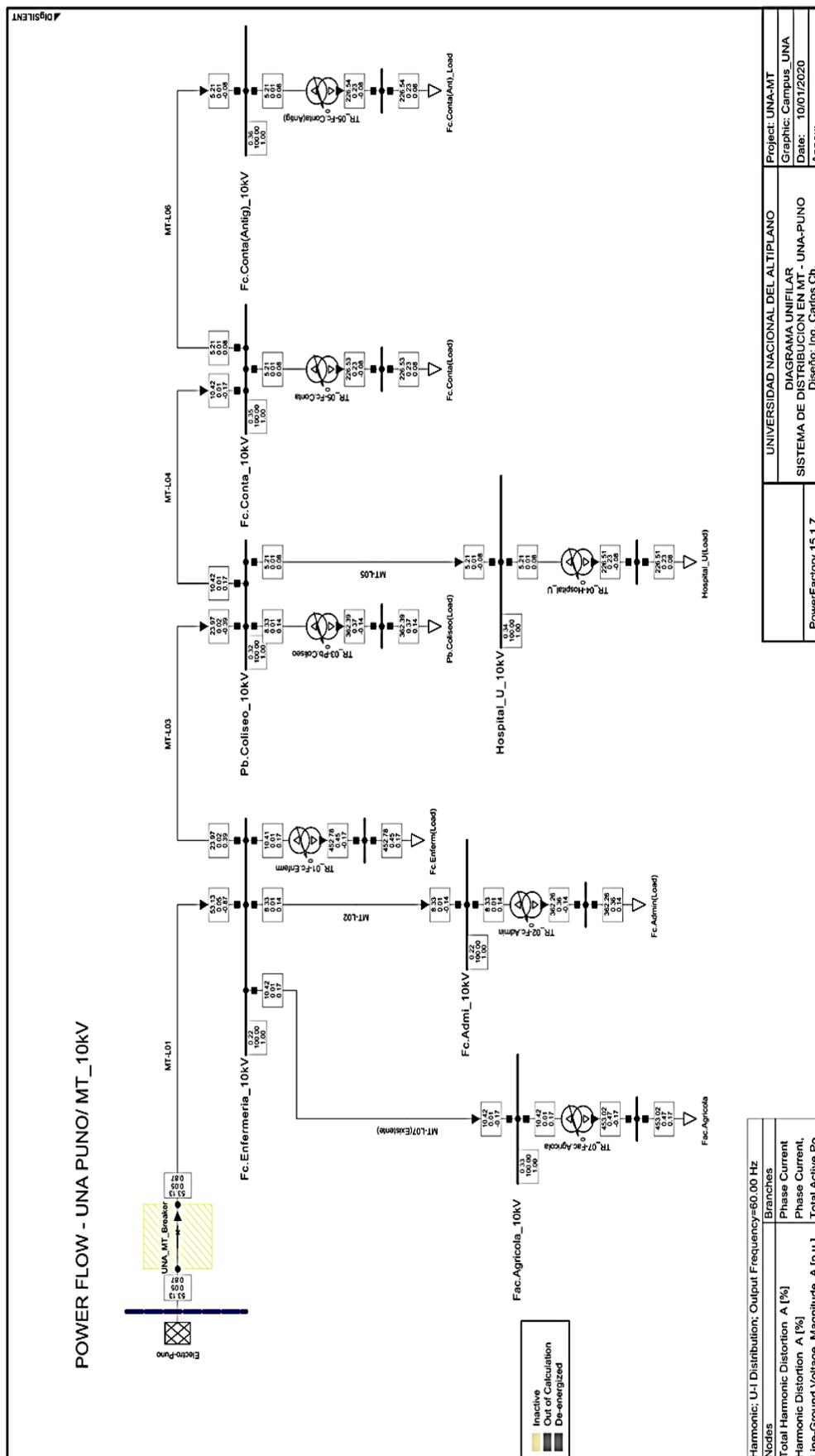


Figura 49. Flujo de potencia considerando armónicos

Cálculo del filtro

CALCULO DEL FILTRO

$$\begin{aligned} F_{sis} &= 60 \text{ Hz} \\ kV &= 0.23 \text{ kV} \end{aligned}$$

En base al Estudio de Flujo se determina la potencia del banco
 $Q_c = 0.089013 \text{ MVar}$

Con base a la potencia de Banco determinamos X_c

$$X_c = \frac{kV^2}{Q_c} = 0.594295215 \text{ Ohm}$$

Elegimos la frecuencia de la armonica

$$h = 41$$

En base al orden de armonico determinamos el valor de la reactancia

$$X_L = \frac{X_c}{h^2} = 0.000353537 \text{ Ohm}$$

Definimos

$$X_h = \sqrt{X_L X_c} = 0.014495005 \text{ Ohm}$$

El factor de Calidad es un valor comprendido entre $30 \leq QF \leq 100$ □

"El factor de calidad es la habilidad del filtro de dispar la energia absorbida a la fre

Seleccionamos

$$QF = 100$$

$$R = \frac{X_h}{QF} = 0.00014495 \text{ ohm}$$

La Potencia del Filtro sera:

$$Q_{FILTRO} = \frac{kV^2}{X_c - X_L} = \frac{h^2}{h^2 - 1} \times \frac{kV^2}{X_c} = \frac{h^2}{h^2 - 1} \times Q_c$$

$$Q \text{ Filtro} = 0.09 \text{ Mvar}$$

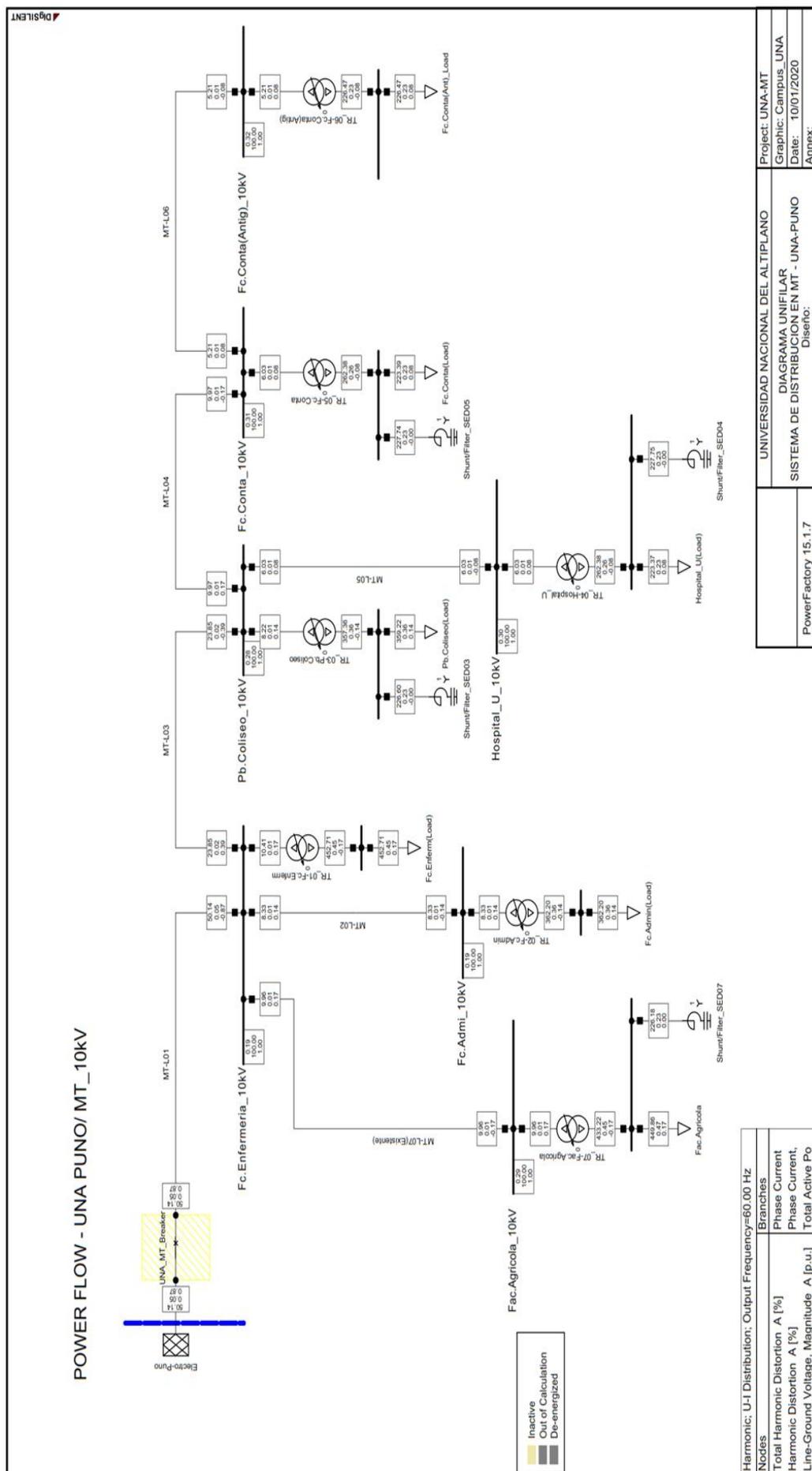


Figura 50. Diagrama de Flujo considerando filtros
Fuente: Elaboración Propia

| COSTO FILTRO DE 100 Kvar | CONSUMO ENERGIA REACTIVA | COSTO ENERGIA REACTIVA | PERIODO DE RECUPERACION |
|--------------------------------|--------------------------------|------------------------------|----------------------------|
| (S/.) | Kvar-hr. | (S/.) | (meses) |
| 4,266.27 | 40,945.95 | 1,765.62 | 2.42 |

Figura 51. Evaluación económica

Fuente: Elaboración propia con información de ELPU y LIFASA

Para elaborar la figura 54 se utilizó el pliego tarifario (ELPU, 2019)

4.4 Interpretación de resultados.

Al realizar la compensación de potencia reactiva se logra corregir el factor de potencia lo cual conlleva a un ahorro mensual que en este caso para la UNAP que se analizó corresponde al 40.62% de ahorro en la factura de consumo de energía.

De acuerdo a los resultados se suprimen las penalizaciones en los por un consumo de energía reactiva.

- Se optimiza toda la instalación eléctrica. La corriente reactiva I_r se abastece en el mismo lugar de su consumo. Descargando así el centro donde se ubica el centro de transformación. Por otra parte, los resultados calculados indican un valor del filtro de 0.09 Mvar y al usar el software DigSILENT Power Factory 15.1.7 de flujos de carga, indican que es recomendable la compensación individual por cada Sub Estación que requieren mejorar la potencia reactiva, con respecto a los valores sin realizar la compensación de potencia reactiva (caso base).
- Se ajusta la potencia aparente del sistema, a la necesidad real de la instalación de la ciudad universitaria UNAP. Por otro lado, la batería de condensadores debe estar conectado al área del cuadro de distribución principal de baja tensión, y permanece en servicio durante el periodo de carga normal. En el método de compensación central, las cargabilidades en las líneas de alimentación de las cargas no disminuyen, quedando con los mismos porcentajes que antes de efectuar la compensación de potencia reactiva, puesto que su amortización resulta en un mediano plazo en este caso de 6 meses y seguirá produciendo ahorros económicos durante su funcionamiento.

CONCLUSIONES

- Por lo expuesto anteriormente es posible decir que en un sistema eléctrico no compensado seguramente está pagando o pagara los recargos de hasta un 20% de su facturación por consumo de energía eléctrica, en este caso efectuando una evaluación económica se tiene que el tiempo de recuperación de la inversión es de 2.4 meses, tiempo muy corto, mientras que el costo de ahorro de la entidad a partir del tercer mes es de 1,765.62 soles mensuales.
- También se puede identificar que la aplicación de los bancos reduce las pérdidas por efecto Joule, como se observa en el cálculo de flujo de potencia, donde al pasar de un factor de potencia de 0.946 a 0.98, las pérdidas se reducen un 40.62 % y por ende la corriente eléctrica.

RECOMENDACIONES

- Es recomendable efectuar el análisis más exhaustivo por tipos de cargas en las diferentes sub estacione de distribución eléctrica de la UNA Puno, debido a que las infraestructuras de las diferentes carreras profesionales son totalmente diferentes.
- También es necesario hacer un análisis más detallado de los factores que afectan a los bancos de capacitores y los fenómenos que estos pueden provocar al ser conectados a la red, es decir hacer un análisis del comportamiento de las armónicas y de los fenómenos transitorios ocurridos al conectar los bancos de capacitores, haciendo uso de algún software para realizar una simulación que permita ver dichos fenómenos, uno de estos programas podría ser el uso del programa ETAP que se utiliza para la simulación de transitorios.

BIBLIOGRAFÍA

- Atalaya Sánchez, J. C. (2016). *Efectos de los armónicos en transformadores de distribución*. (Tesis de grado). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú. Retrieved from <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/9601>
- Behar, D. S. (2010). *Introducción a la Metodología de la Investigación*. Bogotá: Shalom,
- Borja, M. (2016). *Metodología de la investigación científica para ingenieros*. Chiclayo, Perú.
- Cadavid, D. & Gallego, L. (2003). Armónicos y problemas de “Power Quality” en el conductor de neutro en sistemas trifásicos, *Scientia Et Técnica*, 22(9), 19-24.
- Ministerio de Energía y Minas. (2011). *Código Nacional de Electricidad*, Lima: Ministerio de Energía y Minas.
- Cortés, E. C., & León, M. I. (2014). *Generalidades sobre Metodología de la Investigación*. Campeche: Universidad Autónoma Del Carmen, Retrieved from http://www.unacar.mx/contenido/gaceta/ediciones/metodologia_investigacion.pdf
- Dariel, J. (1999). *Ieb S. Armónicos En Sistemas Eléctricos*. Retrieved from http://ingenieros.es/files/proyectos/Armonicos_en_sistemas_electricos.pdf
- Edminister, J. (1999). *Circuitos Eléctricos*. Madrid: McGraw Hill.
- ELPU. (2019). Empresa : Electro Puno Pliego Vigencia Sector, 59–61.
- EN-50160. (2015). *Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución*. México: NORMA.
- Fidias, A. (2012). *Introducción a la Metodología Científica* (6ta ed.). Lima: EPISTEME. Retrieved from <https://ebevidencia.com/wp-content/uploads/2014/12/EL-PROYECTO-DE-INVESTIGACIÓN-6ta-Ed.-FIDIAS-G.-ARIAS.pdf>
- Garcés Ruiz, A., Galvis Manso, J. C., Gallego R., R. A. (2004) Flujo de carga armónico para sistemas radiales. *Scientia Et Technica*, X (25), 65-70. Retrieved from <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84911685013>.
- Gómez, A., Yarce, M., Cárdenas, S., & León, R. (2016). Prototipo para la compensación de armónicos en sistemas trifásicos. *Tecnura*, 20(50), 96–105. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.4.a07>

- IEEE. (1992). *Recomendaciones Prácticas y Requerimientos de la IEEE para el Control de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia*. IEEE 519, 1-10.
- IEEE-519. (1992). *Recomendaciones prácticas y requerimiento de la IEEE para el control de armónicos en sistemas eléctricos de potencia*. IEEE.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2009). *IEEE Std 1159 - IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. IEEE Std 1159-2009* (Revision of IEEE Std 1159-1995) (Vol. 2009). <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2009.5154067>
- International Electrotechnical Commission. (2002). International Standard Basic EMC Publication, (183493), 84. Retrieved from www.iec.ch
- MEM. (2017). *Eficiencia energetica en electricidad*. Lima: MEM.
- MEM-DGE-DS-040. (2001). Decreto Supremo No 594 Decreto Supremo No 594, 1–50.
- METREL. (2011). Анализаторы качества электрической энергии PowerQ4 и PowerQ4 Plus MI 2592 и MI 2792 Руководство по эксплуатации.
- Pour, W. (2018). *IEC-61000-3-2:2018-01*. Ginebra: IEC Central Office 3, rue de Varembeé.
- Pour, W., Electric, S., & Sas, I. (2018a). *Iec 61000-1-1*.
- Rashid, M. (2004). *Electrónica de potencia* (3ra ed.). México: Pearson.
- Sarmiento Jadán, F. V. & Sánchez Calle, V. J. (2009). *Análisis de la calidad de la energía eléctrica y estudio de carga de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca*. (Tesis de pregrado). Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador.
- Schneider Electric (2009). *Compensación de energía reactiva y filtrado de armónicos*.
- Suárez, J. A., Mauro, G. F., & Anaut, D. O. (2010). Parámetros que Afectan la Corriente de Neutro en Presencia de Armónicos. *Parameters Affecting Neutral Currents in the Presence of Harmonics*, 21(1), 77–89. <https://doi.org/10.1612/inf.tecnol.4144it.08>

Páginas Web

- http://www.conae.gob.mx/wb/CONAE/CONA_438_compensacion_del_fac/ Mayo de 2019.
- <http://www.lfc.gob.mx/tarifaEnergia> Junio de 2019.

ANEXOS

Anexo 1. Recibos de consumo de energía



Electro Puno S.A.A.
 Empresa Regional de Servicio Público de Electricidad de Puno S.A.A.
 www.electropuno.com.pe
 R.U.C. 20405479592
 JR. MARIANO H. CORNEJO N° 160 - TELF.: 051-366066 PUNO

RECIBO N° 27 - 48119

Para Consultas su número de Cliente es
001-0063673

Página 1 de 1

MES FACTURADO **Noviembre-2019**
 TOTAL **151,200.30**
 VENCIMIENTO **17 dic 2019**
 EMISION **02 Dic. 2019**

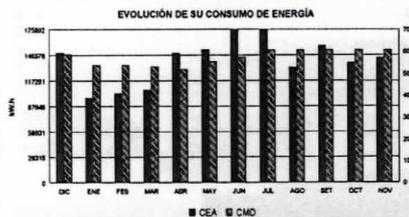
| | | | |
|---|--|--|----------------------------|
| NOMBRE UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO R.U.C. 20145496170 | | MEDIDORES DE ENERGIA | FECHAS DE LECTURA |
| DIRECCION PREDIO AV. SESQUICENTENARIO S/N | | SISTEMA TRIFASICO 4 Hilos ELECTRONICO | ANTERIOR 28/10/2019 |
| DIRECCION ENTREGA AV. EJERCITO N° 329 | | SERIE 02799508 | ACTUAL 28/11/2019 |
| DPTO / PROV PUNO/PUNO/PUNO | | ACOMETIDA Aerea | LECTURA CORRECTA |
| ALIMENTADOR 01-06 (11000) RUTA 033-ZONA PUNO ZONA 033 A 411-13-02-101152 | | CONEXION CS.2 | |
| SISTEMA SE0026 - PUNO Sec. Típico: 2 | | | |

| | | |
|-------------------|--|-----------------------------------|
| TARIFA MT4 | POTENCIA CONTRATADA (Kw) 250.00 | NIVEL DE TENSION (V) 10 Kv |
|-------------------|--|-----------------------------------|

| CONCEPTO | ANTERIOR | ACTUAL | DIFERENCIA | FACTOR | CONSUMO | CONSUMOS A CUENTA | FACTURADO | UNIDAD | PRECIO UNITARIO | TOTAL S/ |
|----------------------------|----------|----------|------------|------------|------------|-------------------|------------|--------|-----------------|-----------|
| ENERGIA | 4,680.10 | 4,785.30 | 105.20 | 1,363.5000 | 143,440.20 | | 143,440.20 | kWh | 0.2259 | 32,403.14 |
| ENERGIA REACTIVA | 1,968.50 | 1,998.20 | 29.70 | 1,363.5000 | 40,495.95 | | | | | |
| POTENCIA POR DISTRIBUIDORA | | 0.39 | | 1,363.5000 | 606.75 | | 606.75 | KW | 25.0400 | 15,193.27 |
| POTENCIA POR GENERADORA | | 0.39 | | 1,363.5000 | 531.77 | | 531.77 | KW | 34.4000 | 18,292.89 |

SU CONSUMO PROMEDIO DIARIO FUE: S/ 2,196.31

TOTAL ENERGIA 65,889.30



| | DEC | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SET | OCT | NOV |
|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| CEA | 10816 | 10206 | 10206 | 10206 | 10206 | 10206 | 10206 | 10206 | 10206 | 10206 | 10206 | 10206 |
| CMD | 10816 | 10206 | 10206 | 10206 | 10206 | 10206 | 10206 | 10206 | 10206 | 10206 | 10206 | 10206 |
| Sumo S/ | 11,000.00 | 10,500.00 | 10,500.00 | 10,500.00 | 10,500.00 | 10,500.00 | 10,500.00 | 10,500.00 | 10,500.00 | 10,500.00 | 10,500.00 | 10,500.00 |

| | |
|---|----------|
| ALUMBRADO PUBLICO | 1,650.00 |
| CARGO FIJO | 11.02 |
| INTERES POR FACILIDADES | 279.27 |
| INTERESES COMPENSATORIOS | 151.91 |
| MANTENIMIENTO Y REPOSICION DE LA CONEXION | 22.73 |

MENSAJES AL CLIENTE

Afecto a Recargo Ley 27510 FOSE, Monto S/ 2,412.54

Ultimo pago en CAR donde se realizo el pago del anterior comprobante

CALIFICACION DEL USUARIO
 Energia Hora Punta 24,132.95 KWH
 Maximo Demanda del Mes 631.77 KW
 Horas Hora Punta del mes 139 Horas
 Grado de Utilizacion 0.350
 Calificacion PRESENTE EN FUERA DE PUNTA

SUB TOTAL 68,004.23

IGV 18% 12,240.76

FACILIDAD POR RECIBO DE ENERGIA 69,748.10
 INTERES MORATORIO 2.27
 LEY 28749 ELECTRIFICACION RURAL 1,204.90
 REDONDEO DEL MES 0.04

(*) Afecto a factor de Recargo

ULTIMO DIA DE PAGO 17 dic 2019

OTROS CONCEPTOS 70,955.31

SON : CIENTO CINCUENTA Y UN MIL DOSCIENTOS CON 30/100 SOLES

TOTAL S/ 151,200.30

PAGUE SOLO EN CENTROS AUTORIZADOS NO AL MENSAJERO

Electro Puno S.A.A.
 Empresa Regional de Servicio Público de Electricidad de Puno S.A.A.

| | | | | | |
|--|--|----------------------|----------------|--------------------|----------------|
| LOCALIDAD PUNO | 001-0063673 | | | | |
| Puno - 33 | 411-13-02-101152 | | | | |
| NOMBRE UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO | SON CIENTO CINCUENTA Y UN MIL DOSCIENTOS CON 30/100 SOLES | | | | |
| DIRECCION AV. SESQUICENTENARIO S/N | | | | | |
| SUMINISTRO | RECIBO N° | MES FACTURADO | EMISION | VENCIMIENTO | TOTALS/ |
| | 27 - 48119 | Noviembre-2019 | 02 Dic. 2019 | 17 dic 2019 | 151,200.30 |

Al momento de cancelar su recibo exija su ticket de pago

| Load Flow Calculation | | | | Edge Elements | | | | |
|---|------|--|----------------------|---|-----------------------|--------------------------|--------------|--------|
| AC Load Flow, unbalanced, 3-phase (ABC) | | Automatic Model Adaptation for Convergence | | No | | | | |
| Automatic Tap Adjust of Transformers | | No | | Max. Acceptable Load Flow Error for Nodes | | 1.00 kVA | | |
| Consider Reactive Power Limits | | No | | Model Equations | | 0.10 % | | |
| | | | | DIGSILENT PowerFactory 15.1.7 | | Project: Date: 1/15/2020 | | |
| Grid: Campus_UNA | | System Stage: Campus_UNA | | Study Case: Study Case | | Annex: / 1 | | |
| Name | Type | Loading [%] | Busbar | Active Power [Mw] | Reactive Power [Mvar] | Power.-factor [-] | Current [ka] | [p.u.] |
| Fac.Agricola | Lod | | Fac.Agricola_0.23kv | 0.400 | -0.000 | 1.00 | 1.008 | 1.003 |
| Fc.Admin(Load) | Lod | | Fc.Admin_0.23kv | 0.320 | -0.000 | 1.00 | 0.805 | 1.002 |
| Fc.Conta(Ant)_Load | Lod | | Fc.Conta(Antig)_0... | 0.200 | -0.000 | 1.00 | 0.504 | 1.004 |
| Fc.Conta(Load) | Lod | | Fc.Contab_0.23kv | 0.200 | -0.000 | 1.00 | 0.504 | 1.003 |
| Fc.Enferm(Load) | Lod | | Fc.Enfermeria_0.23kv | 0.400 | -0.000 | 1.00 | 1.006 | 1.002 |
| Hospital_U(Load) | Lod | | Hospital_0.23kv | 0.200 | -0.000 | 1.00 | 0.504 | 1.003 |
| Pb.Coliseo(Load) | Lod | | Pb.Coliseo_0.23kv | 0.320 | -0.000 | 1.00 | 0.806 | 1.003 |
| Electro-Puno | Xnet | | Pt.Alim_10kv(A) | 2.045 | 0.064 | 1.00 | 0.118 | 0.001 |
| UNA_MT_Breaker | Coup | 23.63 | Pt.Alim_10kv(A) | 2.045 | 0.064 | 1.00 | 0.118 | 0.236 |
| | | | Pt.Alim_10kv(B) | -2.045 | -0.064 | -1.00 | 0.118 | 0.236 |
| MT-L01 | Lne | 43.92 | Fc.Enfermeria_10kv | -2.042 | -0.062 | -1.00 | 0.118 | 0.439 |
| | | | Pt.Alim_10kv(B) | 2.045 | 0.064 | 1.00 | 0.118 | 0.439 |
| MT-L02 | Lne | 6.88 | Fc.Enfermeria_10kv | 0.320 | 0.010 | 1.00 | 0.019 | 0.069 |
| | | | Fc.Admi_10kv | -0.320 | -0.010 | -1.00 | 0.019 | 0.069 |
| MT-L03 | Lne | 19.81 | Fc.Enfermeria_10kv | 0.921 | 0.028 | 1.00 | 0.053 | 0.198 |
| | | | Pb.Coliseo_10kv | -0.920 | -0.028 | -1.00 | 0.053 | 0.198 |
| MT-L04 | Lne | 8.62 | Pb.Coliseo_10kv | 0.400 | 0.012 | 1.00 | 0.023 | 0.086 |
| | | | Fc.Conta_10kv | -0.400 | -0.012 | -1.00 | 0.023 | 0.086 |
| MT-L05 | Lne | 4.31 | Pb.Coliseo_10kv | 0.200 | 0.006 | 1.00 | 0.012 | 0.043 |
| | | | Hospital_U_10kv | -0.200 | -0.006 | -1.00 | 0.012 | 0.043 |
| MT-L06 | Lne | 4.31 | Fc.Conta_10kv | 0.200 | 0.006 | 1.00 | 0.012 | 0.043 |
| | | | Fc.Conta(Antig)_10kv | -0.200 | -0.006 | -1.00 | 0.012 | 0.043 |
| MT-L07(Existente) | Lne | 14.85 | Fc.Enfermeria_10kv | 0.400 | 0.012 | 1.00 | 0.023 | 0.149 |
| | | | Fac.Agricola_10kv | -0.400 | -0.012 | -1.00 | 0.023 | 0.149 |
| TR_01-Fc.Enferm | Tr2 | 100.22 | Fc.Enfermeria_10kv | 0.400 | 0.012 | 1.00 | 0.023 | 1.002 |
| | | | Fc.Enfermeria_0.23kv | -0.400 | 0.000 | -1.00 | 1.006 | 1.002 |
| TR_02-Fc.Admin | Tr2 | 100.24 | Fc.Admi_10kv | 0.320 | 0.010 | 1.00 | 0.019 | 1.002 |
| | | | Fc.Admin_0.23kv | -0.320 | 0.000 | -1.00 | 0.805 | 1.002 |
| TR_03-Pb.Coliseo | Tr2 | 100.31 | Pb.Coliseo_10kv | 0.320 | 0.010 | 1.00 | 0.019 | 1.003 |
| | | | Pb.Coliseo_0.23kv | -0.320 | 0.000 | -1.00 | 0.806 | 1.003 |
| TR_04-Hospital_U | Tr2 | 100.34 | Hospital_U_10kv | 0.200 | 0.006 | 1.00 | 0.012 | 1.003 |
| | | | Hospital_0.23kv | -0.200 | 0.000 | -1.00 | 0.504 | 1.003 |
| TR_05-Fc.Conta | Tr2 | 100.35 | Fc.Conta_10kv | 0.200 | 0.006 | 1.00 | 0.012 | 1.003 |
| | | | Fc.Contab_0.23kv | -0.200 | 0.000 | -1.00 | 0.504 | 1.003 |
| TR_05-Fc.Conta(Antig) | Tr2 | 100.36 | Fc.Conta(Antig)_10kv | 0.200 | 0.006 | 1.00 | 0.012 | 1.004 |
| | | | Fc.Conta(Antig)_0... | -0.200 | 0.000 | -1.00 | 0.504 | 1.004 |
| TR_07-Fac.Agricola | Tr2 | 100.34 | Fac.Agricola_10kv | 0.400 | 0.012 | 1.00 | 0.023 | 1.003 |
| | | | Fac.Agricola_0.23kv | -0.400 | 0.000 | -1.00 | 1.008 | 1.003 |



| | | | | | |
|---|--|--|---|-----------------------------|--|
| | | DIGSILENT PowerFactory 15.1.7 | | Project: Date: 1/15/2020 | |
| Load Flow Calculation | | | Complete System Report: Substations, Voltage Profiles | | |
| AC Load Flow, unbalanced, 3-phase (ABC) | | Automatic Model Adaptation for Convergence | | No | |
| Automatic Tap Adjust of Transformers | | Max. Acceptable Load Flow Error for | | 1.00 kVA | |
| Consider Reactive Power Limits | | Nodes | | 0.10 % | |
| | | Model Equations | | | |
| Grid: Campus_UNA | | System Stage: Campus_UNA | | Study Case: Study Case | |
| | | | | Annex: / 4 | |
| | | Bus - voltage | | Voltage - Deviation [%] | |
| rtd.V [kV] | | [p.u.] [kV] [deg] | | -10 -5 0 +5 +10 | |
| Fc.Enfermeria_10kv | | | | | |
| 10.00 | | 0.998 9.98 -0.04 | | | |
| Fc.Admi_10kv | | | | | |
| 10.00 | | 0.998 9.98 -0.05 | | | |
| Pb.coliseo_10kv | | | | | |
| 10.00 | | 0.997 9.97 -0.07 | | < | |
| Hospital_u_10kv | | | | | |
| 10.00 | | 0.997 9.97 -0.07 | | < | |
| Fc.Conta_10kv | | | | | |
| 10.00 | | 0.997 9.97 -0.07 | | < | |
| Fc.Conta(Antig)_10kv | | | | | |
| 10.00 | | 0.997 9.97 -0.08 | | < | |
| Fc.Enfermeria_0.23kv | | | | | |
| 0.23 | | 0.998 0.23 -1.77 | | | |
| Fc.Admin_0.23kv | | | | | |
| 0.23 | | 0.998 0.23 -1.77 | | | |
| Pb.coliseo_0.23kv | | | | | |
| 0.23 | | 0.997 0.23 -1.79 | | < | |
| Hospital_0.23kv | | | | | |
| 0.23 | | 0.997 0.23 -1.80 | | < | |
| Fc.Contab_0.23kv | | | | | |
| 0.23 | | 0.997 0.23 -1.80 | | < | |
| Fc.Contab(Antig)_0.23kv | | | | | |
| 0.23 | | 0.996 0.23 -1.81 | | < | |
| Fac.Agricola_10kv | | | | | |
| 10.00 | | 0.997 9.97 -0.05 | | < | |
| Fac.Agricola_0.23kv | | | | | |
| 0.23 | | 0.997 0.23 -1.78 | | < | |

Anexo 3. Resultados de flujo de carga en condiciones actuales

| Load Flow Calculation | | | | | Edge Elements | | | |
|---|--------------------------|------------------------|----------------------|--|-------------------------------|--------------------------|--------------|----------------|
| AC Load Flow, unbalanced, 3-phase (ABC) | | | | Automatic Model Adaptation for Convergence | No | | | |
| Automatic Tap Adjust of Transformers | No | | | Max. Acceptable Load Flow Error for Nodes | | 1.00 kVA | | |
| Consider Reactive Power Limits | No | | | Model Equations | | 0.10 % | | |
| | | | | | DIgSILENT PowerFactory 15.1.7 | Project: Date: 1/15/2020 | | |
| Grid: Campus_UNA | System Stage: Campus_UNA | Study Case: Study Case | | | Annex: / 1 | | | |
| Name | Type | Loading [%] | Busbar | Active Power [MW] | Reactive Power [Mvar] | Power.-factor [-] | Current [kA] | Current [p.u.] |
| Fac.Agricola | Lod | | Fac.Agricola_0.23kv | 0.170 | 0.058 | 0.95 | 0.453 | 1.006 |
| Fc.Admin(Load) | Lod | | Fc.Admin_0.23kv | 0.136 | 0.046 | 0.95 | 0.362 | 1.005 |
| Fc.Conta(Ant)_Load | Lod | | Fc.Conta(Antig)_0... | 0.085 | 0.029 | 0.95 | 0.227 | 1.006 |
| Fc.Conta(Load) | Lod | | Fc.Conta_0.23kv | 0.085 | 0.029 | 0.95 | 0.227 | 1.006 |
| Fc.Enferm(Load) | Lod | | Fc.Enfermeria_0.23kv | 0.170 | 0.058 | 0.95 | 0.453 | 1.005 |
| Hospital_U(Load) | Lod | | Hospital_0.23kv | 0.085 | 0.029 | 0.95 | 0.227 | 1.006 |
| Pb.Coliseo(Load) | Lod | | Pb.coliseo_0.23kv | 0.136 | 0.046 | 0.95 | 0.362 | 1.006 |
| Electro-Puno | Xnet | | Pt.Alim_10kv(A) | 0.867 | 0.309 | 0.94 | 0.053 | 0.001 |
| UNA_MT_Breaker | Coup | 10.63 | Pt.Alim_10kv(A) | 0.867 | 0.309 | 0.94 | 0.053 | 0.106 |
| | | | Pt.Alim_10kv(B) | -0.867 | -0.309 | -0.94 | 0.053 | 0.106 |
| MT-L01 | Lne | 19.75 | Fc.Enfermeria_10kv | -0.866 | -0.309 | -0.94 | 0.053 | 0.198 |
| | | | Pt.Alim_10kv(B) | 0.867 | 0.309 | 0.94 | 0.053 | 0.198 |
| MT-L02 | Lne | 3.10 | Fc.Enfermeria_10kv | 0.136 | 0.048 | 0.94 | 0.008 | 0.031 |
| | | | Fc.Admi_10kv | -0.136 | -0.048 | -0.94 | 0.008 | 0.031 |
| MT-L03 | Lne | 8.91 | Fc.Enfermeria_10kv | 0.391 | 0.139 | 0.94 | 0.024 | 0.089 |
| | | | Pb.Coliseo_10kv | -0.390 | -0.139 | -0.94 | 0.024 | 0.089 |
| MT-L04 | Lne | 3.87 | Pb.Coliseo_10kv | 0.170 | 0.061 | 0.94 | 0.010 | 0.039 |
| | | | Fc.Conta_10kv | -0.170 | -0.060 | -0.94 | 0.010 | 0.039 |
| MT-L05 | Lne | 1.94 | Pb.Coliseo_10kv | 0.085 | 0.030 | 0.94 | 0.005 | 0.019 |
| | | | Hospital_U_10kv | -0.085 | -0.030 | -0.94 | 0.005 | 0.019 |
| MT-L06 | Lne | 1.94 | Fc.Conta_10kv | 0.085 | 0.030 | 0.94 | 0.005 | 0.019 |
| | | | Fc.Conta(Antig)_10kv | -0.085 | -0.030 | -0.94 | 0.005 | 0.019 |
| MT-L07(Existente) | Lne | 6.68 | Fc.Enfermeria_10kv | 0.170 | 0.061 | 0.94 | 0.010 | 0.067 |
| | | | Fac.Agricola_10kv | -0.170 | -0.060 | -0.94 | 0.010 | 0.067 |
| TR_01-Fc.Enferm | Tr2 | 45.09 | Fc.Enfermeria_10kv | 0.170 | 0.060 | 0.94 | 0.010 | 0.451 |
| | | | Fc.Enfermeria_0.23kv | -0.170 | -0.058 | -0.95 | 0.453 | 0.451 |
| TR_02-Fc.Admin | Tr2 | 45.10 | Fc.Admi_10kv | 0.136 | 0.048 | 0.94 | 0.008 | 0.451 |
| | | | Fc.Admin_0.23kv | -0.136 | -0.046 | -0.95 | 0.362 | 0.451 |
| TR_03-Pb.Coliseo | Tr2 | 45.11 | Pb.Coliseo_10kv | 0.136 | 0.048 | 0.94 | 0.008 | 0.451 |
| | | | Pb.Coliseo_0.23kv | -0.136 | -0.046 | -0.95 | 0.362 | 0.451 |
| TR_04-Hospital_U | Tr2 | 45.12 | Hospital_U_10kv | 0.085 | 0.030 | 0.94 | 0.005 | 0.451 |
| | | | Hospital_0.23kv | -0.085 | -0.029 | -0.95 | 0.227 | 0.451 |
| TR_05-Fc.Conta | Tr2 | 45.12 | Fc.Conta_10kv | 0.085 | 0.030 | 0.94 | 0.005 | 0.451 |
| | | | Fc.Conta_0.23kv | -0.085 | -0.029 | -0.95 | 0.227 | 0.451 |
| TR_05-Fc.Conta(Antig) | Tr2 | 45.12 | Fc.Conta(Antig)_10kv | 0.085 | 0.030 | 0.94 | 0.005 | 0.451 |
| | | | Fc.Conta(Antig)_0... | -0.085 | -0.029 | -0.95 | 0.227 | 0.451 |
| TR_07-Fac.Agricola | Tr2 | 45.12 | Fac.Agricola_10kv | 0.170 | 0.060 | 0.94 | 0.010 | 0.451 |
| | | | Fac.Agricola_0.23kv | -0.170 | -0.058 | -0.95 | 0.453 | 0.451 |

| | | | | | |
|---|---------------|--|---|-----------------------------|----|
| | | DIGSILENT PowerFactory 15.1.7 | | Project: Date: 1/15/2020 | |
| Load Flow Calculation | | | Complete System Report: Substations, Voltage Profiles | | |
| AC Load Flow, unbalanced, 3-phase (ABC) | | Automatic Model Adaptation for Convergence | | No | |
| Automatic Tap Adjust of Transformers | | Max. Acceptable Load Flow Error for | | 1.00 kVA | |
| Consider Reactive Power Limits | | Nodes | | 0.10 % | |
| Model Equations | | | | | |
| Grid: Campus_UNA | | System Stage: Campus_UNA | | Study Case: Study Case | |
| | | | | Annex: / 4 | |
| | rtd.V [kV] | Bus - voltage [p.u.] [kV] [deg] | | Voltage - Deviation [%] | |
| | | | | -10 | -5 |
| | | | | 0 | +5 |
| | | | | +10 | |
| Fc.Enfermeria_10kv | 10.00 | 0.999 | 9.99 -0.00 | | |
| Fc.Admi_10kv | 10.00 | 0.999 | 9.99 -0.00 | | |
| Pb.Coliseo_10kv | 10.00 | 0.999 | 9.99 -0.01 | | |
| Hospita1_u_10kv | 10.00 | 0.999 | 9.99 -0.01 | | |
| Fc.Conta_10kv | 10.00 | 0.999 | 9.99 -0.01 | | |
| Fc.Conta(Antig)_10kv | 10.00 | 0.998 | 9.98 -0.01 | | |
| Fc.Enfermeria_0.23kv | 0.23 | 0.995 | 0.23 -0.74 | < | |
| Fc.Admin_0.23kv | 0.23 | 0.995 | 0.23 -0.74 | < | |
| Pb.Coliseo_0.23kv | 0.23 | 0.994 | 0.23 -0.74 | < | |
| Hospita1_0.23kv | 0.23 | 0.994 | 0.23 -0.74 | < | |
| Fc.Contab_0.23kv | 0.23 | 0.994 | 0.23 -0.74 | < | |
| Fc.Contab(Antig)_0.23kv | 0.23 | 0.994 | 0.23 -0.74 | < | |
| Fac.Agricola_10kv | 10.00 | 0.999 | 9.99 -0.00 | | |
| Fac.Agricola_0.23kv | 0.23 | 0.994 | 0.23 -0.73 | < | |

Anexo 4. Resultados de flujo de carga incluyendo armónicos

| | | | | | | | |
|--|--------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|--------------|
| | | | | | DIGSILENT PowerFactory 15.1.7 | Project: Date: 1/15/2020 | |
| Harmonics Calculation Unbalanced, 3-phase (ABC) | | | | | | Busbars/Terminals | |
| Nominal Frequency 60.00 Hz Output Frequency 60.00 Hz Calculate HD and THD Based on Fundamental Frequency Values (IEEE) | | | | | | | |
| Grid: Campus_UNA | | System Stage: Campus_UNA | | Study Case: Study Case | | Annex: / 1 | |
| | Rated voltage (60.00 Hz) [kv] | (60.00 Hz) [p.u.] | Bus-voltage (60.00 Hz) [deg] | RMS [p.u.] | Sum [p.u.] | Distortion Arithmetic [%] | Total [%] |
| Fc.Enfermeria_10kv | 10.00 | 1.00 | -0.00 | 0.00 | 1.01 | 0.23 | 0.70 |
| Fc.Admi_10kv | 10.00 | 1.00 | -0.00 | 0.00 | 1.01 | 0.23 | 0.71 |
| Pb.Coliseo_10kv | 10.00 | 1.00 | -0.01 | 0.00 | 1.01 | 0.33 | 1.03 |
| Hospital_u_10kv | 10.00 | 1.00 | -0.01 | 0.00 | 1.01 | 0.36 | 1.11 |
| Fc.Conta_10kv | 10.00 | 1.00 | -0.01 | 0.00 | 1.01 | 0.37 | 1.16 |
| Fc.Conta(Antig)_10kv | 10.00 | 1.00 | -0.01 | 0.00 | 1.01 | 0.38 | 1.20 |
| Fc.Enfermeria_0.23kv | 0.23 | 0.99 | -0.74 | 0.00 | 1.05 | 1.37 | 5.66 |
| Fc.Admin_0.23kv | 0.23 | 0.99 | -0.74 | 0.00 | 1.04 | 1.30 | 4.44 |
| Pb.Coliseo_0.23kv | 0.23 | 0.99 | -0.74 | 0.00 | 1.25 | 8.25 | 25.70 |
| Hospital_0.23kv | 0.23 | 0.99 | -0.74 | 0.00 | 1.26 | 8.83 | 26.28 |
| Fc.Contab_0.23kv | 0.23 | 0.99 | -0.74 | 0.00 | 1.31 | 9.26 | 31.69 |
| Fc.Contab(Antig)_0.23kv | 0.23 | 0.99 | -0.74 | 0.00 | 1.20 | 6.19 | 20.78 |
| Fac.Agricola_10kv | 10.00 | 1.00 | -0.00 | 0.00 | 1.01 | 0.35 | 1.04 |
| Fac.Agricola_0.23kv | 0.23 | 0.99 | -0.73 | 0.00 | 1.44 | 15.94 | 44.60 |

| | | DIGSILENT PowerFactory 15.1.7 | | Project: Date: 1/15/2020 | | | | | | |
|--|--------------------|---------------------------------|------------|-------------------------------------|--------------------------|---------------------------------|---------------------------|-------------|-------|------|
| Harmonics Calculation Unbalanced, 3-phase (ABC) Busbars and Branches | | | | | | | | | | |
| Nominal Frequency 60.00 Hz Output Frequency 60.00 Hz Calculate HD and THD Based on Fundamental Frequency Values (IEEE) | | | | | | | | | | |
| Grid: Campus_UNA | | System Stage: Campus_UNA | | Study Case: Study Case Annex: / 1 | | | | | | |
| | Rated Voltage [kv] | Bus-voltage 60.00 Hz RMS [p.u.] | Sum [p.u.] | Distortion 60.00 Hz [%] | Current 60.00 Hz RMS [A] | Active Power 60.00 Hz Tot. [kW] | cosphi 60.00 Hz Total [-] | Loading [%] | | |
| Fc.Enfermeria_10kv | | | | | | | | | | |
| | 10.00 | 1.00 | 0.00 | 1.01 | 0.23 | 0.70 | | | | |
| Cub_2 /Lne | | MT-L02 | | | 8.33 | 135.82 | 0.14 | 0.94 | 0.94 | 0.00 |
| Cub_3 /Lne | | MT-L03 | | | 23.97 | 390.66 | 0.39 | 0.94 | 0.93 | 0.00 |
| Cub_4 /Tr2 | | TR_01-Fc.Enferm | | | 10.41 | 169.76 | 0.17 | 0.94 | 0.94 | 0.00 |
| Cub_5 /Lne | | MT-L01 | | | 53.13 | -866.09 | -0.87 | -0.94 | -0.93 | 0.00 |
| Cub_6 /Lne | | MT-L07(Existente) | | | 10.42 | 169.85 | 0.17 | 0.94 | 0.90 | 0.00 |
| Fc.Admi_10kv | | | | | | | | | | |
| | 10.00 | 1.00 | 0.00 | 1.01 | 0.23 | 0.71 | | | | |
| Cub_1 /Lne | | MT-L02 | | | 8.33 | -135.81 | -0.14 | -0.94 | -0.94 | 0.00 |
| Cub_2 /Tr2 | | TR_02-Fc.Admin | | | 8.33 | 135.81 | 0.14 | 0.94 | 0.94 | 0.00 |
| Pb.coliseo_10kv | | | | | | | | | | |
| | 10.00 | 1.00 | 0.00 | 1.01 | 0.33 | 1.03 | | | | |
| Cub_1 /Lne | | MT-L03 | | | 23.97 | -390.49 | -0.39 | -0.94 | -0.93 | 0.00 |
| Cub_2 /Lne | | MT-L04 | | | 10.42 | 169.79 | 0.17 | 0.94 | 0.93 | 0.00 |
| Cub_3 /Lne | | MT-L05 | | | 5.21 | 84.89 | 0.08 | 0.94 | 0.93 | 0.00 |
| Cub_4 /Tr2 | | TR_03-Pb.coliseo | | | 8.33 | 135.81 | 0.14 | 0.94 | 0.93 | 0.00 |
| Hospital_U_10kv | | | | | | | | | | |
| | 10.00 | 1.00 | 0.00 | 1.01 | 0.36 | 1.11 | | | | |
| Cub_1 /Lne | | MT-L05 | | | 5.21 | -84.88 | -0.08 | -0.94 | -0.93 | 0.00 |
| Cub_2 /Tr2 | | TR_04-Hospital_U | | | 5.21 | 84.88 | 0.08 | 0.94 | 0.93 | 0.00 |
| Fc.Conta_10kv | | | | | | | | | | |
| | 10.00 | 1.00 | 0.00 | 1.01 | 0.37 | 1.16 | | | | |
| Cub_1 /Lne | | MT-L04 | | | 10.42 | -169.77 | -0.17 | -0.94 | -0.93 | 0.00 |
| Cub_2 /Lne | | MT-L06 | | | 5.21 | 84.89 | 0.08 | 0.94 | 0.93 | 0.00 |
| Cub_3 /Tr2 | | TR_05-Fc.Conta | | | 5.21 | 84.88 | 0.08 | 0.94 | 0.93 | 0.00 |
| Fc.Conta(Antig)_10kv | | | | | | | | | | |
| | 10.00 | 1.00 | 0.00 | 1.01 | 0.38 | 1.20 | | | | |
| Cub_1 /Lne | | MT-L06 | | | 5.21 | -84.88 | -0.08 | -0.94 | -0.93 | 0.00 |
| Cub_2 /Tr2 | | TR_05-Fc.Conta(Antig) | | | 5.21 | 84.88 | 0.08 | 0.94 | 0.93 | 0.00 |
| Fc.Enfermeria_0.23kv | | | | | | | | | | |
| | 0.23 | 0.99 | 0.00 | 1.05 | 1.37 | 5.66 | | | | |
| Cub_2 /Lod | | Fc.Enferm(Load) | | | 452.78 | 169.76 | 0.17 | 0.95 | 0.95 | 0.00 |
| Cub_3 /Tr2 | | TR_01-Fc.Enferm | | | 452.78 | -169.76 | -0.17 | -0.95 | -0.95 | 0.00 |
| Fc.Admin_0.23kv | | | | | | | | | | |
| | 0.23 | 0.99 | 0.00 | 1.04 | 1.30 | 4.44 | | | | |
| Cub_2 /Lod | | Fc.Admin(Load) | | | 362.26 | 135.81 | 0.14 | 0.95 | 0.95 | 0.00 |
| Cub_3 /Tr2 | | TR_02-Fc.Admin | | | 362.26 | -135.81 | -0.14 | -0.95 | -0.95 | 0.00 |
| Pb.coliseo_0.23kv | | | | | | | | | | |

Anexo 5. Resultado de flujo de carga incluyendo filtro

| | | | | | | | |
|---|----------|-------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|--------|---------|--------|
| | | DigSILENT PowerFactory 15.1.7 | | Project: Date: 1/21/2020 | | | |
| Harmonic Loadflow Calculation Unbalanced, 3-phase (ABC) | | | | | | | |
| Grid: Campus_UNA Filter Results | | | Study Case: Study Case Annex: / 1 | | | | |
| Shunt/Filter_SED03 Terminal .\Pb.Coliseo_0.23kv\Cub_4.StaCubic Shunt Type Vector Group | | | | R-L-C Y | | | |
| | | (60.00 Hz) | | RMS | | | |
| Inductor Current | | 226.60 A | | 226.77 A | | | |
| Capacitance Current | | 226.60 A | | 226.77 A | | | |
| Losses Inductor | | 0.00 kw | | 0.00 kw | | | |
| f Hz | ur1 p.u. | urp p.u. | uc p.u. | uc1 p.u. | IL [A] | IRp [A] | Ic [A] |
| 60.00 | 0.061 | | 1.064 | | 226.60 | | 226.60 |
| 180.00 | 0.000 | | 0.001 | | 0.60 | | 0.60 |
| 300.00 | 0.005 | | 0.003 | | 3.55 | | 3.55 |
| 420.00 | 0.006 | | 0.002 | | 3.19 | | 3.19 |
| 540.00 | 0.001 | | 0.000 | | 0.41 | | 0.41 |
| 660.00 | 0.006 | | 0.001 | | 1.92 | | 1.92 |
| 780.00 | 0.009 | | 0.001 | | 2.53 | | 2.53 |
| 900.00 | 0.003 | | 0.000 | | 0.76 | | 0.76 |
| 1020.00 | 0.006 | | 0.000 | | 1.32 | | 1.32 |
| 1140.00 | 0.007 | | 0.000 | | 1.29 | | 1.29 |
| 1260.00 | 0.002 | | 0.000 | | 0.34 | | 0.34 |
| 1380.00 | 0.000 | | 0.000 | | 0.01 | | 0.01 |
| 1500.00 | 0.000 | | 0.000 | | 0.01 | | 0.01 |
| 1620.00 | 0.000 | | 0.000 | | 0.00 | | 0.00 |
| 1740.00 | 0.012 | | 0.000 | | 1.59 | | 1.59 |
| 1860.00 | 0.019 | | 0.000 | | 2.21 | | 2.21 |
| 1980.00 | 0.002 | | 0.000 | | 0.25 | | 0.25 |
| 2100.00 | 0.022 | | 0.000 | | 2.35 | | 2.35 |
| 2220.00 | 0.022 | | 0.000 | | 2.23 | | 2.23 |
| 2340.00 | 0.004 | | 0.000 | | 0.36 | | 0.36 |
| 2460.00 | 0.053 | | 0.001 | | 4.79 | | 4.79 |
| 2580.00 | 0.026 | | 0.000 | | 2.23 | | 2.23 |
| 2700.00 | 0.002 | | 0.000 | | 0.16 | | 0.16 |
| 2820.00 | 0.026 | | 0.000 | | 2.08 | | 2.08 |
| 2940.00 | 0.017 | | 0.000 | | 1.29 | | 1.29 |

| Grid: Campus_UNA Filter Results | | | | Study Case: Study Case Annex: / 2 | | | | |
|---|----------|----------|---------|--------------------------------------|----------|---------|--------|--|
| Shunt/Filter_SED04 Terminal .\Hospital_0.23kv\Cub_4.StaCubic Shunt Type Vector Group | | | | R-L-C Y | | | | |
| | | | | (60.00 Hz) | RMS | | | |
| Inductor Current | | | | 227.75 A | 227.87 A | | | |
| Capacitance Current | | | | 227.75 A | 227.87 A | | | |
| Losses Inductor | | | | 0.00 kw | 0.00 kw | | | |
| f Hz | ur1 p.u. | urp p.u. | uc p.u. | uc1 p.u. | IL [A] | IRp [A] | Ic [A] | |
| 60.00 | 0.062 | | 1.070 | | 227.75 | | 227.75 | |
| 180.00 | 0.000 | | 0.000 | | 0.06 | | 0.06 | |
| 300.00 | 0.003 | | 0.002 | | 2.04 | | 2.04 | |
| 420.00 | 0.004 | | 0.001 | | 1.85 | | 1.85 | |
| 540.00 | 0.000 | | 0.000 | | 0.06 | | 0.06 | |
| 660.00 | 0.004 | | 0.001 | | 1.40 | | 1.40 | |
| 780.00 | 0.004 | | 0.000 | | 1.12 | | 1.12 | |
| 900.00 | 0.001 | | 0.000 | | 0.26 | | 0.26 | |
| 1020.00 | 0.008 | | 0.000 | | 1.66 | | 1.66 | |
| 1140.00 | 0.007 | | 0.000 | | 1.32 | | 1.32 | |
| 1260.00 | 0.002 | | 0.000 | | 0.30 | | 0.30 | |
| 1380.00 | 0.000 | | 0.000 | | 0.01 | | 0.01 | |
| 1500.00 | 0.000 | | 0.000 | | 0.01 | | 0.01 | |
| 1620.00 | 0.000 | | 0.000 | | 0.00 | | 0.00 | |
| 1740.00 | 0.010 | | 0.000 | | 1.22 | | 1.22 | |
| 1860.00 | 0.020 | | 0.000 | | 2.40 | | 2.40 | |
| 1980.00 | 0.002 | | 0.000 | | 0.22 | | 0.22 | |
| 2100.00 | 0.019 | | 0.000 | | 1.98 | | 1.98 | |
| 2220.00 | 0.011 | | 0.000 | | 1.09 | | 1.09 | |
| 2340.00 | 0.001 | | 0.000 | | 0.09 | | 0.09 | |
| 2460.00 | 0.047 | | 0.000 | | 4.21 | | 4.21 | |
| 2580.00 | 0.025 | | 0.000 | | 2.15 | | 2.15 | |
| 2700.00 | 0.002 | | 0.000 | | 0.17 | | 0.17 | |
| 2820.00 | 0.025 | | 0.000 | | 1.93 | | 1.93 | |
| 2940.00 | 0.031 | | 0.000 | | 2.37 | | 2.37 | |

| Grid: Campus_UNA Filter Results | | | | Study Case: Study Case Annex: / 3 | | | |
|--|----------|----------|---------|--------------------------------------|--------|---------|--------|
| Shunt/Filter_SED05 | | | | | | | |
| Terminal .\Fc.Contab_0.23kV\Cub_4.StaCubic | | | | | | | |
| Shunt Type | | | | R-L-C | | | |
| Vector Group | | | | Y | | | |
| | | | | (60.00 Hz) | | | |
| Inductor Current | | | | RMS | | | |
| 227.74 A | | | | 227.91 A | | | |
| Capacitance Current | | | | 227.91 A | | | |
| 227.74 A | | | | 227.91 A | | | |
| Losses Inductor | | | | 0.00 kw | | | |
| 0.00 kw | | | | 0.00 kw | | | |
| f Hz | ur1 p.u. | urp p.u. | uc p.u. | uc1 p.u. | IL [A] | IRp [A] | Ic [A] |
| 60.00 | 0.062 | | 1.070 | | 227.74 | | 227.74 |
| 180.00 | 0.000 | | 0.000 | | 0.15 | | 0.15 |
| 300.00 | 0.003 | | 0.002 | | 1.87 | | 1.87 |
| 420.00 | 0.007 | | 0.002 | | 3.66 | | 3.66 |
| 540.00 | 0.001 | | 0.000 | | 0.37 | | 0.37 |
| 660.00 | 0.004 | | 0.001 | | 1.45 | | 1.45 |
| 780.00 | 0.003 | | 0.000 | | 0.78 | | 0.78 |
| 900.00 | 0.001 | | 0.000 | | 0.31 | | 0.31 |
| 1020.00 | 0.010 | | 0.001 | | 2.14 | | 2.14 |
| 1140.00 | 0.010 | | 0.000 | | 1.88 | | 1.88 |
| 1260.00 | 0.002 | | 0.000 | | 0.43 | | 0.43 |
| 1380.00 | 0.000 | | 0.000 | | 0.01 | | 0.01 |
| 1500.00 | 0.000 | | 0.000 | | 0.01 | | 0.01 |
| 1620.00 | 0.000 | | 0.000 | | 0.00 | | 0.00 |
| 1740.00 | 0.015 | | 0.000 | | 1.88 | | 1.88 |
| 1860.00 | 0.022 | | 0.000 | | 2.61 | | 2.61 |
| 1980.00 | 0.005 | | 0.000 | | 0.60 | | 0.60 |
| 2100.00 | 0.020 | | 0.000 | | 2.06 | | 2.06 |
| 2220.00 | 0.015 | | 0.000 | | 1.51 | | 1.51 |
| 2340.00 | 0.002 | | 0.000 | | 0.19 | | 0.19 |
| 2460.00 | 0.049 | | 0.001 | | 4.39 | | 4.39 |
| 2580.00 | 0.029 | | 0.000 | | 2.47 | | 2.47 |
| 2700.00 | 0.008 | | 0.000 | | 0.63 | | 0.63 |
| 2820.00 | 0.025 | | 0.000 | | 2.00 | | 2.00 |
| 2940.00 | 0.038 | | 0.000 | | 2.83 | | 2.83 |

| Grid: Campus_UNA Filter Results | | | | Study Case: Study Case Annex: / 4 | | | |
|---|----------|----------|---------|--------------------------------------|--------|---------|--------|
| Shunt/Filter_SED07 Terminal .\Fac.Agricola_0.23kv\Cub_4.StaCubic Shunt Type Vector Group | | | | R-L-C Y | | | |
| (60.00 Hz) | | | | RMS | | | |
| Inductor Current | | | | 226.18 A | | | |
| Capacitance Current | | | | 226.18 A | | | |
| Losses Inductor | | | | -0.00 kw | | | |
| f Hz | ur1 p.u. | urp p.u. | uc p.u. | uc1 p.u. | IL [A] | IRp [A] | Ic [A] |
| 60.00 | 0.061 | | 1.062 | | 226.18 | | 226.18 |
| 180.00 | 0.000 | | 0.001 | | 0.51 | | 0.51 |
| 300.00 | 0.006 | | 0.004 | | 4.37 | | 4.37 |
| 420.00 | 0.006 | | 0.002 | | 3.06 | | 3.06 |
| 540.00 | 0.000 | | 0.000 | | 0.13 | | 0.13 |
| 660.00 | 0.006 | | 0.001 | | 2.15 | | 2.15 |
| 780.00 | 0.008 | | 0.001 | | 2.14 | | 2.14 |
| 900.00 | 0.001 | | 0.000 | | 0.25 | | 0.25 |
| 1020.00 | 0.006 | | 0.000 | | 1.34 | | 1.34 |
| 1140.00 | 0.007 | | 0.000 | | 1.38 | | 1.38 |
| 1260.00 | 0.003 | | 0.000 | | 0.59 | | 0.59 |
| 1380.00 | 0.009 | | 0.000 | | 1.51 | | 1.51 |
| 1500.00 | 0.010 | | 0.000 | | 1.51 | | 1.51 |
| 1620.00 | 0.002 | | 0.000 | | 0.31 | | 0.31 |
| 1740.00 | 0.015 | | 0.000 | | 1.94 | | 1.94 |
| 1860.00 | 0.014 | | 0.000 | | 1.70 | | 1.70 |
| 1980.00 | 0.004 | | 0.000 | | 0.42 | | 0.42 |
| 2100.00 | 0.027 | | 0.000 | | 2.84 | | 2.84 |
| 2220.00 | 0.036 | | 0.000 | | 3.63 | | 3.63 |
| 2340.00 | 0.012 | | 0.000 | | 1.11 | | 1.11 |
| 2460.00 | 0.124 | | 0.001 | | 11.16 | | 11.16 |
| 2580.00 | 0.039 | | 0.000 | | 3.36 | | 3.36 |
| 2700.00 | 0.009 | | 0.000 | | 0.71 | | 0.71 |
| 2820.00 | 0.025 | | 0.000 | | 1.98 | | 1.98 |
| 2940.00 | 0.049 | | 0.000 | | 3.66 | | 3.66 |

Anexo 6. Características de banco de condensadores

Condensadores de Potencia / Power Capacitors

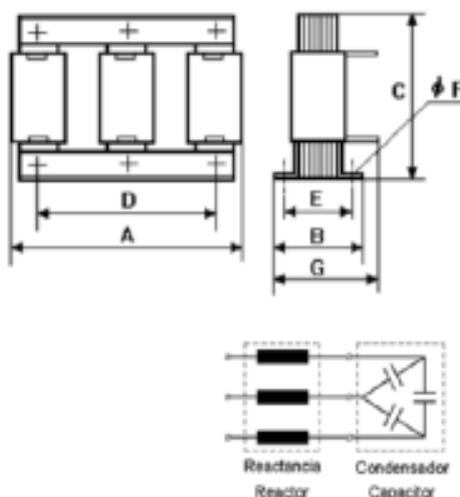
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS / TECHNICAL CHARACTERISTICS

| | | |
|--|--|--|
| Tensión nominal/Rated voltage | 230 ... 1000 V | |
| Frecuencia nominal/Rated frequency | 50 Hz - 60 Hz | |
| Potencia/Power | 0,5...100 kvar | |
| Fases/Phases | Monofásico o Trifásico/Single or Three-phase | |
| Nivel de aislamiento/Insulation level | 3 kV rms/15 kV pico/peak (FML) 3 kV rms/- kV pico/peak (POLB) | |
| Dieléctrico/Dielectric | MKP Polipropileno/Polypropylene MKP | |
| Armaduras/Plates | Metalizada (autoregenerantes)/Metallized (self-healing) | |
| Resistencias de descarga/Discharge resistors | 75 V en/in 3 min | |
| Pérdidas dieléctricas/Dielectric losses | < 0.2 W/kvar | |
| Pérdidas totales/Total losses | < 0.5 W/kvar | |
| Sobretensión máxima/Max. overvoltage | $U_n + 10\%$ hasta 8h diarias / up to 8h daily $U_n + 15\%$ hasta 30 min diarios / up to 30 min daily $U_n + 20\%$ hasta 5 min / up to 5 min $U_n + 30\%$ hasta 1 min / up to 1 min | |
| Sobreintensidad máxima/Max. overcurrent | 1.3 ~ 2.0 I_n | |
| Máxima corriente de pico/Max. peak current | 100 ~ 400 I_n | |
| Vida útil/Life expectancy | Cilíndrico/Cylindrical | 100.000 ~ 150.000 horas/hours |
| | Prismático/Prismatic | 160.000 horas/hours |
| Protección/Protection | IP41 (prismático/prismatic) IP20 / IP54 (Cilíndrico/cylindrical) | |
| Altitud máx./Max. altitude | 2000 ~ 4000 m. | |
| Impregnación/Impregnation | Gas o resina/Gas or resin | |
| Tolerancia potencia/Power tolerance | -5/+10 % | |
| Asimetría entre fases/Phase asymmetry | < 8 % | |
| Límites de temperatura/Temperature limits | -40/D | - temperatura máx./max. temperature = 55°C - máx. más de 24h/max. over 24h = 45°C - máx. más de 1 año/max. over 1 year = 35°C - temperatura más baja/lowest temperature = -40°C |
| Humedad/Humidity | 95 ~ 100% (Sin condensación/Without condensation) | |
| Instalación/Installation | Interior/indoor | |
| Normas/Standards | IEC 60831, EN 60831 | |

Anexo 7. Características de filtros de protección

INA/INR

REACTANCIA PARA BATERÍA ESTÁNDAR
REACTOR FOR STANDARD CAPACITOR BANK



DATOS DEL REACTOR / REACTOR DATA

| Referencia Part Number | Filtro | | | Dimensiones | | | | | | | | Peso (kg) Weight | Pérdidas Losses (W) |
|---------------------------|-----------|-------------|------------|-------------|-----|-----|-----|-----|---|-----|-----|---------------------|------------------------|
| | Qn (kvar) | Un (V) 50Hz | Resonance | A | B | C | D | E | F | G | | | |
| INR40057 | 5 | 400 | 7% (189Hz) | 155 | 76 | 165 | 75 | 55 | 5 | - | 5 | 26 | |
| INR40107 | 10 | 400 | 7% (189Hz) | 180 | 102 | 190 | 90 | 75 | 7 | - | 7,5 | 52 | |
| INR40127 | 12,5 | 400 | 7% (189Hz) | 180 | 112 | 190 | 90 | 85 | 7 | - | 8,5 | 55 | |
| INR40157 | 15 | 400 | 7% (189Hz) | 180 | 112 | 190 | 90 | 85 | 7 | - | 8,5 | 59 | |
| INA40207 | 20 | 400 | 7% (189Hz) | 235 | 125 | 165 | 150 | 95 | 7 | 145 | 14 | 79 | |
| INA40257 | 25 | 400 | 7% (189Hz) | 235 | 125 | 165 | 150 | 95 | 7 | 145 | 14 | 93 | |
| INA40307 | 30 | 400 | 7% (189Hz) | 255 | 125 | 200 | 160 | 95 | 7 | 150 | 19 | 124 | |
| INA40407 | 40 | 400 | 7% (189Hz) | 255 | 125 | 200 | 160 | 95 | 7 | 150 | 20 | 149 | |
| INA40507 | 50 | 400 | 7% (189Hz) | 255 | 145 | 220 | 160 | 115 | 8 | 175 | 25 | 189 | |
| INA40607 | 60 | 400 | 7% (189Hz) | 280 | 145 | 240 | 160 | 115 | 8 | 175 | 28 | 210 | |
| INA40757 | 75 | 400 | 7% (189Hz) | 305 | 155 | 235 | 180 | 115 | 8 | 190 | 31 | 235 | |
| INA40807 | 80 | 400 | 7% (189Hz) | 305 | 155 | 235 | 180 | 115 | 8 | 190 | 31 | 241 | |
| INA40997 | 100 | 400 | 7% (189Hz) | 305 | 170 | 235 | 180 | 135 | 8 | 215 | 37 | 285 | |

COMPONENTES DEL FILTRO / FILTER PARTS

| Referencia Part Number | Q Filtro Q Filter | Current Current (A) | Condensador | Capacitor | Contactor | Fusible Fuse (A) | Int. Automatica MCCB (A) | Cable |
|---------------------------|----------------------|------------------------|-----------------|--------------|-----------|---------------------|-----------------------------|-------|
| | | | POLE | FML | | | | |
| INR40057 | 5 kvar | 7 | POLB46063HD | FMLF4606 | KML12 | 16 | 16 | 1,5 |
| INR40107 | 10 kvar | 14 | POLB46125HD | FMLF4612 | KML12 | 25 | 25 | 2,5 |
| INR40127 | 12,5 kvar | 18 | POLB46150HD | FMLF4615 | KML25 | 32 | 32 | 4 |
| INR40157 | 15 kvar | 22 | POLB46185HD | FMLF4618 | KML25 | 50 | 32 | 4 |
| INA40207 | 20 kvar | 29 | POLB46250HD | FMLF4625 | KML25 | 50 | 50 | 10 |
| INA40257 | 25 kvar | 36 | POLB46300HD | FMLF4631 | KML30 | 63 | 63 | 10 |
| INA40307 | 30 kvar | 43 | POLB46370HD | FMLF4637 | KML30 | 100 | 63 | 16 |
| INA40407 | 40 kvar | 58 | 2 x POLB46250HD | FMLF4649 | KML50 | 100 | 100 | 35 |
| INA40507 | 50 kvar | 72 | 2 x POLB46300HD | FMLF4661 | KML60 | 125 | 125 | 50 |
| INA40607 | 60 kvar | 87 | 2 x POLB46370HD | FMLF4674 | KML60 | 160 | 125 | 70 |
| INA40757 | 75 kvar | 108 | 3 x POLB46300HD | FMLF4692 | KML80 | 200 | 160 | 95 |
| INA40807 | 80 kvar | 115 | 3 x POLB46333HD | FMLF4698 | KML80 | 200 | 200 | 95 |
| INA40997 | 100 kvar | 144 | - | 2 x FMLF4661 | - | 250 | 250 | 120 |

Filtros de Protección / Protection Filters

Anexo 8. Matriz de consistencia

**COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA Y ANÁLISIS DE ARMÓNICOS
EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA UNA PUNO 2018-2019**

| PROBLEMAS | OBJETIVOS | HIPÓTESIS |
|---|--|---|
| Problema General | Objetivo General | Hipótesis General |
| ¿Será posible analizar experimentalmente la presencia de armónicos producidos por cargas no lineales en el sistema de distribución eléctrica de la UNAP, para luego mitigar y tener un servicio de calidad? | Existe la relación entre la compensación de potencia reactiva y los armónicos en los sistemas de distribución eléctrica de la UNA PUNO | Existe relación significativa entre la compensación de potencia reactiva y los armónicos con los sistemas de distribución eléctrica de la UNA PUNO. |
| Problemas Específicos | Objetivos Específicos | Hipótesis Específicas |
| ¿Qué tipos de armónicos distorsionan la calidad de servicio eléctrico en sistema de distribución de la UNAP? | Establecer la relación entre la compensación de potencia reactiva con los sistemas de distribución eléctrica. | Existe relación significativa entre la compensación de potencia reactiva con los sistemas de distribución eléctrica. |
| ¿Será posible mejorar el factor de potencia de sistema de distribución eléctrica de la UNAP, utilizando filtros? | Establecer la relación de los armónicos de tensión y corriente con los sistemas de distribución eléctrica. | Existe relación significativa entre los armónicos de tensión y corriente con los sistemas de distribución eléctrica. |

| VARIABLES | DIMENSIONES | INDICADORES |
|--|--|---|
| <p>Variable Independiente</p> <p>COMPENSACIÓN DE LA POTENCIA REACTIVA</p> <p>ANÁLISIS DE ARMÓNICOS EN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN</p> | <p>COMPENSACIÓN GLOBAL</p> <p>COMPENSACIÓN POR GRUPOS</p> <p>COMPENSACIÓN INDIVIDUAL</p> <p>ARMÓNICOS DE TENSIÓN</p> <p>ARMÓNICOS DE CORRIENTE</p> | <ul style="list-style-type: none"> - Potencia reactiva - Factor de potencia - Valor eficaz de tensión - Distorsión armónica de tensión - Valor eficaz de corriente - Distorsión armónica de corriente |
| <p>Variable Dependiente</p> <p>POTENCIA REACTIVA Y ARMÓNICOS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA</p> | <p>CALIDAD DE PRODUCTO</p> <p>CALIDAD DE SUMINISTRO ELÉCTRICO</p> | <ul style="list-style-type: none"> - Tensión - Frecuencia - Perturbaciones - Flicker - Interrupciones |