



BANCO DE CONDENSADORES CON DISESINTONÍA ARMÓNICA

ARTÍCULO CIENTÍFICO

RECIBIDO: 20/10/2020 ACEPTADO: 24/01/2021 ÚLTIMA VERSIÓN: 20/02/2021

¹ Mateus De Melo Gomes, ² Yo Thiago Vieira Da Silva

¹ Graduado en Ingeniería Eléctrica en el Centro Universitario de Patos de Minas - UNIPAM, mateusdemelo77@gmail.com,

² Maestría en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Federal de Uberlândia - UFU, thiagovs@unipam.edu.br

Como citar este artículo: Melo, M; Vieira, T, (2021) Banco de condensadores con disesintonía armónica, revista científica Dynamikos 2 (1). Recuperado de:

<https://teinco.edu.co/wp-content/uploads/2021/10/REVISTA-DYNAMIKOS-No3-ISSN-DATE-MFGG-PUBLINDEX.pdf>

ABSTRACTO

Hoy en día una de las mayores preocupaciones del sector industrial es la calidad y eficiencia de la energía utilizada y consumida, siendo la corrección del factor de potencia, principalmente relacionado con la presencia de armónicos, un tema de suma importancia para determinar la eficiencia del sector eléctrico. Además de reducir las pérdidas en toda la red eléctrica, el factor de potencia bien dimensionado protege a la empresa de ser gravada por los servicios de energía, evitando gastos y pérdidas innecesarias. Para aproximarse al factor de potencia ideal, es decir, unitario, se utilizan habitualmente bancos de condensadores ligados a reactores de desincronización, que garantizan la mejor eficiencia energética y preservan toda la red eléctrica frente al daño causado por frecuencias armónicas.

PALABRAS CLAVE: Factor de potencia. Corrección del factor de potencia. Banco de condensadores. Resonancia armónica. Frecuencia Armónica.

ABSTRACT

Today one of the major concerns of the industrial sector is the quality and efficiency of the energy used and consumed, being the correction of the power factor, mainly related to the presence of harmonics, an issue of great importance to determine the efficiency of the sector. electric. In addition to reducing losses throughout the electrical network, the well-dimensioned power factor protects the company from being taxed by energy services, avoiding unnecessary expenses and losses. To approach the ideal power factor, that is, unity, capacitor banks linked to desynchronization reactors are usually used, which guarantee the best energy efficiency and preserve the entire electrical network against damage caused by harmonic frequencies.

KEYWORDS: Power factor. Power factor correction. Capacitor bank. Harmonic resonance. Harmonic Frequency.

1. INTRODUCCIÓN

Considerando que el sistema eléctrico está formado principalmente por unidades consumidoras, tales como motores, generadores, transformadores, líneas de distribución, reactores para lámparas de descarga, hornos de inducción, entre otros tipos de cargas que presentan demanda de energía activa, reactiva y aparente., es necesario controlar el factor de potencia para minimizar las pérdidas de energía eléctrica. En Brasil, este control se realiza a través de las tarifas de energía ejercidas por los concesionarios de acuerdo con la resolución normativa n° 414, de 9 de septiembre de 2010, regida por la AGENCIA NACIONAL DE ENERGÍA ELÉCTRICA - ANEEL.

Según ANEEL, n°414 (2010), las unidades de consumo se dividen en dos grupos, siendo el grupo A todas las unidades que necesitan un suministro de tensión igual o superior a 2,3 kV, o servidas desde el sistema subterráneo. de distribución de tensión secundaria y grupo B todas las unidades que necesiten una tensión de alimentación inferior a 2,3 kV. En cuanto al factor de potencia, el artículo 76 de la normativa dice que debe ser verificado permanentemente por el distribuidor de forma obligatoria para el grupo A, para poder realizar la carga, además, las unidades pertenecientes al grupo B tienen bajo factor de potencia, por lo tanto, no se les puede cobrar por el exceso de reactivos.

Al mismo tiempo, las unidades industriales ubicadas dentro del grupo A están compuestas en gran parte por motores de inducción, según Creder (2016) "son responsables de más del 50% del consumo de electricidad en una industria". Estos motores la mayoría de ellos tienen un factor de potencia bajo, dificultando la compensación reactiva, y aumentando los problemas en los procesos productivos y comerciales, y, además del pago de tarifas al concesionario, gran parte de la energía consumida en la industria no se está transformando en trabajo, provocando desperdicios y pérdidas.

Entre las diferentes formas de reducir las pérdidas de energía en las unidades de consumo, la que más se destaca en términos de costo beneficio es el uso de bancos de capacitores con o sin armónicos de frecuencias armónicas, pues además de asegurar la calidad energética para una industria, realizan la corrección. del factor de potencia, y también garantizar la protección contra distorsiones en la red, en el caso de bancos sintonizados.

El objetivo general de este trabajo es demostrar la importancia de la corrección del factor de potencia, asegurando la compensación reactiva en condiciones de cargas lineales y cargas no lineales, para garantizar la calidad de la energía en una instalación eléctrica, evitando pérdidas y gastos innecesarios, así como la mitigación de los efectos nocivos que los armónicos pueden generar en todo el sistema eléctrico.

Para llevar a cabo la formulación del presente trabajo se utilizaron libros y artículos relacionados con la temática presentada, así como sitios de investigación y profundización de los conocimientos tratados, con el fin de adquirir información y datos confiables y veraces, para enriquecer la investigación.

En este trabajo se realiza una representación computacional, utilizando el software Psim(Powersim), que simulará un entorno industrial en su desempeño a lo largo del día, considerando compensaciones reactivas para ayudar en la garantía de la calidad de la energía. Psim se utiliza como herramienta de simulación, permitiendo analizar la activación de una carga inductiva, observando parámetros como el factor de potencia y la distorsión armónica, así, los datos recolectados permitirán el análisis de la eficiencia energética de la carga observada, para luego realizar la corrección factorial.

La elección del tema se justifica porque esta asignatura se aborda en varias asignaturas presentes en el curso de Ingeniería Eléctrica, tales como Circuitos Eléctricos I, Circuitos Eléctricos II, Instalaciones Eléctricas en Edificios, Instalaciones Eléctricas Industriales, Temas Integradores I, Temas Integradores II, entre otros...

2. MARCO TEÓRICO

Para apoyar el estudio de la compensación reactiva, se deben comprender los siguientes temas.

2.1 ENERGÍA Y ELECTRICIDAD

"La energía es el valor más importante en los sistemas eléctricos, electrónicos y de comunicaciones, ya que implica la transmisión de energía de un punto a otro". (ALEXANDER; SADIKU, 2013, pág.406).

Según Tamietti (2007, p. 14) "[...] un objetivo de fundamental importancia es la determinación de la potencia eléctrica en un circuito o la energía eléctrica consumida o suministrada por éste". Aún en el mismo autor, agrega que el estudio de la potencia y la energía eléctrica son cantidades mucho más simples de entender en términos prácticos, esto se debe a que mirando los sistemas de energía eléctrica es exactamente este producto - energía - que es generado por las plantas, siendo transmitido, distribuidos y facturados por concesionarios a cualquier tipo de consumidor, ya sea industrial o residencial.

Otra alternativa para entender el concepto de energía eléctrica es a través de sus formulaciones. Creder (2016) explica que,

[...] la energía eléctrica es el producto de la corriente por el voltaje, es decir:

$$P = V \times I$$

P = en vatios; V = en voltios; I = en amperios.

Esta expresión solo es válida para circuitos de corriente continua o para circuitos de corriente alterna monofásicos, con carga resistiva, es decir, lámparas incandescentes, plancha eléctrica, ducha eléctrica, etc.

Cuando se trata de circuitos trifásicos, Vieira (2008, p. 4) dice que el análisis matemático en sistemas de corriente alterna era prácticamente imposible, hasta que Karl August Rudolf Steinmetz propuso un método para describir estos circuitos utilizando números complejos. "Gracias a este método simbólico, fue posible comprender mejor los fenómenos físicos de la corriente alterna y, en consecuencia, su expansión a nivel mundial".

2.1.1 Tipos de energía eléctrica

Utilizando el método desarrollado por Steinmetz, fue posible separar la energía eléctrica alterna en tres tipos, la potencia activa, la potencia reactiva y la potencia aparente.

Potencia Activa “Es la transformación de la energía eléctrica en cualquier forma de energía útil, tales como: luminosa, térmica, entre otras, sin necesidad de una transformación energética intermedia”. Franchi (2014, p. 85). Su unidad de medida es vatio (W) y se puede expresar mediante la ecuación 1.

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos\varphi \quad 1$$

Donde:

P = potencia activa

V = voltaje eléctrico

I = corriente eléctrica

φ = Ángulo formado entre las potencias activa y aparente

Según (FRANCHI, 2014), la Potencia Reactiva es la energía intermedia indispensable para que equipos como motores, transformadores, reactores, entre otros, exciten su campo magnético o eléctrico, posibilitando la obtención de potencia activa. “... la potencia reactiva, además de no producir trabajo, circula entre la carga y la fuente de energía, ocupando un espacio en el sistema eléctrico que podría utilizarse para aportar más energía activa” (WEG, 2009). Su unidad de medida es el volt amperio reactivo (VAR) y se puede expresar con la ecuación 2.

$$Q = \sqrt{3} \times V \times I \times \text{Sen}\varphi \quad 2$$

Donde:

Q = potencia reactiva

V = voltaje eléctrico

I = corriente eléctrica

φ = Ángulo formado entre las potencias activa y aparente

Respecto a la Potencia Aparente “[...] se define como la raíz de la suma de los cuadrados de la potencia activa y reactiva o, alternativamente, como el producto entre los valores efectivos de tensión y corriente”. (ANEEL, 2012). Su unidad de medida es el voltio amperio (VA) y se puede expresar mediante la ecuación 3.

$$S = \sqrt{3} \times V \times I \quad 3$$

Donde:

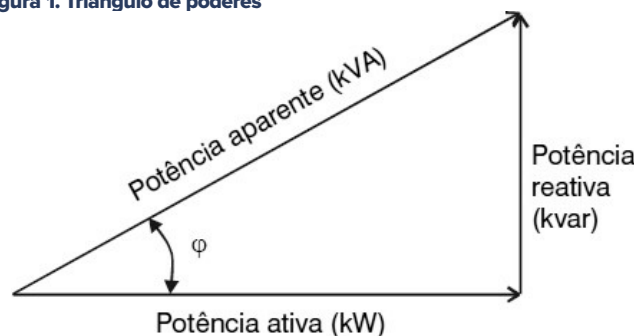
S = potencia aparente

V = voltaje eléctrico

I = corriente eléctrica

De acuerdo con Alejandro; Sadiku, (2013, p. 421), es una práctica común representar las potencias activa, reactiva y aparente en forma de un triángulo rectángulo, conocido como triángulo de potencia, representado en la Figura 1.

Figura 1. Triángulo de poderes



Fuente: View Tech, 2019

Según la Figura 1, “La potencia aparente S es la suma geométrica de la potencia activa P con la potencia reactiva Q , caracterizando el triángulo rectángulo con Q , con el lado opuesto y P el lado adyacente a φ ” (FRANCHI, 2014, p. 88).

Aun analizando el triángulo de potencia mostrado en la Figura 1, otro aspecto importante a observar es el ángulo formado entre la potencia aparente y la potencia activa, representado por la letra griega φ , este ángulo es responsable de un aspecto importante para la calidad de la energía: el factor de potencia.

2.2 FACTOR DE POTENCIA

Según Dualibe (2000), el factor de potencia es un indicador del grado de eficiencia de un sistema eléctrico, siendo el porcentaje de la energía total suministrada, que se transformará en energía activa.

Una forma de calcular el factor de potencia es mediante la relación entre el consumo de energía activa y aparente. Expresado matemáticamente por la ecuación 4.

$$Fp = \frac{P}{S} \quad 4$$

Donde:

Fp = factor de potencia

P = potencia activa

S = potencia aparente

Según Filho (2017, p. 272), otra forma de definir el factor de potencia es a través del coseno del ángulo y su componente total, cuando el sistema presenta cargas lineales. Expresado matemáticamente por la ecuación 5.

$$Fp = \cos\varphi \quad 5$$

Dónde:

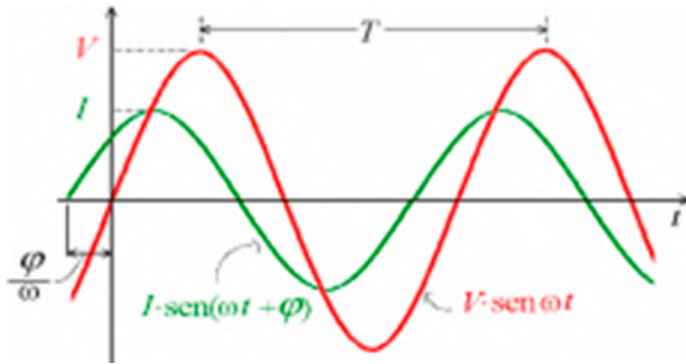
Fp = factor de potencia

φ = Ángulo formado entre las potencias activa y aparente

“Si el circuito es inductivo y consume energía reactiva, se dice que el factor de potencia está retrasado; si el circuito es capacitivo, proporcionando energía reactiva, el factor de potencia se dice de antemano”. (CREDER, 2016).

La Figura 2 muestra una situación típica de un factor de potencia avanzado, es decir, capacitivo.

Figura 2. Retraso actual en relación con el voltaje



Fuente: Vieira, 2008

“En este caso, la corriente se avanza desde un ángulo con relación al voltaje, ya que la amplitud máxima I de la corriente se alcanza en un instante anterior a aquél en el que el voltaje alcanza su amplitud máxima V ”. (VIEIRA, 2008, pág.8).

Complementando esto, la empresa WEG (2009) clasifica el factor de potencia como la eficiencia en el uso de la energía, “Un factor de potencia alto indica una alta eficiencia y, por el contrario, un factor de potencia bajo indica una eficiencia energética baja”.

“Hay varias causas para un factor de potencia bajo. Los profesionales de la industria deben estar atentos, inspeccionar constantemente dichos elementos y hacer correcciones cuando sea necesario”. (BRAGA, 2011). Entre estas causas, Franchi (2014) enumera las principales como: Motores eléctricos sobredimensionados o de baja carga, lámparas de descarga, instalación de aire acondicionado, máquinas para soldar, equipos electrónicos y sobredimensionamiento de transformadores.

Silva (2009, p. 30), considerando un análisis más teórico, enfatiza que,

El Factor de Potencia es un índice de utilización de energía

cuyo adecuado control en las instalaciones de consumo es de suma importancia, no solo desde el punto de vista electroenergético, sino también, y fundamentalmente, porque es monitoreado por los sistemas de medición de los concesionarios, que pueden incurrir en (a menudo significativo) en las facturas de electricidad.

Dichos cargos citados por Silva (2009) son multas cobradas por los concesionarios, cuando las empresas exceden el valor límite del factor de potencia.

Según ANEEL (2010) El factor de potencia de referencia “fR”, inductivo o capacitivo, tiene el límite mínimo permitido, para las unidades consumidoras del grupo A, el valor de 0,92”. El mismo estándar clasifica como grupo A todas unidades de consumo que carecen de una tensión igual o superior a 2,3 kV, o que son alimentadas por un sistema de distribución de tensión secundaria subterránea.

“El factor de potencia bajo - es decir, menos de 0,92 - puede ocasionar serios problemas a una instalación, como calentar los conductores y aumentar la factura de energía; por tanto, hay que corregirlo con la instalación de condensadores” (CREDER, 2016).

2.3 CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA

Como se mostró anteriormente, es de suma importancia tanto para la empresa consumidora como para la concesionaria distribuidora de energía, mantener el factor de potencia dentro de los parámetros determinados por ANEEL. Además del impuesto aplicado, las industrias sufren grandes pérdidas de energía debido al bajo factor de potencia.

Según Tamietti (2007, p. 41) cuanta más energía reactiva se consume, mayor es la corriente consumida. De esta forma, se establece una relación directamente proporcional entre el aumento de pérdidas y el bajo factor de potencia, provocando un aumento en el calentamiento de conductores y equipos”.

Las instalaciones con un factor de potencia pequeño pueden experimentar una disminución en los niveles de voltaje. “El aumento de corriente por exceso de energía reactiva conduce a caídas bruscas de tensión, que pueden provocar la interrupción del suministro eléctrico y la sobrecarga en determinados elementos de la red, generando pérdidas económicas y operativas”. Duailibe (2000, pág. 5).

En un sistema eléctrico, la alta circulación de energía reactiva puede resultar en subutilización de la capacidad instalada, explicado por Marchi (2019, p. 41) esta porción de capacidad no produce trabajo útil, por lo tanto, está ocupando espacio en la red que podría ser aprovechado, para llevar energía activa. “Por tanto, un factor de potencia bajo implica ineficiencia en el uso de la instalación”.

Finalmente, Braga (2011) concluye que, en relación a las consecuencias más graves en cuanto al factor de potencia bajo, son:

[...] Aumento de la factura de la luz.

Fluctuaciones y caídas de tensión por sobrecarga de los circuitos.

Si la instalación utiliza transformadores, pueden limitar seriamente la potencia disponible en la empresa. Para mantener el nivel de consumo es necesario aumentar el grosor de los cables de distribución.

Las pérdidas en las líneas de distribución se incrementan por la disipación de energía en forma de calor (efecto Joule).

Los dispositivos de protección deben tener su capacidad aumentada, así como los equipos de conmutación.

Son varias las ventajas que la corrección del factor de potencia puede traer a una unidad industrial, además de ahorrar dinero al no pagar la multa impuesta por el concesionario, la empresa WEG (2009) cita los principales beneficios para el sector empresarial como: reducción significativa la tarificación de la electricidad, la mejora de la tensión junto con el aumento de la eficiencia energética de la compañía, los equipos e instalaciones se benefician de un aumento de su vida útil, así como un aumento de su capacidad, además de la reducción del efecto Joule, y la delimitación corriente reactiva en la red eléctrica.

Además de los beneficios obtenidos por la empresa, Franchi (2014, p. 92) señala las ventajas de las que disfruta la concesionaria energética de un factor de potencia bien dimensionado, como la reducción de la energía reactiva circulante en la red de transporte y distribución, así como el aumento potencia activa, que realmente funciona, aumentando la capacidad del sistema energético para abastecer al mayor número de consumidores. Al mismo tiempo, un factor de potencia bajo proporciona una reducción de las pérdidas por efecto Joule y una extensión de la vida útil de los equipos e instalaciones eléctricas, así como una reducción de los costos de generación.

Finalmente, Rocha (2011) concluye que,

Cuando se corrige eficazmente el factor de potencia, se reducen las pérdidas de energía, se reducen el calentamiento de los conductores y las variaciones de voltaje, la capacidad de los transformadores logra un mejor aprovechamiento, debido a la liberación de carga. Se produce un aumento de la vida útil de los equipos eléctricos, que comienzan a consumir energía de forma racional y económica. Todo el sistema de distribución de energía también está ganando.

Tamietti (2007, p. 46) afirma que la compensación reactiva de un sistema eléctrico siempre debe analizarse con mucho cuidado, evitando soluciones apresuradas que resulten en un derroche de dinero y energía. Generalmente, se toman medidas básicas para asegurar la corrección de manera segura, como aumentar el consumo de energía activa, usar motores síncronos o usar condensadores.

El aumento de energía activa se puede conseguir con la incorporación de nuevas miedas con un factor de potencia elevado, pero puede convertirse en una desventaja, como explica Franchi (2014, p. 93) “Además de satisfacer las necesidades de producción de la industria, la carga que aumenten el consumo de energía activa deben elegirse cuidadosamente para no superar la demanda máxima contratada, lo que se traduciría en un aumento de la factura de la luz”.

“El uso de motores síncronos puede ser exclusivamente para la corrección del Factor de Potencia, y también pueden acoplarse a una carga que ya exista en la instalación, reemplazando así, por ejemplo, un motor de inducción” (RODRIGUES, 2012, p. 10). Sin embargo, las máquinas síncronas tienen un coste de instalación y mantenimiento extremadamente elevado, siendo así varias veces inviable en términos económicos.

“El uso de motores síncronos puede ser exclusivamente para la corrección del Factor de Potencia, y también pueden acoplarse a una carga que ya exista en la instalación, reemplazando así, por ejemplo, un motor de inducción” (RODRIGUES, 2012, p. 10). Sin embargo, las máquinas síncronas tienen un coste de instalación y mantenimiento extremadamente elevado, siendo así varias veces inviable en términos económicos.

2.4 BANCOS DE CONDENSADORES

Entre todos los diferentes métodos presentados para obtener la adecuación del factor de potencia, las baterías de capacitores destacan por su costo beneficio y efectividad en la corrección de energía reactiva.

“Una batería de condensadores es un conjunto de condensadores de potencia, estructuras de soporte y con los dispositivos necesarios de maniobra, control y protección, ensamblados para constituir un equipo completo” Franchi (2014, p. 95).

Para una mejor comprensión, es necesario profundizar en su componente principal: los condensadores.

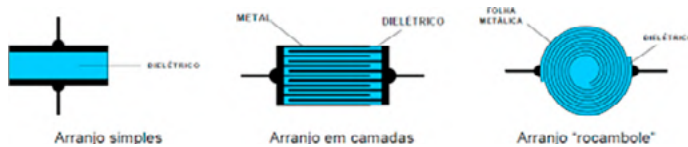
“Los condensadores son equipos capaces de acumular electricidad. Básicamente consisten en dos placas conductoras colocadas frontalmente en paralelo y separadas por cualquier medio aislante, que puede ser aire, papel, plástico, etc.” (FILHO, 2017).

Utilizados por primera vez en 1910, los condensadores de potencia consistían en papel impregnado con cera como material dieléctrico, pero carecían de equipos resistentes y de alta calidad, como señala Santos (2010, p. 21) “La mala calidad de los materiales utilizados no permitía la construcción de condensadores de alta potencia, ya que las pérdidas activas eran mucho mayores que la potencia reactiva”.

Con el paso de los años, y los avances en ciencia y tecnología, las unidades capacitivas se han incrementado mucho, Telló (2016) explica que, en la actualidad, los condensadores están formados por papel dieléctrico o plásticos hechos de polipropileno, láminas de aluminio y productos de impregnación, esto El material permite reducciones considerables de las pérdidas dieléctricas y una mayor resistencia a las tensiones eléctricas.

En la Figura 3 se muestran las diferentes disposiciones constructivas utilizadas para la representación de los condensadores (disposición simple, disposición en capas, disposición “rocambolo”), identificando las placas conductoras y el material dieléctrico.

Figura 3. Constitución de condensadores



Fuente: Nobre, 2016

Según Rodrigues (2012), los condensadores son dispositivos capaces de almacenar energía reactiva, la cual es fundamental para el funcionamiento de diversos equipos, por lo que el uso de bancos de condensadores cercanos a estos equipos es una forma económica de obtener dicha energía reactiva, sin consumir directamente desde la red de distribución.

En cuanto al posicionamiento de los condensadores, (DUAILIBE, 2000) explica que,

Los condensadores deben instalarse lo más cerca posible de las cargas, o en los extremos de los circuitos de alimentación, para:

- Reducir las pérdidas en los circuitos, entre las cargas y el punto de medición;
- Mejorar el nivel de voltaje con la carga (debido a la reducción de la caída de voltaje en los alimentadores);
- Mejorar el uso de la potencia de los transformadores.

Sumado a esto, Filho (2017) dice que las baterías de condensadores deben instalarse cerca de las cargas que presentan alto consumo de energía reactiva, sin embargo, considerando ventajas prácticas y económicas, también pueden ubicarse en otros puntos de la instalación eléctrica.

La corrección del factor de potencia mediante baterías de condensadores se puede realizar de cinco formas diferentes:

1. Corrección en la entrada de energía de alto voltaje: "Corrige el factor de potencia visto por la concesionaria, quedando internamente todos los inconvenientes mencionados por el bajo factor de potencia y el costo es alto". (WEG, 2009).

2. Corrección en la entrada de energía de bajo voltaje: Este tipo de corrección es común en el uso de baterías automáticas de condensadores, como explica (DUAILIBE, 2000) "se indica en instalaciones con un elevado número de cargas con diferentes potencias y regímenes de uso no uniformes". Sin embargo, no existe un relieve sensible en los alimentadores de cada equipo.

3. Corrección del grupo de carga: En esta instalación, el banco de condensadores se coloca junto al cuadro de distribución, para mejorar el factor de potencia de las máquinas pequeñas, normalmente por debajo de los 10 CV. "La principal desventaja de este tipo de corrección es la ausencia de una disminución de la corriente en los circuitos de alimentación de cada equipo, como ocurre en la corrección individual". Tamietti (2007, pág. 82).

4. Corrección individual: Según (FILHO, 2017), "Cuando

una carga específica, como en el caso de un motor, tiene un factor de potencia bajo, se debe hacer su corrección, asignando un banco de capacitores en los terminales de potencia de esta carga". Adicionalmente, la empresa WEG (2009) considera la corrección individual como la mejor solución desde el punto de vista técnico, ya que reduce las pérdidas de energía de la instalación, así como reduce la carga en los equipos en relación a su suministro, además de generar potencia reactiva solo donde es necesario.

5. Corrección mixta: La corrección mixta correlaciona la corrección en la entrada de energía de baja tensión, junto con la corrección por grupos de carga, y es ventajosa cuando hay grandes cargas, ya que las pérdidas en el sistema se reducirán considerablemente. Según Tamietti (2007, p. 84) "Desde el punto de vista de la "Conservación de la energía", considerando los aspectos técnicos, prácticos y económicos, se convierte en la mejor solución".

"Las baterías de capacitores deben estar total o parcialmente desconectadas, de acuerdo con el uso de los motores y transformadores, para que no exista un exceso de energía reactiva capacitiva, que genere efectos adversos en el sistema eléctrico para el concesionario". (RODRIGUES, 2012, pág.11).

Otro aspecto importante a observar a la hora de dimensionar bancos de capacitores para corregir el factor de potencia, es la cantidad de armónicos presentes en el sistema eléctrico, "La tarea de corregir el factor de potencia en una red eléctrica con armónicos es más compleja, porque los armónicos pueden interactuar con los condensadores provocando fenómenos de resonancia". (WEG, 2009).

2.5 INFLUENCIA DE LAS FRECUENCIAS ARMÓNICAS EN LOS BANCOS DE CAPACITORES

Según Fragoas (2008), los armónicos son formas de onda obtenidas a través de múltiples frecuencias de la frecuencia fundamental (60Hz), que, al sumarse a los componentes fundamentales de voltaje o corriente, distorsionan su composición final.

"La incorporación de cargas no lineales en los sistemas de transmisión y distribución eléctrica ha incrementado la circulación de corrientes armónicas todos los días, degradando la calidad de la energía eléctrica y comprometiendo el rendimiento de los equipos". (FILHO, 2017).

Respecto a las cargas no lineales, Nakamura (2011) explica que,

Los elementos inductivos, resistivos y capacitivos cuando se someten a una tensión puramente sinusoidal generan corrientes con amplitudes proporcionales, denominadas cargas lineales. Los equipos que producen corrientes que no son proporcionales a la tensión aplicada, generando ondas no sinusoidales, se denominan cargas no lineales o fuentes de armónicos.

Las fuentes de armónicos son en su mayoría inversores de frecuencia, hornos de arco y equipos electrónicos en general, siendo la calidad energética de un sector eléctrico extremadamente dañina, especialmente cuando se relaciona con la corrección del factor de potencia.

En presencia de frecuencias armónicas, el concepto de factor de potencia se divide en dos temas: factor de potencia de desplazamiento y factor de potencia real.

Según Nakamura (2011), el factor de potencia de desplazamiento caracteriza la relación entre la potencia activa y la potencia aparente, cuando ambas se encuentran en la frecuencia fundamental, y no considera la distorsión armónica. La ecuación matemática para representar el factor de potencia de desplazamiento se presentó en las ecuaciones 4 y 5.

Según la empresa WEG (2009), la corrección efectiva del factor de potencia debe hacerse siempre utilizando el factor de potencia real. Para analizarlo, es necesario considerar el desfase entre tensión y corriente, así como el ángulo de desfase en cada armónico, y la potencia reactiva imprescindible para producirlos.

La determinación del factor de potencia real, es decir, en presencia de componentes armónicos, se puede representar matemáticamente mediante la ecuación 6.

$$F_{pr} = \frac{I_f * \cos\phi}{\sqrt{I_f^2 + \sum I_h^2}} \quad 6$$

Dónde:

F_{pr} = factor de potencia real

I_f = corriente fundamental, valor efectivo en A

I_h = corrientes armónicas, en valor efectivo, de diferentes órdenes

Finalmente, Tamietti (2007) agrega que,

El “Factor de potencia de desplazamiento (FPd)” solo será numéricamente igual al “Factor de potencia (FP)” si las formas de onda de voltaje y corriente son perfectamente sinusoidales, sin distorsión armónica alguna, es decir, solo para cargas totalmente lineales. Este es un tema hipotético imposible e inexistente en los sistemas eléctricos de hoy.

Los conceptos presentados de armónicos y no linealidad de cargas, pueden implicar los bancos de capacitores utilizados para corregir el factor de potencia real, una peculiaridad en el sistema eléctrico llamada resonancia.

2.5.1 Resonancia armónica

“[...] esta es una condición en un circuito de corriente alterna en la cual las reactancias inductiva y capacitiva son iguales y se anulan, provocando sobrecorrientes y sobretensiones, que son responsables de la posibilidad de quemar los condensadores” Tamietti (2007, pág. 294).

Minamizaki (2011) agrega que,

Cuando un punto en el circuito está en condición de resonancia, la impedancia en este punto puede ser extremadamente baja, así como extremadamente alta, dependiendo de las condiciones (disposición) del circuito

eléctrico involucrado, resultando en niveles muy altos de voltaje y corriente, sometiendo al sistema equipos eléctricos a condiciones de funcionamiento perjudiciales.

En cuanto a la adecuación del factor de potencia, Creder (2016) afirma que, en ausencia de bancos de capacitores en el sistema eléctrico, la resonancia no se caracteriza como un problema, ya que esta se establece en frecuencias de kHz.

Sin embargo, “[...] al instalar un banco de capacitores para la corrección del factor de potencia en circuitos con cargas no lineales, se reduce la frecuencia de resonancia, lo que puede crear una condición de resonancia con las corrientes armónicas generadas”. Creder (2016).

El fenómeno de resonancia armónica se puede dividir en dos tipos, resonancia en serie o resonancia en paralelo.

La resonancia en serie, según la empresa WEG (2009), ocurre cuando coinciden las reactancias inductivas y capacitivas presentes en un circuito RLC, como transformadores de potencia y bancos de condensadores conectados en un mismo bus, provocando sobrecorrientes y daños en componentes. “Cuando esto ocurre, las reactancias se cancelan entre sí y la impedancia del circuito se vuelve igual a la resistencia, que es un valor muy pequeño”.

La resonancia en paralelo ocurre cuando el inductor y el banco de condensadores están conectados en paralelo con una fuente de voltaje. “En la condición de resonancia en paralelo, la corriente de línea es cero porque la suma vectorial de las corrientes en el circuito del “tanque” es cero. El voltaje y la impedancia resultantes son muy altos”. Tamietti (2007, pág.297).

En la Figura 4 se muestran los fenómenos de resonancias en serie y resonancia en paralelo, donde se demuestran las condiciones típicas de los transformadores o sistemas en relación a los capacitores.

Figura 4. Resonancia en serie / paralelo



Fuente: Creder 2016

Según García (2000), ante la presencia constante de cargas armónicas, y su nocividad para las instalaciones eléctricas en general, es necesario adoptar medidas para controlar y reducir los niveles de contaminación armónica.

Complementando esto, Marchi (2019) dice que al analizar la instalación eléctrica y verificar la ocurrencia de resonancia armónica, se puede adoptar como solución la inserción de reactores antirresonantes (reactores de desintegración), en serie con la batería de condensadores, para aumentar la impedancia de las ramas de conexión del condensador.

2.5.2 Reactores de teñido

Como se señaló anteriormente, para permitir la mitigación del efecto nocivo de los armónicos en los bancos de condensadores, se utilizan comúnmente reactores antirresonantes, también llamados reactores de desincronización.

Según (Santos, 2013, apud Dias 1998) “un reactor antirresonante o filtro de desintegración es un reactor que se inserta en serie con el capacitor y tiene la finalidad de desplazar el punto de resonancia del sistema a cualquier otra frecuencia no producida por cargas no lineales”.

“Además de este objetivo principal, el reactor conectado en serie con los condensadores, hace un circuito resonante en serie con una cierta frecuencia de sintonía para la cual el sistema ofrecerá una ruta de baja impedancia”. (SP Trafo, 2015).

Finalmente, (Santos, 2013, apud Pereta, 2009) “[...] con la inserción de este reactor se obtiene un circuito resonante con una frecuencia resonante para la cual el sistema ofrece un camino de baja impedancia y sintonizado por debajo del primer armónico existente”.

En relación al dimensionamiento de los reactores de desincronización, Cotrim (2008) dice que,

Dado que la mayoría de las cargas industriales tienen un espectro armónico típico, es posible especificar el reactor para cada tipo de instalación, sin tener que calcular en cada caso reactores específicos, lo que sumaría aún más costos a los sistemas de compensación de energía reactiva.

“La convención adoptada para el diseño del reactor, es relacionar la impedancia del reactor con la del condensador (a frecuencia fundamental), en el que se conectará en serie. La relación de las dos impedancias, en valores porcentuales, definirá la especificación del reactor”. Cotrim (2008, pág. 431).

Esta relación se denomina factor de difusión y puede representarse mediante el símbolo (en sistema pu por unidad) o (en porcentaje), expresado matemáticamente por la ecuación 7.

$$p\% = \frac{ZL}{ZC}$$

Dónde:

$p\%$ = Factor de disfunción

ZL = impedancia del balasto

ZC = impedancia del condensador

“Analizando el factor de desintegración, es posible verificar que cuanto menor es el porcentaje del factor de desintegración, mayor es la (frecuencia de resonancia entre el inductor y el capacitor)”. (SCHALLENBERGER y WOLFF, 2013). La (frecuencia de resonancia entre el inductor y el condensador) se puede expresar matemáticamente mediante la ecuación 8.

$$fr = \frac{f1}{\sqrt{p\%}}$$

8

Dónde:

fr = Frecuencia de resonancia entre el inductor y el condensador

$f1$ = Frecuencia fundamental del sistema

$p\%$ = Factor de afinación

Al proceder con la adaptación de reactores de desincronización se deben observar algunas precauciones, como explica Santos (2013),

Con la instalación de un reactor en serie con el condensador hay un aumento de voltaje permanente en el condensador, es decir, los condensadores aplicados sin filtro de sintonización y dimensionados para el voltaje nominal de la red no pueden usarse en sistemas antirresonantes para el mismo. instalación.

La ecuación 9 expresa matemáticamente el cálculo necesario para dimensionar los condensadores.

$$Ucap = \frac{Urede}{1 - p\%}$$

9

Dónde:

$Ucap$ = Voltaje en el capacitor en voltios

$Urede$ = Voltaje en la red en voltios

$p\%$ = Factor de disfunción

Para facilitar el dimensionamiento preciso de condensadores y reactores de desajuste, SIEMENS (2016), pone a disposición en su catálogo una tabla que especifica los factores de desajuste estandarizados, que se muestra en la Figura 5.

Figura 5. Catálogo para dimensionar el reactor de desincronización

380VAC - 60Hz							
Factor de Desintonía = 14% (3th, 5th, 7th)				Factor de Desintonía = 7% (5th, 7th)			
Potência Efetiva kVAR	Código	Utilizar Capacitor	Tam	Potência Efetiva kVAR	Código	Utilizar Capacitor	Tam
1,82	4DB1,8-380P14	2,5kVar / 480VAC	1	2,00	4DB2,0-380P7	2,5kVar / 440VAC	1
3,64	4DB3,6-380P14	5,0kVar / 480VAC	1	4,00	4DB4,0-380P7	5,0kVar / 440VAC	1
5,47	4DB5,5-380P14	7,5kVar / 480VAC	1	6,00	4DB6,0-380P7	7,5kVar / 440VAC	1
7,29	4DB7,3-380P14	10,0kVar / 480VAC	1	8,00	4DB8,0-380P7	10,0kVar / 440VAC	1
9,11	4DB9,1-380P14	12,5kVar / 480VAC	1	10,03	4DB10,0-380P7	12,5kVar / 440VAC	2
10,93	4DB10,9-380P14	15,0kVar / 480VAC	2	12,00	4DB12,0-380P7	15,0kVar / 440VAC	2
12,75	4DB12,8-380P14	17,5kVar / 480VAC	2	14,00	4DB14,0-380P7	17,5kVar / 440VAC	3
14,58	4DB14,6-380P14	20,0kVar / 480VAC	3	16,04	4DB16,0-380P7	20,0kVar / 440VAC	3
16,40	4DB16,4-380P14	22,5kVar / 480VAC	3	18,04	4DB18,0-380P7	22,5kVar / 440VAC	3R
18,22	4DB18,2-380P14	25,0kVar / 480VAC	3R	20,05	4DB20,0-380P7	25,0kVar / 440VAC	3R
20,04	4DB20,0-380P14	27,5kVar / 480VAC	3R	22,06	4DB22,0-380P7	27,5kVar / 440VAC	3R
21,86	4DB21,9-380P14	30,0kVar / 480VAC	3R	24,06	4DB24,0-380P7	30,0kVar / 440VAC	3R
23,68	4DB23,7-380P14	32,5kVar / 480VAC	3R	26,07	4DB26,0-380P7	32,5kVar / 440VAC	2x3
25,51	4DB25,5-380P14	35,0kVar / 480VAC	3R	28,07	4DB28,0-380P7	35,0kVar / 440VAC	2x3
27,33	4DB27,3-380P14	37,5kVar / 480VAC	2x3	30,08	4DB30,0-380P7	37,5kVar / 440VAC	2x3
29,15	4DB29,1-380P14	40,0kVar / 480VAC	2x3	32,08	4DB32,0-380P7	40,0kVar / 440VAC	2x3
30,97	4DB30,9-380P14	42,5kVar / 480VAC	2x3	34,09	4DB34,0-380P7	42,5kVar / 440VAC	2x3R
32,79	4DB32,7-380P14	45,0kVar / 480VAC	2x3R	36,09	4DB36,0-380P7	45,0kVar / 440VAC	2x3R
34,61	4DB34,6-380P14	47,5kVar / 480VAC	2x3R	38,10	4DB38,0-380P7	47,5kVar / 440VAC	2x3R
36,44	4DB36,4-380P14	50,0kVar / 480VAC	2x3R	40,11	4DB40,0-380P7	50,0kVar / 440VAC	2x3R
38,26	4DB38,2-380P14	52,5kVar / 480VAC	2x3R	42,12	4DB42,0-380P7	52,5kVar / 440VAC	2x3R
40,08	4DB40,0-380P14	55,0kVar / 480VAC	2x3R	44,13	4DB44,0-380P7	55,0kVar / 440VAC	2x3R
41,90	4DB41,9-380P14	57,5kVar / 480VAC	2x3R	46,14	4DB46,0-380P7	57,5kVar / 440VAC	2x3R
43,72	4DB43,7-380P14	60,0kVar / 480VAC	2x3R	48,15	4DB48,0-380P7	60,0kVar / 440VAC	2x3R
45,54	4DB45,5-380P14	62,5kVar / 480VAC	2x3R				
47,37	4DB47,3-380P14	65,0kVar / 480VAC	2x3R				
49,19	4DB49,1-380P14	67,5kVar / 480VAC	2x3R				
51,01	4DB51,0-380P14	70,0kVar / 480VAC	2x3R				

Fuente: SIEMENS (2016)

Según la figura, siguiendo este catálogo, es posible determinar qué condensador se conectará en serie a la reactancia de desajuste, mediante la potencia efectiva en kVar, facilitando los cálculos y dimensionamiento de la batería de condensadores sintonizados.

En cuanto a las características comerciales, la empresa SIEMENS (2016) dice que,

El inductor de bloqueo trifásico de Siemens tiene una forma constructiva innovadora que evita que la inductancia de una fase influya en las demás. Su núcleo está hecho de láminas de acero al silicio de alta permeabilidad, lo que reduce las pérdidas y la temperatura de funcionamiento. El sistema de soldadura del núcleo garantiza un funcionamiento sin ruidos ni vibraciones. Tiene un tamaño compacto que facilita la instalación y el mantenimiento.

Otra alternativa comercial para la obtención de reactores de desajuste la ofrece la empresa WEG (2020), “El uso de un reactor de desajuste adecuado elimina el riesgo de resonancia y evita la reducción de la vida útil del condensador, ya que el reactor funciona como un bloqueador de corriente armónica para el condensador”.

La Figura 6 muestra el reactor de desajuste WEG DRW7-0.86V49.

Figura 6. Reactor de desactivación



Fuente: Weg 2020

Según la figura, “Los reactores de desintegración DRW están fabricados con una placa especial de acero al silicio, que garantiza excelentes propiedades magnéticas en todas las direcciones. Todos los reactores están impregnados al vacío, lo que garantiza un bajo nivel de ruido y una larga vida útil”. WEG (2020).

Además, otra alternativa comercial para suplir la necesidad de corrección reactiva en presencia de frecuencias armónicas, son los bancos de condensadores sintonizados.

Según la empresa SETTA ENERGY (2017), “El banco de condensadores automático (para sistemas de baja tensión)

corrige el factor de potencia (nacional o importado) en sistemas eléctricos con alto contenido de armónicos”.

La Figura 7 muestra el banco de condensadores sintonizados, ofrecido por la empresa Setta Energy.

Figura 7. Banco de capacitores sintonizados



Fuente: Setta Energy (2017)

Según la figura, la empresa Electric Service (2020), señala que las baterías de condensadores sintonizados se utilizan para evitar la resonancia de la batería de condensadores con el sistema eléctrico, además de reducir las distorsiones armónicas en la red, evitar la quema de materiales y aumentar la vida de todo el sistema.

Para una mejor comprensión del tema, se recomienda utilizar un software informático, que ayuda a comprender y permite la simulación de bancos de condensadores sintonizados, en perfecto estado de funcionamiento.

2.6 POWERSIM

El programa informático elegido es Psim (Powersim), de la empresa Powersim Inc., ya que presenta simulaciones rápidas y de gran precisión.

Para una mejor descripción del software, Gomes et al. (2014, p. 13) dice que,

PSIM es un programa de simulación fácil de usar cuyo análisis de forma de onda es similar a la pantalla de un osciloscopio. Este programa tiene un gran potencial para el análisis de convertidores de potencia, lazos de control y estudio de accionamientos de motores. Además, el simulador se puede utilizar en prácticamente todo tipo de circuitos, ya sean digitales o analógicos.

Según SANTOS (2019, p. 53), “Una ventaja de este simulador es la gran diversidad de elementos presentes en su biblioteca, lo que permite una mayor fidelidad entre los resultados obtenidos en las simulaciones, con la realidad”.

Según Assis (2018, p. 22), el software Psim fue desarrollado para aplicaciones en sistemas de electrónica de energía y potencia, con una velocidad de simulación rápida y comandos simplificados, el programa es adecuado para su uso por usuarios principiantes, incluso usuarios más avanzado, permitiendo simulaciones básicas o más complejas.

En el presente trabajo, Psim asiste en la interpretación del tema y en la recolección de información sobre la carga simulada, permitiendo la obtención de datos y conclusiones sobre la simulación presentada.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Utilizando el software Psim, fue posible desarrollar simulaciones sobre el tema y demostrar la importancia del análisis en profundidad de las cargas reactivas y la influencia de los armónicos en un entorno industrial.

Las simulaciones se realizaron representando el motor W22 IR4 Super Premium de 100 CV, de la empresa WEG.

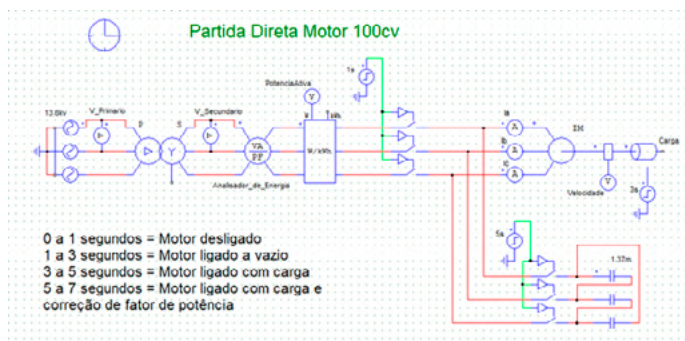
3.1 PRIMERA SIMULACIÓN: ARRANQUE DIRECTO

La primera simulación se realizó con el fin de arrancar un motor trifásico con 100 caballos de fuerza, y analizar resultados como: voltaje nominal, velocidad nominal, factor de potencia y distorsiones armónicas, para luego calcular los capacitores necesarios para realizar la corrección reactiva.

La simulación se dividió en cuatro pasos de tiempo, de cero a un segundo, el sistema estaba energizado, pero el motor estaba apagado. De uno a tres segundos se pone en marcha el motor, pero sin carga, es decir, vacío. De tres a cinco segundos se activa la carga mecánica, simulando el funcionamiento del motor a plena carga. Finalmente, de cinco a siete segundos, se activa la compensación reactiva, con los condensadores corrigiendo el factor de potencia.

La figura 8 muestra la primera simulación realizada.

Figura 8. Motor de arranque directo de 100 CV

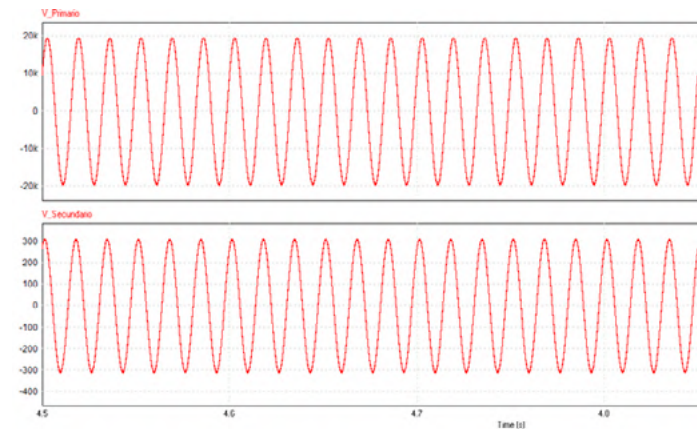


Fuente: Autor (2020)

La simulación que se muestra en la Figura 8, utiliza un transformador Delta - Star, para bajar el voltaje de 13800 Voltios al voltaje nominal de 220 Voltios, permitiendo que el motor funcione a plena carga y a una velocidad nominal de 1785 revoluciones por minuto.

La Figura 9 presenta el gráfico de las formas de onda del voltaje primario y secundario en Voltios, por tiempo en segundos.

Figura 9. Tensión primaria y secundaria

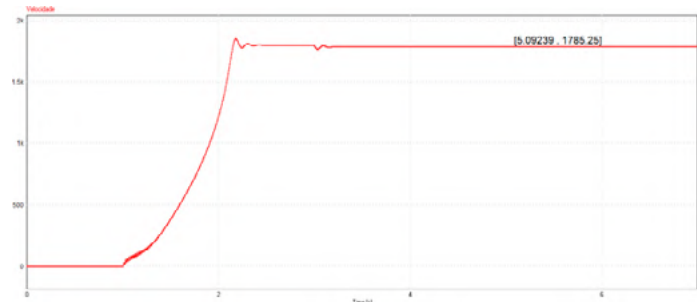


Fuente: Autor (2020)

Según la figura, la tensión primaria, representada por “V_Primário”, tenía un valor de 19500 Voltios pico a pico, es decir, aproximadamente 13800 Voltios en valor efectivo. La tensión secundaria, representada por “V_Secundário”, tenía un valor de 310 Voltios pico a pico, es decir, aproximadamente 220 Voltios en valor efectivo.

La Figura 10 muestra el gráfico de la forma de onda de la velocidad del motor, por tiempo en segundos.

Figura 10. Velocidad del motor



Fuente: Autor (2020)

Según la figura, el régimen del motor a carga nominal, de tres a siete segundos, tuvo un valor de 1785 revoluciones por minuto, es decir, su valor nominal.

Para analizar el factor de potencia se utilizó un componente del propio Psim, denominado “Energy Analyzer”, representado en la Figura 8.

Según este componente, el factor de potencia tuvo grandes fluctuaciones entre cero y tres segundos, ya que el motor estaba apagado o vacío. A plena carga, de tres a

cinco segundos, el factor de potencia presentado fue de 0,84. Demostrando la necesidad de realizar compensación reactiva.

Para calcular los condensadores necesarios para realizar la compensación reactiva, es necesario conocer la potencia activa del sistema. Para ello se utilizó el propio componente de Psim denominado “Wattmetro”, representado en la figura 8.

Según “Wattmetro”, la potencia activa del sistema, a carga nominal, fue de aproximadamente 76500 Watts. La ecuación 10 expresa matemáticamente el cálculo necesario para dimensionar la potencia reactiva del sistema.

$$Q = \frac{P}{FP} * \text{Sen} * (\cos - 1(FP))$$

10

Dónde:

Q = Potencia reactiva

P = potencia activa

FP = Factor de potencia

La potencia reactiva calculada mediante la ecuación 10, referida al sistema con un motor a plena carga, es decir, con un factor de potencia de 0,84 fue de aproximadamente 50000Var. La potencia reactiva deseada, es decir, con un factor de potencia de 0,92, fue de aproximadamente 30000Var. Restando los dos valores calculados, es posible obtener el valor de los condensadores que se utilizarán para la corrección reactiva, aproximadamente 20000Var. Para un mejor resultado, se consideró una potencia reactiva de 25000Var.

La ecuación 11 expresa matemáticamente el cálculo necesario para dimensionar los condensadores en Faraday.

$$C = \frac{Q_{\text{capacitor}}}{2\pi * f * V^2}$$

11

Dónde:

C = Capacitancia en Faraday

$Q_{\text{capacitor}}$ = Potencia reactiva capacitiva

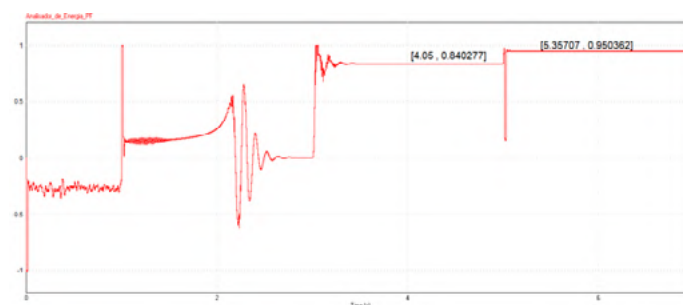
f = Frecuencia en Hertz

V = Voltaje nominal en voltios

El condensador calculado con la ecuación 11 fue de 1,37 mF.

La Figura 11 muestra el gráfico de la forma de onda del factor de potencia antes y después de la corrección reactiva.

Figura 11. Factor de potencia



Fuente: Autor (2020)

Según la figura, el factor de potencia calculado con el motor a plena carga, de tres a cinco segundos, fue de 0,84. El factor de potencia calculado después de la corrección reactiva proporcionada por los condensadores fue de 0,95. Cumplimiento del valor límite de las reglas de la ANEEL.

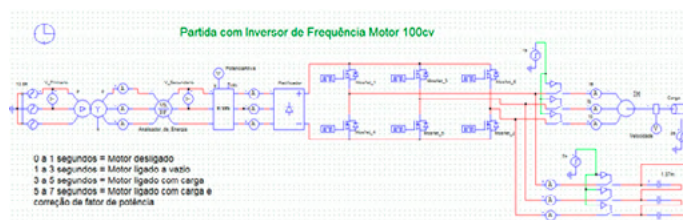
Como el método de accionar el motor para la primera simulación era el arranque directo, el sistema no tenía cargas no lineales, por lo que las distorsiones armónicas permanecieron nulas. Para analizar la influencia de las distorsiones armónicas, se realizó la segunda simulación.

3.2 SEGUNDA SIMULACIÓN: COMIENZE CON EL CONVERTIDOR DE FRECUENCIA

Para la segunda simulación, se cambió el método de arranque del motor. Para generar armónicos significativos para estudio y análisis, es necesario presentar alguna carga no lineal en la simulación, por lo que se agregó al sistema un rectificador trifásico para alimentar un convertidor de frecuencia, encargado de accionar el mismo motor presente en la simulación 1.

La Figura 12 muestra la segunda simulación realizada.

Figura 12. Arranque del convertidor de frecuencia

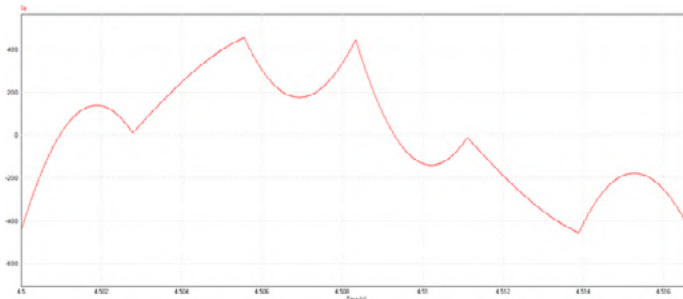


Fuente: Autor (2020)

Los mismos parámetros de tensión nominal primaria, tensión nominal secundaria y velocidad nominal se mantuvieron de acuerdo con la simulación 1. Sin embargo, al analizar el factor de potencia, se observaron cambios en su forma de onda.

Como resultado de la presencia de distorsiones armónicas, las corrientes mostraron un estado de resonancia, cambiando sus formas de onda y deteriorando la calidad del sistema eléctrico.

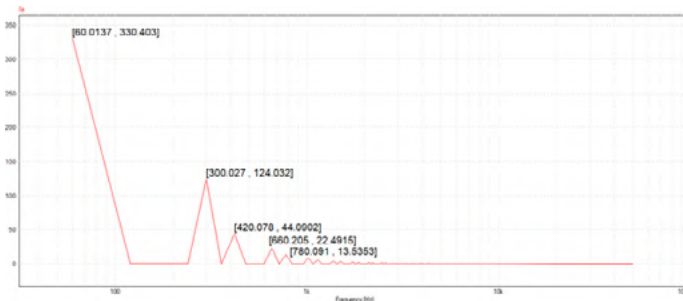
La Figura 13 muestra la forma de onda distorsionada de la corriente en relación con la fase A.

Figura 13. Corriente fase A

Fuente: Autor (2020)

La forma de onda se midió con el componente amperímetro "Ia" ubicado en la entrada del motor, presente en la propia Psim, que se muestra en la Figura 12. La forma de onda de la corriente A está relacionada con un ciclo de onda y presenta distorsiones por armónicos.

La Figura 14 muestra las distorsiones armónicas medidas en el mismo ciclo de onda.

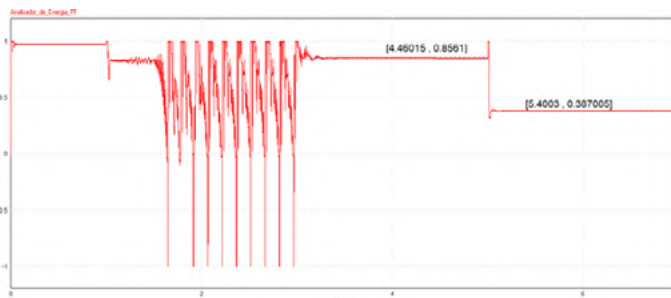
Figura 14. Distorsiones armónicas

Fuente: Autor (2020)

Según la figura, un ciclo de onda de la corriente A, además de la frecuencia fundamental de 60 Hz, tiene distorsiones armónicas de quinto orden con 300 Hz, séptimo orden con 420 Hz, undécimo orden con 660 Hz, decimotercer orden con 780 Hz, entre otros menos expresivos.

Como efecto de estas distorsiones armónicas presentadas, los condensadores calculados no fueron suficientes para corregir el factor de potencia del sistema, provocando un entorno eléctrico ineficiente.

La Figura 15 muestra la forma de onda del factor de potencia.

Figura 15. Factor de potencia distorsionado

Fuente: Autor (2020)

Según la figura, el factor de potencia presentado con el motor a plena carga, es decir, de tres a cinco segundos, fue de 0,85. Luego de la entrada del banco de capacitores, luego de cinco segundos, el mismo factor de potencia disminuyó significativamente, midiéndose en 0.38. Valor extremadamente por debajo de lo permitido por la norma ANEEL, y nocivo para el sistema eléctrico.

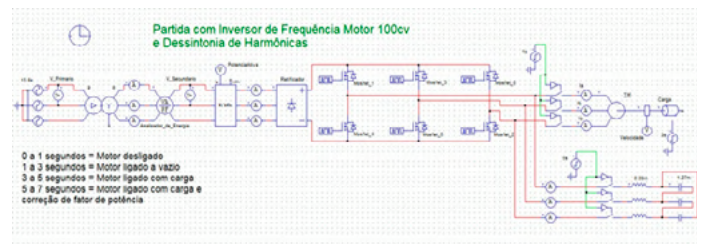
Para solucionar el problema, es necesario agregar algún método al sistema eléctrico para mitigar los efectos adversos de las perturbaciones armónicas, provocadas por la inserción de cargas no lineales.

La solución elegida fue la inserción, junto a la batería de condensadores, de un reactor de desintegración, elemento específico para la corrección de perturbaciones armónicas, presentado en la tercera simulación.

3.3 TERCERA SIMULACIÓN: COMIENCE CON INVERSOR DE FRECUENCIA Y AJUSTE ARMÓNICO

Para realizar la tercera simulación se utilizó el mismo sistema que la segunda simulación, con la adición del reactor de desincronización, representado por el componente inductivo "L1" presente en el propio Psim, mostrado en la figura 16.

La Figura 16 muestra la tercera simulación realizada.

Figura 16. Comience con convertidor de frecuencia y sintonización armónica

Fuente: Autor (2020)

Según la figura, los mismos parámetros nominales medidos en la primera simulación, se presentaron en la tercera simulación. Y el impedimento para la no corrección del factor de potencia, presentado en la segunda simulación, se corrigió agregando el reactor de reducción y cambiando el valor de la capacitancia requerida para la corrección reactiva.

El reactor de sintonización elegido tiene un factor de sintonía del 7%, debido a que en la segunda simulación se midieron armónicos a partir de su 5° orden.

Para calcular la inductancia esencial para el reactor de desincronización, se utilizaron los datos de impedancia equivalente, impedancia capacitiva e impedancia inductiva, calculados respectivamente por las ecuaciones 12, 13 y 14.

$$X_{EQ} = \frac{V^2}{Q_{capacitor}}$$

12

Dónde:

XEQ = impedancia equivalente

V = voltaje nominal

Q = Potencia reactiva capacitiva

El valor obtenido por la ecuación 12 fue $XEQ = 1.936\Omega$.

$$XC = \frac{XEQ}{0,93}$$

13

Dónde:

XC = impedancia capacitiva

XEQ = Inductancia equivalente

El valor obtenido por la ecuación 13 fue $XC = 2.08\Omega$.

$$XL = XC * p\%$$

14

Dónde:

XL = impedancia inductiva

$p\%$ = Factor de desintegración

El valor obtenido por la ecuación 14 fue $XL = 0.1456\Omega$.

Con los valores de impedancia equivalente, impedancia capacitiva e impedancia inductiva obtenidos, es posible calcular el valor de inductancia requerido para el reactor.

La ecuación 15 expresa matemáticamente el cálculo necesario para dimensionar el reactor de desmontaje.

$$L = \frac{XL}{2\pi * f}$$

15

Dónde:

L = Inductancia en Henry

XL = impedancia inductiva

f = Frecuencia nominal

El valor obtenido por la ecuación 15, que representa el valor del reactor de desincronización, fue $L = 0,39$ mH.

Como la inserción del reactor distónico altera la impedancia capacitiva, como se muestra en la ecuación 13, el valor del capacitor para la corrección reactiva también debe cambiarse.

La ecuación 16 expresa matemáticamente el cálculo necesario para dimensionar el nuevo condensador trifásico para corregir el factor de potencia.

$$C = \frac{1}{2\pi * f * XC}$$

16

Dónde:

C = Capacitancia de Faradios

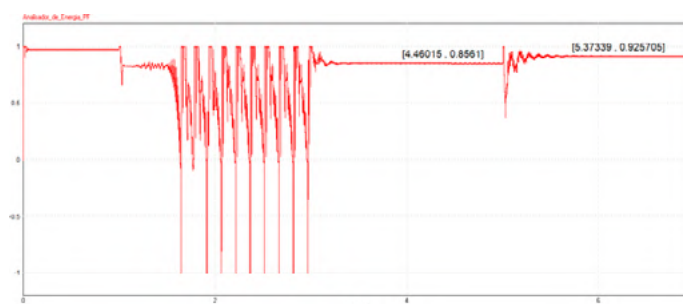
XC = impedancia capacitiva

f = Frecuencia nominal

El valor obtenido por la ecuación 15 fue $C = 1,27$ mF.

La Figura 17 representa la nueva forma de onda de la corrección del factor de potencia, con un reactor de disonancia armónica.

Figura 17. Factor de potencia ajustado



Fuente: Autor (2020)

Según la figura, el factor de potencia con el motor a plena carga, de tres a cinco segundos, siguió midiendo 0,85. Inmediatamente después de la entrada del capacitor para la corrección reactiva, después de cinco segundos, el factor de potencia comenzó a medir 0.92. Valor permitido por la norma ANEEL, y que garantiza el buen funcionamiento y eficiencia del sistema eléctrico simulado.

4. CONSIDERACIONES FINALES

Luego de la realización de los tres sistemas simulados, es posible afirmar que la influencia de las distorsiones armónicas en una planta industrial es un tema a ser siempre analizado por ingenieros y gerentes, especialmente cuando ocurren cargas no lineales, disparando motores eléctricos, o cualquier otra funcionalidad dentro de un sistema. En estos casos, el uso del reactor de desincronización se ha vuelto imprescindible para el funcionamiento eficaz de un entorno industrial, ya que este componente garantiza la eficiencia energética, asegura la protección y buen funcionamiento de todo el sistema eléctrico, y además ayuda a controlar los costes, evitando posibles multas impuestas por las empresas eléctricas.



REFERENCIAS



- ALEXANDER, CK; SADIKU, MNO Fundamentos de circuitos eléctricos. 5ª ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.
- ANDRADE, MCD Corrección del factor de potencia. Revista científica multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Año 03, Ed. 09, Vol. 06, págs. 75-83 de septiembre de 2018.
- ANEEL-AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉCTRICA NÚMERO TÉCNICO 0083, 2012.
- ANEEL-AGÊNCIA NACIONAL DE ELECTRICA EN Resolución Normativa nº 414., 2010.
- ASSIS, JRP Operación de un inversor de voltaje de nueve teclas para operar el sistema fotovoltaico integrado y el compensador en serie. João Pessoa: UFPB, 2018.
- BRAGA, N. Factor de potencia: necesidad de corrección (ART111). 2011. Disponible en: <http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/artigos/54-dicas/819-fator-de-potencia-a-necessidade-da-correcao-art111.html>. Consultado: 5 de mayo de 2020.
- CREDER, H. Instalaciones eléctricas. Río de Janeiro: LTC, 2016.
- DUAILIBE, P. Consultoría para el uso eficiente de la energía. 2000. 36 f. - Educación Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Río de Janeiro, 2000.
- SERVICIO ELECTRICO. Banco de condensadores sintonizado. 2020. Disponible en: <https://electricsservice.com.br/power-quality/banco-dessintonizado/>. Consultado el 8 de junio de 2020.
- FILHO, JM Instalaciones Eléctricas Industriales - 9ª Edición. LTC, 2017.
- FRAGOAS, AG Estudio de caso de uso de baterías de condensadores en una red de distribución primaria. São Carlos: USP, 2008.
- FRANCHI, CM Accionamientos eléctricos. São Paulo: Érica Ltda., 2014.
- GARCIA, FR Armónicos en sistemas eléctricos de potencia. IESA INEPAR, 2000.
- GOMES, ISF et al. PSIM. Ceará: PET - UFC Ingeniería Eléctrica, 2014.
- MARCHI, D. Proyecto y estudio de viabilidad técnica y financiera para la corrección del factor de potencia en la industria textil mediante baterías de condensadores. Florianópolis: UFSC, 2019.
- MINAMIZAKI, GM Mitigación del problema de resonancia armónica de los bancos de capacitores instalados en la red de distribución. Itajubá: UNIFEI, 2011.
- NAKAMURA, RDR Instalación de condensadores de potencia en redes contaminadas por armónicos y con baja potencia de cortocircuito. Belo Horizonte: UFMG, 2011.
- ROCHA, LRR Manual de gestión energética. Companhia Energética de Minas Gerais - Cemig Distribuição, Belo Horizonte, 2011.
- RODRIGUES, FJ Corrección del factor de potencia. Itatiba: USF, 2012.



REFERENCIAS



- SANTOS, LOL Modelado y simulación de un sistema de energía eólica mediante motor síncrono de imanes permanentes. Blumenau: UFSC, 2019.
- SANTOS, PC Compensación reactiva en una industria metalúrgica de la región metropolitana de Curitiba. Curitiba: UTFPR, 2013.
- SCHALLENBERGER, G. y Wolff, J. Corrección del factor de potencia y reducción de la distorsión armónica en una planta industrial mediante un banco de capacitores sintonizados. 2013. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/313537269_Correcao_do_Fator_de_Potencia_e_Reducao_da_Distorcao_Harmonica_em_planta_industrial_por_meio_de_Banco_de_Capacitor_Dessintonizado. Consultado el 7 de junio de 2020.
- SETTA ENERGÍA. Banco de condensadores sintonizado automáticamente. 2017. Disponible en: <http://gruposetta.com.br/banco-de-capacitores-dessintonizados-automatico/>. Consultado el 8 de junio de 2020.
- SIEMENS. Inductor de bloqueo trifásico para batería de condensadores. 2016. Disponible en: <https://docplayer.com.br/10243559-Indutor-de-bloqueio-trifasico-para-banco-de-capacitores.html>. Consultado el 8 de junio de 2020.
- SILVA, MCI Corrección del factor de potencia de cargas industriales con dinámica rápida. Belo Horizonte: UFMG, 2009.
- SP Trafo. Reactor de disfunción trifásico de bloqueo armónico. 2015. Disponible en: <http://sptrafotransformadores.com.br/reator-de-dessintonia-trifasico-bloqueador-de-harmonicas.html>. Consultado el 7 de junio de 2020.
- TAMIETTI, RP Compensación reactiva y corrección del factor de potencia: una visión de la ingeniería de proyectos. Belo Horizonte, MG: Engweb, 2007.
- VIEIRA, FP Instrumento microprocesado para medir potencia activa, reactiva y factor de potencia. São Carlos: USP, 2008.
- VER TECNOLOGÍA. Relé supervisor de coseno ϕ Altronic. 2019. Disponible en: <https://blog.viewtech.ind.br/2019/07/31/rele-supervisor-de-cosseno-%CF%86-altronic/>. Consultado el 2 de abril de 2020.
- WEG. Condensadores para corrección del factor de potencia. 2020. 44f. Disponible en: [https://www.weg.net/catalog/weg/BR/en/Automa%C3%A7%C3%A3o-e-Controle-Industrial/Controles/Condensadores-y-Ejecutar%C3%A7%C3%A3o-de-Pot-Factor%C3%A7%C3%A3o-de-Pot-Factor](https://www.weg.net/catalog/weg/BR/en/Automa%C3%A7%C3%A3o-e-Controle-Industrial/Controles/Condensadores-y-Ejecutar%C3%A7%C3%A3o-de-Pot-Factor%C3%A7%C3%A3o-de-Pot-Factor%C3%A7%C3%A3o-de-Pot-Factor%C3%A7%C3%A3o-de-Pot-Factor). Consultado el 8 de junio de 2020.
- WEG. Manual de corrección del factor de potencia. 2009. 40 f. Disponible en: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hea/h8b/WEG-correcao-do-fator-de-potencia-958-manual-portugues-br.pdf>. Consultado el 16 de abril de 2020.
- WEG. W22 IR4 Super Premium 100 CV. 2020. Disponible en: <https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Motores-El%C3%A9tricos/Trif%C3%A1sico---Baixa-Tens%C3%A3o/Uso-Geral/W22/W22-IR4-Super-Premium/W22-IR4-Super-Premium-100-cv-4P-250S-M-3F-220-380-V-60-Hz-IC411---TFVE---B14D/p/13061469>. Consultado el 28 de octubre de 2020.