

# A IMPORTÂNCIA DA UTILIZAÇÃO DE FILTROS DE DESSINTONIA NA CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA EM REDES COM CARGAS NÃO LINEARES: UMA INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL

Monitchelie D. Braz Weege\*  
Luis Sergio Barros Marques\*\*  
Janderson Duarte\*\*\*

## RESUMO

A qualidade da energia elétrica é uma questão crucial na geração, distribuição e consumo final, o que exige a manutenção do fator de potência em níveis adequados para minimizar perdas e prolongar a vida útil de equipamentos e instalações. O aumento de cargas não lineares, tanto industriais quanto residenciais, impacta negativamente a qualidade da energia fornecida ao consumidor. Os harmônicos resultantes dessas cargas afetam equipamentos elétricos, especialmente bancos de capacitores, causando sobrecarga, ressonância e amplificação de distorções harmônicas. Para mitigar esses problemas, a instalação de reatores de dessintonia é proposta, assegurando o funcionamento correto dos bancos de capacitores e mantendo a qualidade da energia. Este estudo analisa a eficácia desses reatores na correção do fator de potência em redes elétricas com presença de harmônicos, abordando teoricamente o fator de potência, distorção harmônica, ressonância e características dos reatores de dessintonia. Além disso, propõe uma investigação prática em uma bancada, visando oferecer e validar uma solução eficaz para este problema.

**Palavras-chave:** correção do fator de potência, distorção harmônica, filtro de dessintonia.

## ABSTRACT

The quality of electrical energy is a crucial issue in generation, distribution, and final consumption, requiring the maintenance of the power factor at adequate levels to minimize losses and extend the lifespan of equipment and installations. The increase in nonlinear loads, both industrial and residential, negatively impacts the quality of energy supplied to the consumer. The harmonics resulting from these loads affect electrical equipment, especially capacitor banks, causing overload, resonance, and amplification of harmonic distortions. To mitigate these problems, the installation of detuning reactors is proposed, ensuring the proper functioning of capacitor banks and maintaining energy quality. This study analyzes the effectiveness of these reactors in correcting the power factor in electrical networks with the presence of harmonics, theoretically addressing the power factor, harmonic distortion, resonance, and characteristics of detuning reactors. Additionally, it proposes a practical investigation on a test bench aiming to offer and validate an effective solution to this problem.

**Keywords:** power factor correction, harmonic distortion, de-tuning filter.

---

\* Aluna do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Santa Catarina. E-mail: [monitchelie@gmail.com](mailto:monitchelie@gmail.com).

\*\* Orientador - professor do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Santa Catarina. E-mail: [luisbm@ifsc.edu.br](mailto:luisbm@ifsc.edu.br)

\*\*\* Coorientador - professor do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Santa Catarina. E-mail: [janderson.duarte@ifsc.edu.br](mailto:janderson.duarte@ifsc.edu.br)

## 1 INTRODUÇÃO

A qualidade de energia é hoje um tema importante na geração de energia elétrica, distribuição e consumo final. Para Resende e Paulillo (2013) é importante manter o fator de potência do sistema em níveis adequados, para evitar perdas e garantir a qualidade de energia, o que contribui para o aumento da vida útil das instalações e equipamentos. Kassick (2004) ressalta que o aumento de cargas não lineares, como conversores de potência, equipamentos eletrônicos, tanto na indústria, quanto em aplicações residenciais tem impactos diretos na qualidade do fornecimento de energia à sociedade devido aos impactos gerados no sistema elétrico.

Distúrbios harmônicos gerados pelas cargas não lineares têm um efeito negativo sobre equipamentos elétricos, como por exemplo bancos de capacitores. Sobrecarga por conta da potência reativa, ressonância e amplificação dos níveis de distorção harmônica são algumas das implicações sobre os bancos de capacitores apresentados por Arrillaga e Watson (2003). Como a correção de fator de potência com capacitores é muito comum na indústria, é necessário que outros equipamentos sejam adicionados ao circuito a fim de atenuar as consequências das harmônicas sobre os capacitores e os efeitos das interações entre estes e o sistema como um todo. Dessa forma, Pereta, Landim e Nogueira (2007) defendem a instalação de reatores de dessintonia para assegurar o correto funcionamento dos bancos de capacitores e permitir que a qualidade de energia possa ser mantida em níveis aceitáveis.

Visando abordar a problemática sobre qual o impacto da presença de cargas não lineares nas redes elétricas e como os filtros de dessintonia podem ser aplicados para mitigar esse impacto, esse trabalho justifica-se por abordar a eficácia da aplicação de reatores de dessintonia como uma solução para reduzir os impactos das cargas não lineares na correção do fator de potência com capacitores.

O objetivo desse trabalho é analisar a importância e eficácia dos filtros de dessintonia na correção do fator de potência em redes com harmônicos. Especificamente, estudar os efeitos das cargas não lineares, os desafios na correção do fator de potência com bancos de capacitores, as características dos reatores para prevenir ressonância, a metodologia de projeto desses reatores e, finalmente, montar um sistema em bancada para testar a eficácia da combinação de reator de dessintonia e capacitor na correção do fator de potência.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão definidos alguns termos utilizados ao longo do trabalho como: fator de potência, distorção harmônica, ressonância e reatores de dessintonia. O objetivo dessa análise é apresentar uma visão geral sobre o assunto, a fim de contextualizar teoricamente o trabalho e desenvolver uma estrutura conceitual sólida para a pesquisa.

### 2.1 FATOR DE DESLOCAMENTO E FATOR DE POTÊNCIA

De acordo com Mamede (2001), o fator de potência é um valor adimensional adquirido de forma matemática e definida como a relação entre os valores de potência ativa e potência aparente. Ele indica o nível de eficiência da utilização de energia elétrica, sendo um fator de potência unitário indicativo para um bom aproveitamento da energia e o baixo fator de potência um nível indesejado de aproveitamento da energia.

Existem diferentes tipos de cargas presentes nas instalações elétricas e quando conectadas em um mesmo barramento, interagem entre si. Dependendo da resposta à tensão dessas cargas, elas podem ser denominadas lineares ou não-lineares. Kassick (2004) explica que resistores, indutores e capacitores quando submetidos a uma tensão senoidal pura geram correntes de amplitude proporcional à tensão. Cargas com essa característica são chamadas de cargas lineares. Da mesma maneira, Kneschke (1999) apresenta as cargas não-lineares como sendo aquelas que não geram correntes proporcionais à tensão aplicada. Nesse caso, o resultado será uma onda não senoidal.

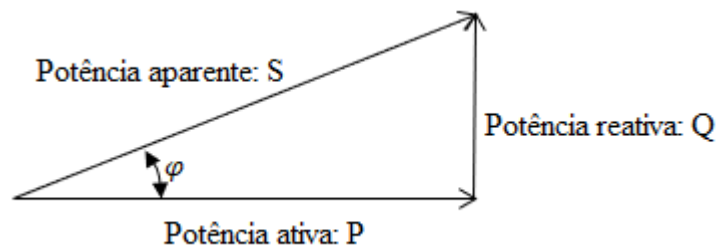
A potência total demanda pelo sistema depende dos efeitos causados pela interação de cargas lineares e não lineares conectadas ao mesmo ponto. Como explicado por Durgan et al. (2004), há uma conexão entre a potência que é efetivamente convertida em trabalho (potência ativa) e a capacidade máxima de potência demandada pelo sistema (potência aparente). Quando ambas possuem componente somente na frequência fundamental, ou seja, sem levar em conta a distorção harmônica, o fator de potência é dado pelo cosseno do ângulo de fase entre a tensão e a corrente. Nessa condição, o fator de potência é conhecido como fator de deslocamento  $FD$  e pode ser expresso por

$$FD = \frac{P}{S} = \cos \varphi \quad (1)$$

onde,  $P$  = potência ativa (W),  $S$  = potência aparente (VA) e  $\cos \varphi$  = ângulo de fase entre a tensão e a corrente.

Essa relação pode ser representada através do triângulo de potências, amplamente citado na literatura e apresentado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Figura 1 - Triângulo de potências



Fonte: a autora (2024).

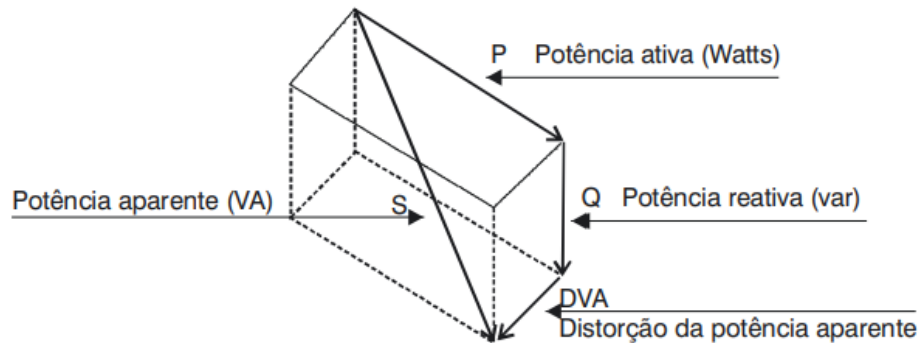
Quando se fala de fator de deslocamento, não são considerados os ângulos entre corrente e tensão de frequências diferentes da fundamental e nem possíveis componentes em corrente contínua.

Quando o circuito possui cargas não lineares, como conversores de frequências e equipamentos eletrônicos, são adicionadas componentes ao circuito que resultam em perdas para o sistema. Como apresentado por Durgan et al. (2004), o fator de potência real de um circuito deve ser calculado levando em conta a onda distorcida gerada pelas diferentes frequências, de diferentes amplitudes, presentes no circuito. Arrillaga e Watson (2003) apresenta o surgimento de uma nova dimensão no conhecido triângulo de potências, onde a potência aparente do circuito é movida pela interferência da distorção em tensão e corrente causada pelas cargas não lineares. Essa nova dimensão é definida pelo autor como potência de distorção  $D$  sendo representada agora no paralelepípedo de potências, conforme apresentado na Figura 2. Desse modo, o fator de potência passa a ser calculado da seguinte forma:

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (2)$$

na qual,  $FP$  = fator de potência,  $P$  = potência ativa total (W),  $Q$  = potência reativa total (VAr),  $S$  = potência aparente total (VA) e  $D$  = potência de distorção total (VA).

Figura 2 - Paralelepípedo de potências.



Fonte: WEG Automação S.A (2009, p.14).

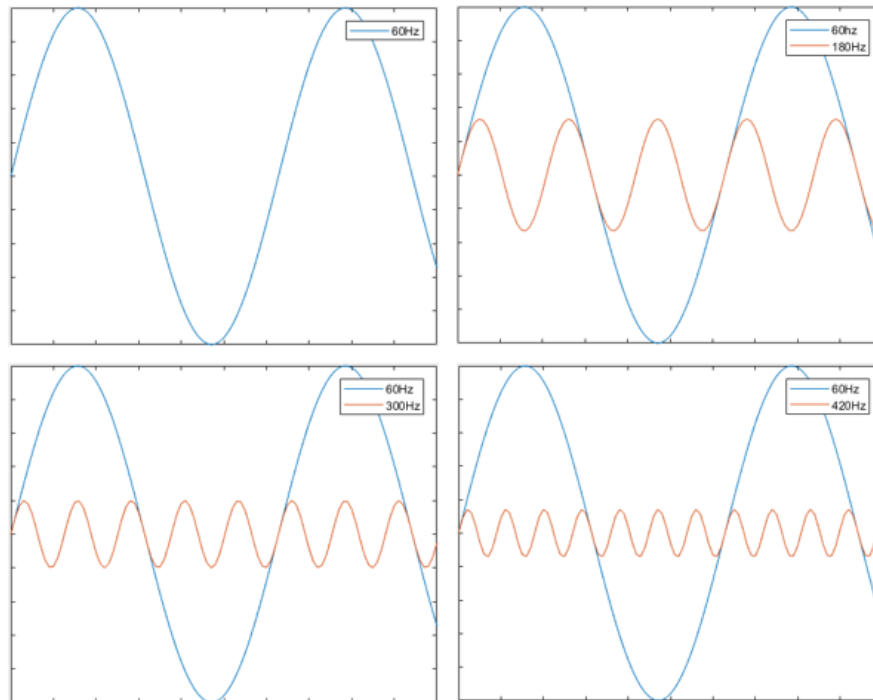
Desconsiderar a presença de harmônicas na rede pode vir a gerar a falsa impressão de um fator de potência satisfatório, pois a presença de harmônicos na rede irá alterar as expressões da potência aparente e real do sistema, como explicado por Masoum e Fuchs (2015).

## 2.2 DISTORÇÃO HARMÔNICA

As redes elétricas deveriam entregar a todos os consumidores uma senoide pura de tensão e corrente. No entanto, conforme citado por La Rosa (2006), a evolução tecnológica aumentou a presença de equipamentos eletrônicos no meio industrial e residencial, que devido às suas características de funcionamento, demandam da rede uma corrente não senoidal, afetando também a forma de onda da tensão. Essa forma de onda não senoidal é devida à presença de harmônicos e comumente conhecida como distorção harmônica.

As harmônicas são componentes presentes em uma forma de onda distorcida que quando decomposta apresenta senoides com frequências diferentes da fundamental. O teorema de Fourier, conforme apresentado por Oppenheim e Willsky (1997), define que qualquer função periódica com frequência fundamental  $\omega_0$  e período  $T = \frac{2\pi}{\omega_0}$  pode ser representada por uma série de infinitas senoides com a frequência igual ou múltipla de sua fundamental. Ou seja, uma harmônica é definida como sendo uma componente com frequência múltipla (ordem da harmônica, conhecida como  $n$ ) da frequência fundamental, por exemplo, se a frequência fundamental é 60 Hz, então a terceira é 180 Hz, a quinta harmônica é 300Hz etc, conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3 – Harmônicas.



Fonte: a autora (2024).

Masoum e Fuchs (2015) destacam que a presença de distorção harmônica na rede faz com que uma parcela da energia útil seja convertida em energia de alta frequência. O Autor ainda explica que essa energia é desnecessária para diversos equipamentos e acaba sendo dissipada somente em forma de calor, diminuindo também o fator de potência do sistema.

Conforme apresentado por Durgan et al. (2004), as correntes harmônicas interagem de forma negativa com uma gama de equipamentos instalados no sistema. Os equipamentos que são mais prejudicados nessa condição são os capacitores, motores e transformadores, onde é possível notar um aumento das perdas, superaquecimento e sobrecarga. Além disso, Durgan et al. (2004) destaca que as harmônicas causam interferências em sistemas de telecomunicações e também são responsáveis por falhas em sistemas de medição. Logo, a presença de conteúdo harmônico na rede deve ser controlada e mantida nos menores níveis possíveis, pois quanto maior os distúrbios presentes na rede, maiores são os prejuízos para o sistema elétrico como um todo.

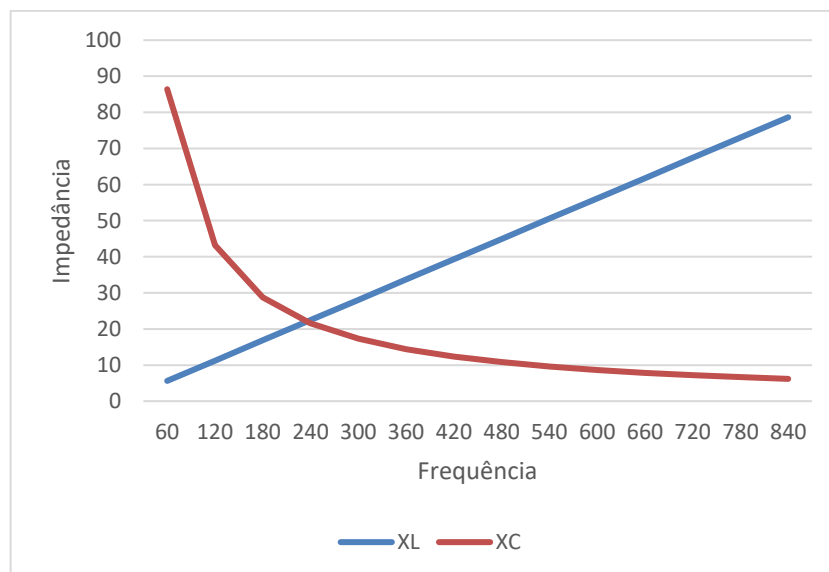
### 2.3 RESSONÂNCIA

Capacitores e indutores são espelhados em relação às suas propriedades elétricas. Essa simetria é evidente ao se analisar as impedâncias de ambos. Conforme apresentado por Nilsson

e Riedel (2014), nos capacitores, a corrente elétrica está adiantada em  $90^\circ$  em relação à tensão, enquanto nos indutores a corrente está atrasada em  $90^\circ$ . Isso se reflete também na definição das impedâncias de cada componente elétrico, conforme equações  $Z_C = \frac{1}{2\pi fC}$ ,  $\theta = -90$  e  $Z_L = 2\pi fL$ ,  $\theta = +90^\circ$ . Quando esses elementos são combinados em um circuito, a troca contínua de energia reativa entre o capacitor e o indutor pode levar ao fenômeno da ressonância.

Um circuito ressonante é constituído por elementos resistivos, indutivos e capacitivos cuja resposta se altera em função das variações na frequência. A ressonância em circuitos elétricos se refere a condição em que a reatância indutiva  $X_L = 2\pi fL$  e a reatância capacitiva  $X_C = \frac{1}{2\pi fC}$  são iguais em magnitude. Durgan et al. (2004) explica que enquanto  $X_L$  aumenta proporcionalmente com a frequência,  $X_C$  diminui, conforme Tabela 1. De acordo com Zhang e Zhang (2023), na frequência em que esse fenômeno ocorre, frequência essa conhecida como frequência de ressonância  $f_r$ , a impedância do circuito é substancialmente alterada e a corrente no circuito atinge seus valores máximos ou mínimos. A frequência de ressonância  $f_r$  é definida na literatura como sendo  $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ , dada em Hertz. Sendo assim, a interação entre cargas indutivas, capacitivas e resistivas em um sistema com alta presença de harmônicas pode ocasionar ressonância, podendo ser série ou paralela, dependendo da disposição dos componentes no circuito e da posição da fonte de harmônicas.

Tabela 1 - Comportamento típico de impedâncias.



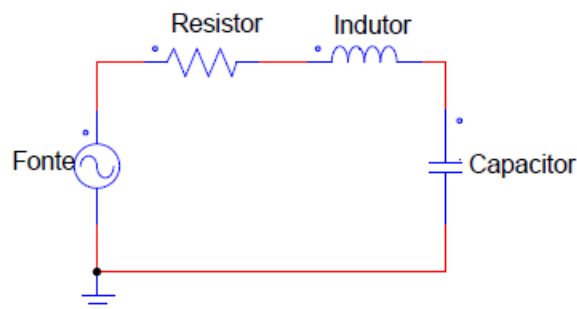
Fonte: a autora (2024).

### 2.3.1 Ressonância série

A ressonância série ocorre quando uma reatância indutiva e uma reatância capacitiva estão conectadas em série no circuito, como mostrado na Figura 4. Em uma frequência específica, a reatância indutiva e a reatância capacitiva do circuito se cancelam, fazendo com que os valores de impedância do circuito atinjam o nível mínimo. Como demonstrado por Sadiku e Alexander (2013), a corrente resultante terá como única limitante a resistência do circuito, ou seja, a impedância do circuito será puramente resistiva. O autor ainda mostra que nessa condição, uma carga LC associada em série terá o comportamento de um curto-circuito enquanto toda tensão aplicada no mesmo estará sobre as componentes resistivas.

Durante a ressonância série a tensão sobre indutor e sobre o capacitor pode ser muito maior que a tensão da fonte. Nilsson e Riedel (2014) explica que quando a impedância total do circuito é baixa, a corrente é máxima, refletindo diretamente na tensão sobre cada um dos componentes. O autor ainda destaca que as correntes sobre cada componente podem ser calculadas como:  $V_L = I \cdot X_L$  e  $V_C = I \cdot X_C$ . Nessa condição as tensões sobre o indutor  $V_L$  e sobre o capacitor  $V_C$  podem ser muito maiores que a tensão da fonte  $V$ . Manipulando essas equações também é possível calcular a corrente em cada componente e perceber que quando a impedância é baixa, a corrente tenderá ao infinito.

Figura 4 - Circuito série.



Fonte: a autora (2024).

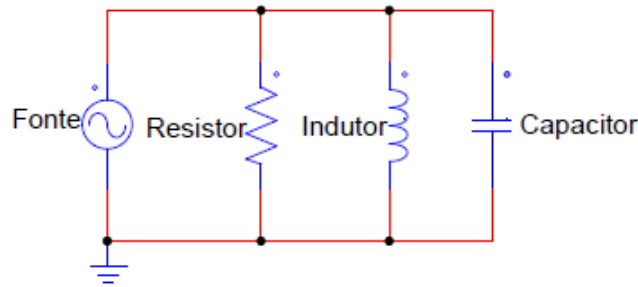
### 2.3.2 Ressonância paralela

Em alguns aspectos a ressonância paralela é exatamente igual a ressonância série. Ambos os circuitos devem conter componentes resistivas, indutivas e capacitivas, assim como ambos são afetados pela variação de frequência, tem um ponto de frequência de ressonância e

possuem um ponto onde a reatância indutiva e capacitiva se cancelam alterando as características de todo circuito.

A ressonância paralela ocorre quando um circuito contém uma reatância indutiva e uma reatância capacitiva conectadas em paralelo, conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 5 - Circuito paralelo.



Fonte: a autora (2024).

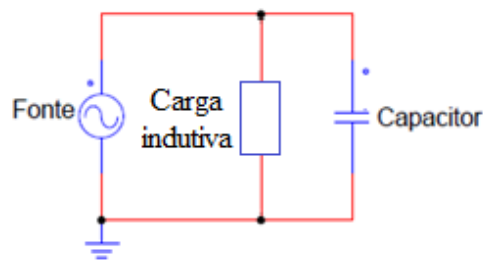
Arrillaga e Watson (2003) explica que a diferença está no fato de um circuito ressonante paralelo ser influenciado pelas correntes que circulam por cada ramo do circuito paralelo formado pelo indutor e capacitor. Para Sadiku e Alexander (2013), em uma condição de ressonância, a associação em paralelo de um indutor com um capacitor funciona como um circuito aberto, o que faz com que a componente resistiva do sistema seja a única limitante da corrente. Masoum e Fuchs (2015) demonstram que a energia armazenada pelo campo magnético do indutor é transferida para o capacitor e do capacitor ela volta para o indutor, fazendo com que a corrente no ramo composto pelo capacitor e pelo indutor seja zero. Dessa forma, as correntes sobre o indutor e o capacitor podem ser muito maiores que a corrente da fonte durante a ressonância.

### 2.3.3 Ressonância em sistemas com capacitores para correção do fator de potência

Um banco de capacitores é comumente utilizado para correção do fator de potência de um sistema pela compensação de reativos, pois as cargas na indústria, de forma geral, são indutivas. Como mencionado por Durgan et al. (2004), quando existem problemas com harmônicas na planta, os primeiros componentes a apresentarem falhas, são os capacitores. A instalação inapropriada de capacitores ou até mesmo seu dimensionamento incorreto podem causar ressonância série e/ou paralela, dependendo de como estiverem instalados.

Giridharan (2015) explica que os capacitores para correção do fator de potência estão sempre conectados em paralelo com a fonte, como mostra a Figura 6, favorecendo as condições de ressonância paralela nesse circuito. O autor ainda explica que quando a ressonância paralela acontece em, ou próximo a, uma harmônica gerada pelas cargas não lineares conectadas ao mesmo sistema haverá uma distorção da tensão e as harmônicas de corrente serão amplificadas. De acordo com Durgan et al. (2004), a corrente harmônica se manifesta de uma maneira diferente, resultando em uma forma de onda composta essencialmente pela 11<sup>a</sup> harmônica do sistema, indicando que o sistema está em ressonância e que há a participação de um banco de capacitores. Ou seja, quando um capacitor é inserido em um sistema sem o devido cuidado, a reatância capacitiva desse elemento pode sintonizar o sistema em uma frequência que acaba surgindo pela presença de cargas não lineares na planta causando diversos contratempos.

Figura 6 - Capacitor em paralelo com a carga indutiva.



Fonte: a autora (2024).

Zhang e Zhang (2023) definem a frequência de ressonância como um parâmetro crítico do sistema que pode ser influenciada por diversos fatores, elementos e condições externas. Sendo assim, controlar e entender esses fatores é essencial para a operação saudável de sistemas propícios à ressonância paralela.

#### 2.4 CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA COM CAPACITORES

Sadiku e Alexander (2013) explicam que a alta demanda por potência reativa indutiva se dá pela presença significativa de cargas indutivas que sobrecarregam o sistema com uma componente de corrente altamente defasada, resultando em um baixo fator de potência. Quando necessário a correção do fator de potência é possível perceber que a única grandeza elétrica que pode ser manipulada é a potência reativa. É possível compensar os reativos presentes na rede e diminuir a potência aparente do sistema, sendo que a potência ativa do sistema não se altera.

Existem diferentes formas de corrigir o fator de potência de um circuito através da adequação de reativos na rede. Conforme apresentado por Deshpande (2015), a melhor forma de compensar os reativos da rede é através da utilização de componentes com comportamento de corrente opostos. Para redes com a presença de reativos indutivos, a utilização de capacitores ainda é a forma mais comum e eficaz.

Uma vez que o comportamento de um capacitor no circuito é contrário ao comportamento de uma carga puramente indutiva, pode se dizer que a energia reativa gerada pela carga indutiva pode ser armazenada nos capacitores até que a carga indutiva demande reativos novamente. Essa energia oscila constantemente entre o capacitor e o indutor, aliviando as cargas nos cabos de alimentação. Em outras palavras, se os capacitores estiverem bem dimensionados é possível alcançar um fator de potência muito próximo ao unitário, fazendo com que não seja necessário que a rede supra os reativos necessários, reduzindo a potência aparente que circula pela rede.

Giridharan (2015) cita os cuidados ao instalar bancos de capacitores para correção do fator de potência em uma instalação com níveis de distorção harmônica elevados. Para o autor, quando os capacitores são instalados sem os devidos cuidados, eles podem auxiliar na diminuição do fator de potência, assim como serem responsáveis por gerar ressonância, amplificando o conteúdo harmônico de tensão e corrente no sistema.

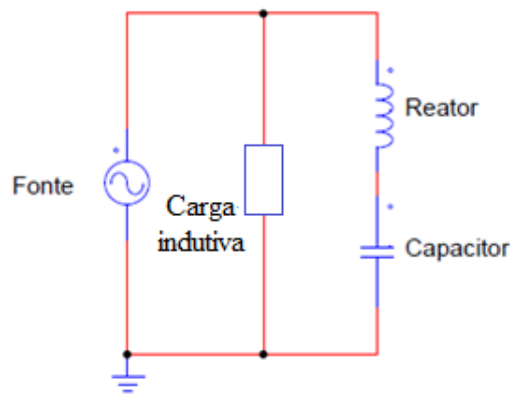
Os capacitores para correção do fator de potência instalados no sistema não geram conteúdo harmônico, pois são componentes lineares, mas La Rosa (2006) traz que a instalação de bancos de capacitores contribui para o aumento da distorção harmônica já existente na rede. O autor também explica que em caso de ressonância há um desencadeamento de correntes e tensões oscilatórias significativas quando a impedância reativa capacitiva se iguala à reatância indutiva do sistema em uma frequência específica. Esse fenômeno geralmente é acentuado nas proximidades da frequência de ressonância e é potencializado quando coincide com uma das harmônicas já presentes na rede. Ou seja, como os capacitores são projetados para suprir a necessidade de reativos na rede considerando somente as características do sistema na frequência fundamental, eles não são capazes de corrigir o fator de potência na presença de harmônicos devido a interação dessas harmônicas com o próprio capacitor, além de que nessa condição poderão amplificar as harmônicas já existente e causar ressonância, afetando todos os elementos conectados no mesmo sistema, inclusive eles próprios.

Mesmo apresentando comportamento crítico para os sistemas com presença de harmônicos, os capacitores para correção do fator de potência ainda são a forma mais comum de compensação de reativos. A instalação segura em sistemas com harmônicos será possível

com a associação de outros componentes no circuito. Esses outros componentes devem ser capazes de alterar as características do sistema que facilitam a condição de ressonância.

La Rosa (2006) traz como uma das sugestões, a instalação de reatores em série com os capacitores, conforme ilustrado na Figura 7. Gumilar et al. (2020) defende que uma reatância instalada em serie com um capacitor pode influenciar os parâmetros do sistema e são essenciais para evitar condições de ressonância causada pela presença de harmônicos no sistema. Essa combinação, para Giridharan (2015), fará com que a frequência de ressonância seja deslocada para um valor abaixo da menor harmônica de corrente do sistema.

Figura 7 - Correção do fator de potência com reator em série com o capacitor.



Fonte: a autora (2024).

## 2.5 FILTROS DE DESSINTONIA

A configuração serie de um capacitor com um indutor é conhecida como capacitor dessintonizado ou filtro de harmônicos, dependendo do proposito e do dimensionamento dos componentes, enquanto somente o reator é chamado de reator de dessintonia. Esses filtros terão uma baixa impedância na frequência de sintonia, por onde toda corrente dessa harmônica será desviada. La Rosa (2006) explica que por esses filtros também serem responsáveis pela compensação de reativos na rede eles podem ser dimensionados tanto para filtragem quanto para correção do fator de potência através da compensação de reativos.

O dimensionamento de um filtro de dessintonia deve levar em consideração vários fatores, como a baixa manutenção desse filtro, economia e confiabilidade. Na maioria dos casos os filtros que precisam ser instalados são simples e atendem de forma satisfatória as necessidades da aplicação. La Rosa (2006) descreve os passos a seguir como básicos para o dimensionamento de um filtro confiável: 1) Calcular o valor da capacitância necessária para

correção do fator de potência do circuito, 2) selecionar o reator de dessintonia que será instalado em série com o capacitor, 3) calcular a tensão sobre os terminais do capacitor com a instalação do reator e a corrente rms eficaz no reator e por último, 4) selecionar os componentes com valores comerciais próximos aos calculados.

Para calcular a capacitância necessária para correção do fator de potência do circuito é necessário saber qual o fator de potência atual do circuito e definir qual o fator de potência que se deseja alcançar. De acordo com a NT-02 da Celesc, o fator de potência referência tem como mínimo permitido o valor de  $FP = 0,92$ . A trigonometria pode ser considerada para a definição da potência reativa capacitiva necessária nesse circuito.

Para selecionar o reator de dessintonia é possível considerar a formula para cálculo da frequência de ressonância,  $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ . Giridharan (2015) diz que a frequência de ressonâncias do circuito serie (capacitor e indutor) é normalmente de 3 à 10% menor que a menor frequência harmônica do circuito. Caso haja medição real do circuito, basta analisar a frequência de menor ordem presente no circuito. Uma vez identificada a harmônica de menor ordem é possível definir a frequência de ressonâncias do circuito serie formado pelo indutor e capacitor. É importante que essa esteja dessintonizada das frequências impares do sistema.

De acordo com catálogos e manuais de fabricantes renomados, existem duas frequências de corte tipicamente utilizadas para o dimensionamento de um reator de dessintonia em uma rede 60Hz. São elas 227Hz (harmônica de ordem 3,7), com fator de dessintonia de 7% e 160Hz (harmônica de ordem 2,6) com fator de dessintonia de 14%.

Para o cálculo da indutância do reator  $L_f$ , Giridharan (2015) apresenta a equação

$$L_f = \frac{fV_{LL}^2}{f_0^2 2\pi Q_c} \quad (3)$$

onde,  $V_{LL}$  = Tensão nominal do capacitor (V),  $f$  = frequência da rede (Hz),  $f_0$  = frequência de dessintonia do conjunto reator mais capacitor (Hz) e  $Q_c$  = potência reativa do capacitor (VAr).

Na inclusão de um reator de dessintonia em série, o banco de capacitores deve ser ligeiramente maior em potência reativa que a necessária para corrigir o fator de potência. La Rosa (2006) explica que isso se dá pelo fato de que a instalação do indutor acrescenta um fator indutivo que deve ser compensada pelo capacitor para a correta correção do fator de potência. Além disso, o banco de capacitores deve ser dimensionado para uma tensão maior do que a da rede. Conseqüentemente isso exige uma potência reativa também maior. Aumento da tensão nos capacitores se dá pelo desfasamento de tensão em  $180^\circ$ .

Conforme apresentadas por Boylestad (2012), a corrente sobre o ramo  $I_{ramo}$  pode ser calculada como

$$I_{ramo} = \frac{V}{Z_T} \quad (4)$$

sendo,

$$Z_T = Z_R + Z_L + Z_C \quad (5)$$

onde,  $V$  = tensão no barramento (V),  $Z_T$  = impedância total no ramo ( $\Omega$ ),  $Z_R$  = impedância resistiva ( $\Omega$ ),  $Z_L$  = impedância indutiva ( $\Omega$ ) e  $Z_C$  = impedância capacitiva ( $\Omega$ ).

A tensão sobre o capacitor  $V_C$  pode ser calculada conforme apresentado por Boylestad (2012) como

$$V_C = I_{ramo}Z_C \quad (6)$$

sendo,

$$Z_C = \frac{1}{2\pi fC} < -90^\circ \quad (7)$$

na qual,  $I_{ramo}$  = corrente no ramo do indutor em serie com o capacitor (A),  $Z_C$  = impedância do capacitor ( $\Omega$ ),  $f$  = frequência da rede (Hz) e  $C$  = capacitância do capacitor (F).

Com os valores calculados é possível selecionar os componentes com valores comerciais mais próximo possível dos valores calculados. Dessa forma, a correção do fator de potência será efetiva, o capacitor não sofrerá danos precoces e também não irá interagir com as harmônicos no sistema, causando ainda mais distúrbios e consumindo ainda mais energia de forma desnecessária.

### 3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

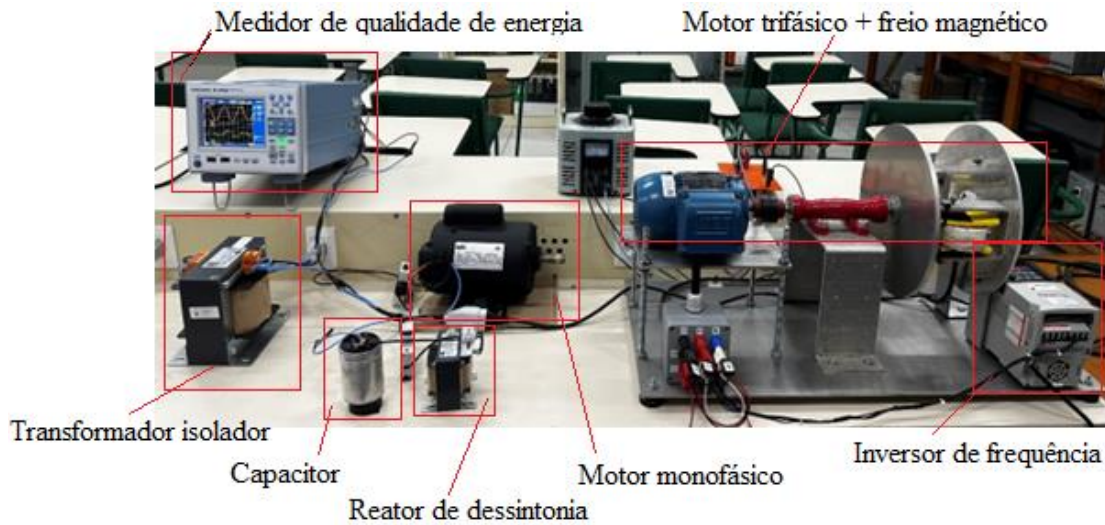
Aqui serão abordados todos os aspectos metodológicos do trabalho realizada descrevendo-se os procedimentos adotados para estudar a eficácia da utilização de filtros de dessintonia em redes com a presença de cargas não lineares quando existe a necessidade de correção do fator de potência.

Para alcançar os objetivos propostos foi utilizada uma abordagem qualitativa. O trabalho em questão utilizará os conceitos e definições de uma pesquisa explicativa, pois, uma vez identificado o problema a ser abordado, serão aplicados métodos experimentais para buscar soluções. Além disso, também serão empregados conceitos de pesquisa exploratória, por meio de levantamentos bibliográficos que aprofundarão o conhecimento, auxiliando na melhor compreensão das causas e os efeitos do fenômeno em estudo.

O procedimento técnico adotado tem como objetivo comprovar os resultados do problema estudado. Inicialmente se fez uma pesquisa bibliográfica sobre o tema. Foram consultados livros, artigos, catálogos de fabricantes e demais materiais disponíveis sobre o assunto. Uma vez que o tema estava bibliograficamente estruturado, realizou-se um experimento em bancada de um sistema isolado em escala, contendo cargas não lineares e lineares a fim de observar os fenômenos estudados, conforme Figura 8. Inicialmente, realizaram-se medições no secundário do transformador, no ponto de acoplamento comum - PCC (do inglês *Point of Common Coupling*), conforme norma IEEE 519, da distorção harmônica de corrente total – THDi (do inglês *Total Current Harmonic Distorsion*) e do fator de potência, e também o registro das formas de onda de tensão e corrente para o sistema proposto, sem a presença de elementos para a correção do fator de potência. Com base nos dados coletados a partir destas medições, foram calculados os valores adequados para o banco de capacitores e o reator de dessintonia necessário (ver apêndice A). Após a instalação do estágio de correção de FP, composto de capacitor e reator de dessintonia, foram repetidas as medições dos parâmetros de qualidade de energia. Por fim, removeu-se o reator de dessintonia do circuito, mantendo-se apenas o capacitor conectado em paralelo com os demais elementos do sistema e realizaram-se novas medições. Optou-se por realizar os ensaios nessa configuração em última etapa, a fim de minimizar os riscos para a continuidade do experimento, uma vez que esta condição é a que representa maior probabilidade de ocorrência de ressonância, em função da presença de elevado conteúdo harmônico no sistema e da ausência do reator de dessintonia.

Os dados adquiridos ao longo das medições em diferentes cenários foram registrados para realização de análise dos resultados obtidos. Os resultados com mais detalhes são apresentados no Apêndice B deste documento.

Figura 8 - Experimento montado em bancada.



Fonte: a autora (2024).

## 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

O sistema base para o estudo realizado é uma rede isolada, monofásica e de baixa potência, montada em bancada no laboratório de eletrotécnica do IFSC campus Joinville. O sistema é composto por um motor monofásico de 0,5cv (carga linear), a vazio, alimentado em 220V, e um motor trifásico de 0,5cv, alimentado por um inversor de frequência (carga não-linear) em 220V, acoplado a um freio magnético disponível no laboratório. Ambos os motores são da fabricante WEG e o inversor de frequência é o modelo PowerFlex 40 da fabricante AllenBradley e possui corrente nominal de 5A para operação contínua. A entrada do inversor é monofásica de 200V à 240V e saída trifásica. Para isolação do sistema foi utilizado um transformador isolador monofásico de 1010VA, com primário e secundário em 220V.

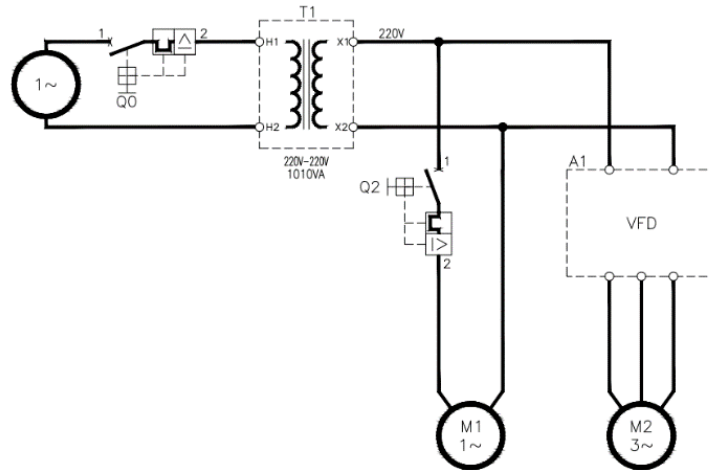
O instrumento utilizado para a medição é um medidor de qualidade de energia da Yokogawa, modelo WT500. Com esse instrumento foi possível extrair os valores de potência ativa, reativa e aparente do sistema, além do fator de potência e os níveis de distorção harmônica em cada um dos cenários que serão apresentados na sequência. Os cálculos são apresentados no Apêndice A desse documento.

### 4.1 SISTEMA SEM CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

Nesse cenário serão conectados ao barramento somente os motores de indução, sem correção do fator de potência. O intuito dessa medição é extrair os dados da rede para dimensionamento de equipamentos necessários para demonstração nos próximos cenários.

Na Figura 9 é mostrado o esquema elétrico equivalente ao que foi montado em bancada. Dessa forma, foram registradas as formas de onda da tensão e corrente no secundário do transformador, onde os resultados são apresentados na Figura 11.

Figura 9 - Diagrama elétrico sem correção do fator de potência.



Fonte: a autora (2024).

Conforme Figura 10, o sistema apresentou um nível de distorção harmônica de corrente e tensão de 41,6% e 5,6%, respectivamente. O resultado dessa distorção pode ser visto nas formas de onda e é resultado da presença de cargas não lineares no sistema. De acordo com os dados apresentados na Figura 10 é possível observar que a componente harmônica de 3ª ordem apresenta amplitude elevada. Esta condição é resultado característico da distorção harmônica gerada por um inversor de frequência monofásico. Já o fator de potência desse circuito é 0,6 indutivo.

Figura 10 - Resultado das medições sem correção do fator de potência.

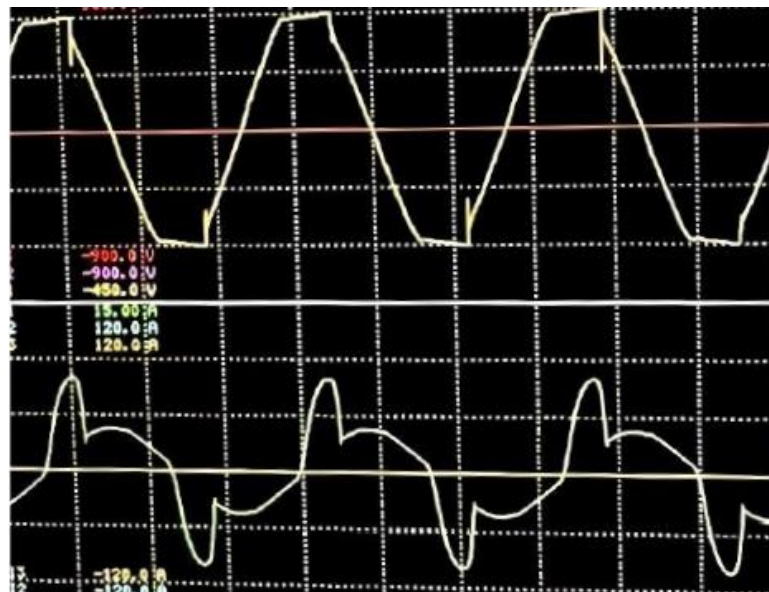
Dados de rede (Sem correção do fator de potência)		Ordem harmonica (corrente)	Sem correção do fator de potência (%)
Frequência	60,029 Hz	1	90,931
Urms	221,41 V	3	33,804
Irms	4,4733 A	5	21,266
P1	0,5934kW	7	7,226
S1	0,9904kVA	9	3,83
Q1	0,7930kVAr	11	5,664
$\lambda$	0,5991	13	3,71
$\Phi$	G53,19°	15	2,181
		17	2,294
		19	1,997
		21	1,617

Uthd1	5,600%
lthd1	41,613%
Pthd1	0,926%

Fonte: a autora (2024).

Figura 11 - Forma de onda da tensão e corrente sem correção do fator de potência.



Fonte: a autora (2024).

#### 4.2 SISTEMA COM CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA, SEM REATOR

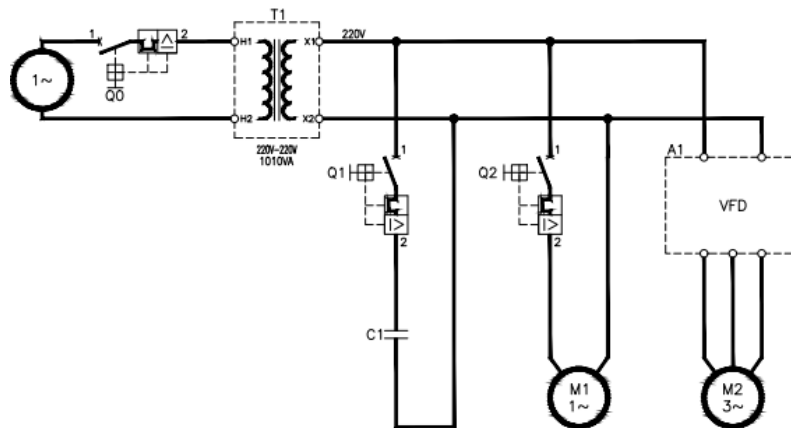
Dada a limitada disponibilidade no mercado de componentes de baixa potência para a correção de reativos, os ensaios foram realizados com um capacitor de valor comercial que resultasse, quando associado a um reator de dessintonia, no valor corrigido de fator de potência de 0,98. Para que o sistema atinja os níveis desejados de fator de potência é necessário que um capacitor de 672,44 VAr seja instalado em paralelo com as cargas, conforme diagrama

apresentado na Figura 12. Para esse experimento foi considerado um capacitor de potência de 1,67k VAr em 380 V/60 Hz, com capacitância de  $30,7\mu F$  da fabricante WEG, que em 220 V/60 Hz, não associado a um reator de dessintonia, fornece uma potência reativa capacitiva de 600 Var.

Uma vez instalado somente o capacitor no sistema, conforme configuração apresentada na Figura 12, foram repetidas as medições no secundário do transformador e os resultados são apresentados na Figura B 2 - Dados de rede com correção do fator de potência, sem reator de dessintonia, do Apêndice B, na Figura 13 e Figura 14.

A instalação do capacitor conforme Figura 12 apresenta resultados satisfatórios quando analisados somente os resultados obtidos para o fator de potência do circuito e a corrente total demandada. O fator de potência passou de 0,6 indutivo para 0,76 indutivo, enquanto a corrente total do circuito passou de 4,48A para 3,47A. Entretanto, ao observar a forma de onda de corrente e tensão nessa condição percebe-se que a interação do capacitor com os demais elementos do sistema apresentou uma degradação das mesmas.

Figura 12 - Diagrama elétrico com correção do fator de potência sem reator de dessintonia.



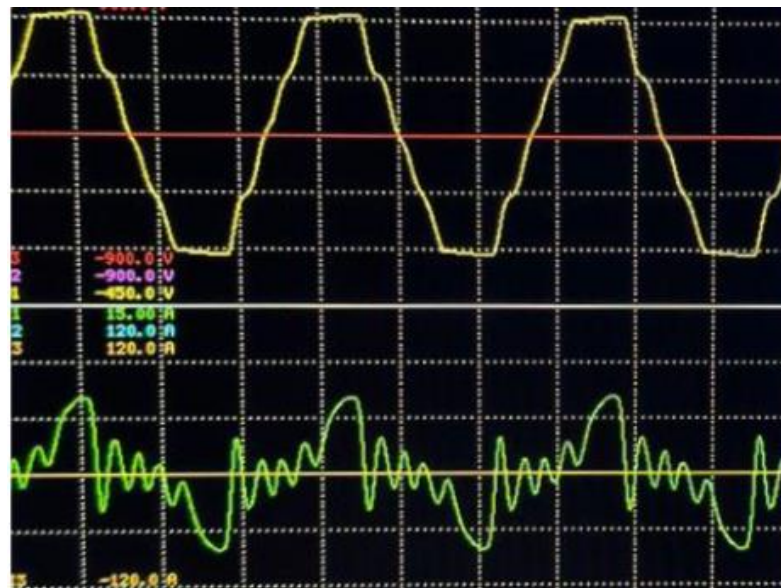
Fonte: a autora (2024).

Figura 13 - Resultado das medições com correção do fator de potência, sem reator de dessintonia.

Dados de rede (com correção do fator de potência sem reator de dessintonia)		Ordem harmonica (corrente)	Com correção do fator de potência, sem reator (%)
Frequência	60,084 Hz	1	78,31
Urms	233,91 V	3	37,037
Irms	3,4642 A	5	25,052
P1	0,6125kW	7	20,923
S1	0,8103kVA	9	15,771
Q1	0,5305kVAr	11	29,628
$\lambda$	0,7559	13	15,599
$\Phi$	G40,90°	15	3,81
Uthd1	7,082%	17	5,344
Ithd1	62,189%	19	3,687
Pthd1	1,499%	21	0,899

Fonte: a autora (2024)

Figura 14 - Forma de onda da tensão e corrente com correção do fator de potência sem reator de dessintonia.



Fonte: a autora (2024)

A distorção nas formas de onda é reflexo de um aumento dos níveis de distorção de tensão e corrente no sistema. O nível de distorção harmônica total de corrente aumentou para 62,19% e o de tensão para 7,08% (ver Figura B 2 do Apêndice B), comprovando o argumento de La Rosa (2006) apresentado teoricamente no capítulo anterior. Quando analisados os resultados apresentados em cada uma das componentes harmônicas de corrente, percebeu-se um aumento nos harmônicos de 3<sup>a</sup> e 5<sup>a</sup> ordem e uma presença bastante significativa de

componentes harmônicos de 7<sup>a</sup>, 9<sup>a</sup>, 11<sup>a</sup> e 13<sup>a</sup> ordem, onde a 11<sup>a</sup> harmônica é a mais significativa e corresponde a uma parcela superior a 3<sup>a</sup> harmônica desse sistema. Conforme apresentado na literatura por Giridharan (2015), esse comportamento já era esperado, pois a instalação de capacitores para correção do fator de potência em redes com níveis elevados de distorção harmônica aumenta os níveis de distorção harmônica total, incluindo um aumento considerável na componente harmônica de 11<sup>a</sup> ordem, caracterizando uma condição de ressonância envolvendo capacitores, conforme apresentado por Durgan et al. (2004).

#### 4.3 SISTEMA COM CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA, COM REATOR

Nesse cenário um reator será instalado em série com o capacitor para correção do fator de potência, conforme Figura 15. Neste caso, o conjunto reator e capacitor deverá deslocar a frequência de ressonância para 160 Hz, sendo essa frequência equivalente a uma harmônica de ordem 2,6. Para isso, o reator deverá ter uma indutância de 32,3mH, com corrente de 3A <sup>1</sup> (ver cálculos no Apêndice A). O fator de dessintonia desse reator é de 14%, seguindo os fatores de mercado e atendendo às recomendações de Giridharan (2015).

O capacitor, quando em série com um indutor, deve ser capaz de suportar uma tensão ligeiramente superior a tensão no ramo. Para o cálculo da tensão sobre o capacitor nesse cenário foram considerados os dados do sistema apresentados na Figura 10. A tensão sobre o capacitor deverá ser de aproximadamente 258,33V (ver cálculos no Apêndice A). É importante mencionar aqui que qualquer variação na tensão de entrega do circuito irá afetar a tensão sobre o capacitor e conseqüentemente a potência reativa que esse componente pode entregar. O capacitor deve ser sobre dimensionado para suportar a tensão aplicada sobre ele e nessa tensão deve ser capaz de entregar a potência reativa necessária para correção do fator de potência. Nesse caso, a tensão máxima suportada pelo componente é de 380V, sendo possível aplicar sobre o capacitor os 258,33V calculados e ainda fornecer uma potência reativa de 771,78VAr, ligeiramente superior ao necessário para correção do fator de potência para 0,98.

O reator de dessintonia foi instalado em série com o capacitor no circuito conforme diagrama apresentado na Figura 15 e foram feitas novas medições no secundário do transformador. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 17 e Figura 16.

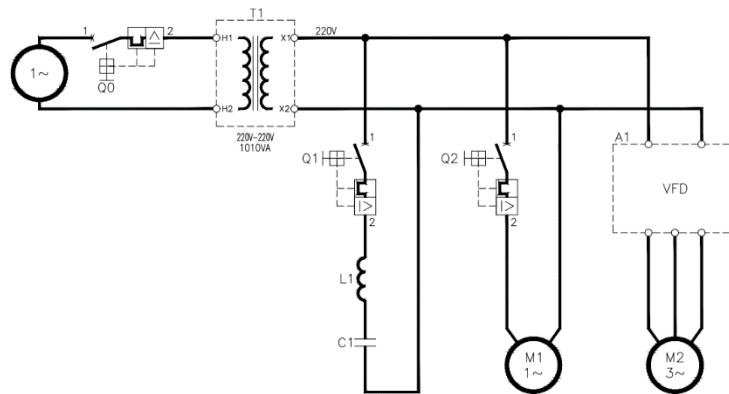
Observando as formas de onda de tensão e corrente nesse cenário é possível perceber uma semelhança com o primeiro cenário apresentado (ver Figura 11), porem com amplitude

---

<sup>1</sup> O reator de dessintonia utilizado nesse trabalho foi fabricado comercialmente com valor de indutância de 33mH.

levemente reduzida. Isso indica que a inclusão do conjunto reator mais capacitor não interferiu de forma significativa na distorção harmônica já existente no sistema.

Figura 15 - Diagrama elétrico com correção do fator de potência com reator de dessintonia



Fonte: a autora (2024)

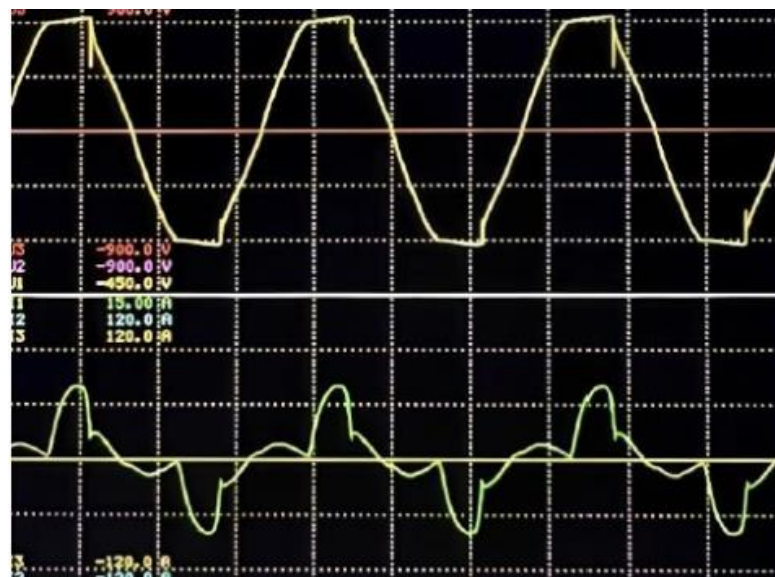
Comparando os resultados apresentados na Figura 16 com os apresentados anteriormente na Figura 13, com correção do fator de potência e sem reator de dessintonia, é possível notar que houve uma diminuição da corrente demandada pela fonte de 3,47A para 3,16A, assim como uma redução nos níveis de distorção harmônica total de corrente e tensão, passando agora para 52,3% e 5,1% respectivamente (ver também Figura B 3 - Dados de rede com correção do fator de potência, com reator de dessintonia, do Apêndice B). O aumento nos níveis de distorção harmônica nesse cenário quando comparado com o primeiro cenário apresentado é justificado pela afirmação de La Rosa (2006). O autor destaca que a instalação de reatores de dessintonia em série com capacitores no sistema não bloqueia a interação do capacitor com as harmônicas presentes no sistema, fazendo com que essa interação ainda exista, aumentando um pouco os níveis de distorção total. Para a melhor compreensão desse fenômeno, as formas de onda de tensão e corrente do conjunto reator e capacitor apresentam as distorções apresentadas na Figura 18.

Figura 16 - Resultado das medições com correção do fator de potência com reator de dessintonia

Dados de rede (com correção do fator de potência com reator de dessintonia)		Ordem harmonica (corrente)	Com correção do fator de potência, com reator (%)
Frequência	60,005 Hz	1	85,228
Urms	229,41 V	3	44,662
Irms	3,1692 A	5	23,687
P1	0,6157kW	7	6,758
S1	0,7271kVA	9	4,129
Q1	-0,3867kVAr	11	7,367
$\lambda$	0,8468	13	4,628
$\Phi$	D32,13°	15	2,093
Uthd1	5,100%	17	3,483
Ithd1	52,309%	19	2,788
Pthd1	0,584%	21	1,728

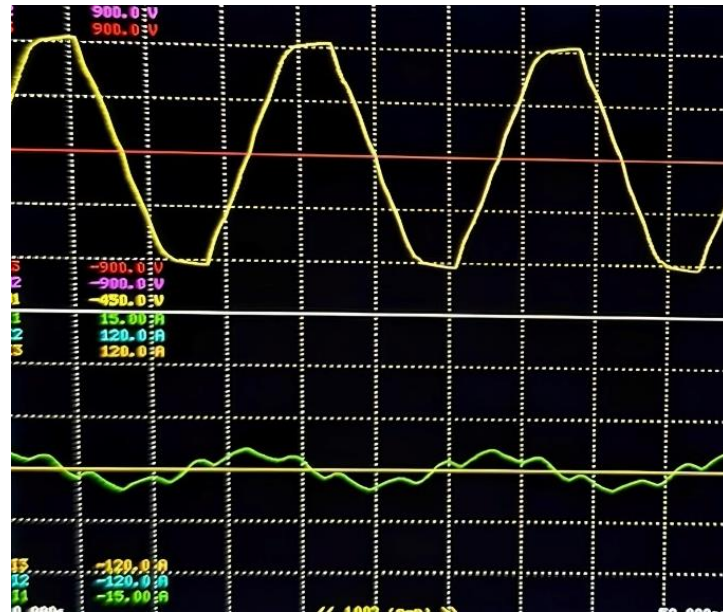
Fonte: a autora (2024).

Figura 17 - Forma de onda da tensão e corrente com correção do fator de potência com reator de dessintonia



Fonte: a autora (2024).

Figura 18 - Forma de onda da tensão e corrente sobre o conjunto reator de dessintonia + capacitor



Fonte: a autora (2024).

Enquanto no cenário sem a instalação do reator de dessintonia os níveis de distorção harmônica de 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup>, 9<sup>a</sup>, 11<sup>a</sup> e 13<sup>a</sup> eram consideravelmente elevados, as harmônicas de mesma ordem, com o reator de dessintonia apresentam níveis consideravelmente inferiores (ver **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, no Apêndice A). Os níveis de distorção nesses harmônicos se aproximam muito ao que foi apresentado no cenário sem correção do fator de potência.

A harmônica de 11<sup>a</sup> ordem apresentou uma redução de 29,628% de distorção sem reator de dessintonia para 7,367% com reator de dessintonia em série com o capacitor, cerca de 84% da harmônica de 3<sup>a</sup> ordem nesse mesmo cenário. Sem o reator de dessintonia a diferença entre a harmônica de 11<sup>a</sup> ordem e a de 3<sup>a</sup> ordem era de 21% apenas, onde somente a harmônica de 11<sup>a</sup> ordem sofreu aumentos significativos nos seus resultados.

Analisando o comportamento do fator de potência com a inclusão do reator de dessintonia em série é possível notar que houve a correção do fator de potência de forma satisfatória, porém, o sistema se tornou capacitivo pelo excedente de reativos inseridos. Como o objetivo desse trabalho é evidenciar a importância dos reatores de dessintonia para a durabilidade dos capacitores e para a diminuição de efeitos que os capacitores podem causar no sistema, os resultados na correção do fator de potência em um sistema montado em bancada não serão tratados quando excederem os conceitos propostos para esse trabalho. Dessa forma, ainda é possível listar alguns fatores cobertos por esse trabalho que contribuíram para que o

fator de potência se tornasse capacitivo considerando os dados coletados e a proposta desse trabalho.

A coleta de dados de rede para cálculo do fator de potência se deu em um dia em que a tensão de alimentação do circuito era de 221,4V, conforme Figura 20/Figura 10. Esse dado foi considerado para o dimensionamento do capacitor e conseqüentemente do reator de dessintonia. Nessa condição de tensão, o capacitor já estaria fornecendo mais reativos que o necessário para a correção do fator de potência para 0,98, como proposto, pois já estaria entregando para a rede 766,5VAr. No dia em que o reator de dessintonia e o capacitor foram instalados a tensão da rede estava em 223,4V, conforme Figura 16. Nessa condição o capacitor está fornecendo aproximadamente 822,88VAr, pois a tensão sobre ele é de 267V, conforme Figura 19. Isso corresponde à 150,5VAr a mais do que o necessário, já tornando o circuito capacitivo. No entanto, qualquer outro fator que possa ter contribuído para tal comportamento não será investigado, pois não faz parte dos objetivos desse trabalho.

Figura 19 - Tensão sobre o capacitor em serie com o reator de dessintonia



Fonte: a autora (2024).

Figura 20 - Dados de rede comparativo

Dados de rede (sem correção do fator de potência)		Dados de rede (sem correção do fator de potência)	
Frequência	60,029 Hz	Frequência	60,010 Hz
Urms	221,41 V	Urms	227,72 V
Irms	4,4733 A	Irms	4,5938 A
P1	0,5934kW	P1	0,6090kW
S1	0,9904kVA	S1	1,0461kVA
Q1	0,7930kVAr	Q1	0,8505kVAr
$\lambda$	0,5991	$\lambda$	0,5822
$\Phi$	G53,19°	$\Phi$	G54,40

Fonte: a autora (2024).

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa desenvolvida investigou a importância da instalação de reatores de dessintonia em série com capacitores quando se tem a necessidade de correção do fator de potência em redes com presença de harmônicos. Foram apresentados conceitos básicos para o entendimento do problema, como fator de potência, distorção harmônica, ressonância, correção do fator de potência com capacitores e filtros de dessintonia. Além disso foram apresentados resultados de testes em bancada que comprovaram a eficácia dos reatores de dessintonia e fortaleceram a argumentação teórica desse trabalho.

Com isso, foi possível constatar que o conjunto reator de dessintonia é capaz de proteger os capacitores dos efeitos das harmônicas já existentes, prolongando sua vida útil, além de proteger o próprio sistema contra os efeitos da interação entre capacitores e harmônicas. Porém, também é possível observar que os reatores de dessintonia, quando instalados em série com os capacitores de potência, não funcionam como filtros de harmônicas para o sistema.

Conforme figura Figura 21 é possível notar que com a instalação do reator de dessintonia houve uma diminuição da harmônica de 11ª ordem, quando comparado com a mesma harmônica no cenário em que a correção do fator de potência se deu somente com o capacitor. Isso mostra que o sistema está seguro e dessintonizado de frequências que pudessem interagir com o capacitor, gerando ressonância.

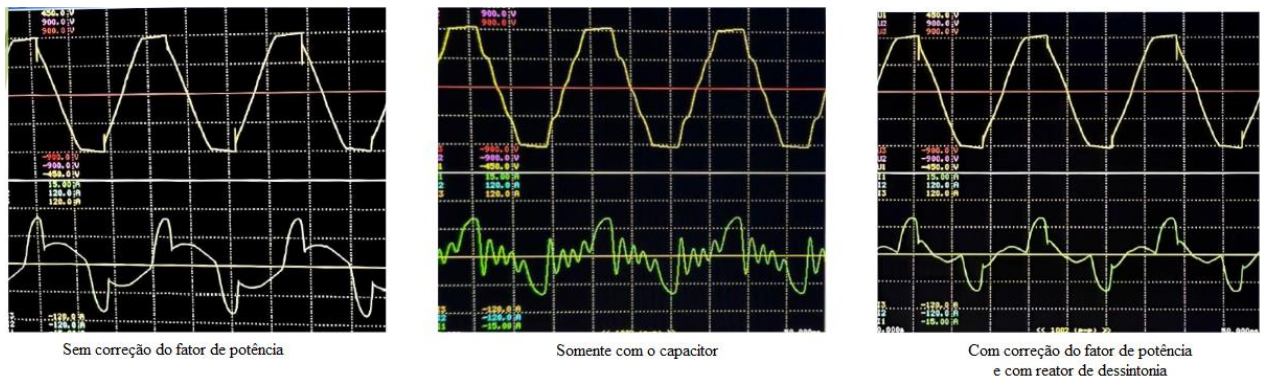
Figura 21 - Comparativo de espectro harmônico

Ordem harmônica (corrente)	Sem correção do fator de potência (%)	Com correção do fator de potência, sem reator (%)	Com correção do fator de potência, com reator (%)
1	90,931	78,31	85,228
<b>3</b>	<b>33,804</b>	<b>37,037</b>	<b>44,662</b>
5	21,266	25,052	23,687
7	7,226	20,923	6,758
9	3,83	15,771	4,129
<b>11</b>	<b>5,664</b>	<b>29,628</b>	<b>7,367</b>
13	3,71	15,599	4,628
15	2,181	3,81	2,093
17	2,294	5,344	3,483
19	1,997	3,687	2,788
21	1,617	0,899	1,728
23	1,338	0,958	1,735
25	1,117	0,8	1,847
27	0,991	0,356	1,257
29	0,748	0,378	0,913
31	0,733	0,202	1,162

Fonte: a autora (2024).

Quando comparadas as formas de onda em cada um dos cenários testados apresentada na Figura 22, é possível observar que no cenário com a inclusão do reator de dessintonia, as formas de onda de corrente e tensão estão similares às formas de onda no cenário inicial, sem correção do fator de potência. A onda de corrente apresenta uma redução na sua amplitude, resultado da correção do fator de potência e a diminuição do consumo de corrente da fonte. Foi possível concluir dessa análise que houve uma melhora a qualidade de energia da rede e as características iniciais de tensão e corrente da rede foram mantidas.

Figura 22 - Comparativo das formas de onda de tensão e corrente



Fonte: a autora (2024).

Comparando os dados de rede de cada um dos cenários apresentados na Figura 23 é possível perceber a diminuição da corrente demandada pela fonte com a inserção do reator de dessintonia. Isso mostra que houve uma diminuição da demanda de reativos da fonte. Esses reativos estão sendo supridos pelos capacitores instalados no sistema. Além disso também se nota a melhora no nível de distorção harmônica de corrente e tensão quando comparados os cenários com e sem reator de dessintonia.

Figura 23 - Comparativo dos dados de rede

Dados de rede (sem correção do fator de potência)		Dados de rede (com correção do fator de potência sem reator de dessintonia)		Dados de rede (com correção do fator de potência com reator de dessintonia)	
Frequência	60,029 Hz	Frequência	60,084 Hz	Frequência	60,005 Hz
Urms	221,41 V	Urms	233,91 V	Urms	229,41 V
Irms	4,4733 A	Irms	3,4642 A	Irms	3,1692 A
P1	0,5934kW	P1	0,6125kW	P1	0,6157kW
S1	0,9904kVA	S1	0,8103kVA	S1	0,7271kVA
Q1	0,7930kVAr	Q1	0,5305kVAr	Q1	-0,3867kVAr
$\lambda$	0,5991	$\lambda$	0,7559	$\lambda$	0,8468
$\Phi$	G53,19°	$\Phi$	G40,90°	$\Phi$	D32,13°
Uthd1	5,600%	Uthd1	7,082%	Uthd1	5,100%
Ithd1	41,613%	Ithd1	62,189%	Ithd1	52,309%
Pthd1	0,926%	Pthd1	1,499%	Pthd1	0,584%

Fonte: a autora (2024).

Isso significa que, ao corrigir o fator de potência pela compensação de reativos utilizando capacitores e incluindo um reator de dessintonia em série, é possível corrigir o fator de potência e melhorar a qualidade da energia do sistema sem causar danos significativos aos equipamentos e à instalação como um todo. Contudo, ainda haverá uma carga capacitiva no sistema, e a interação com as harmônicas continuará existindo, embora de forma significativamente reduzida, como apresentado no comparativo da Figura 23.

O tema é bastante amplo e permite diversos estudos. Dessa forma, se recomenda para trabalhos futuros o estudo dos impactos na rede quando são consideradas outros métodos de correção do fator de potência, se não pela utilização de capacitores. Existem outros métodos para correção do fator de potência aplicados na indústria como bancos de capacitores automáticos e correção ativa do fator de potência. Também é sugerido um estudo sobre a

influência da distorção harmônica de tensão sobre os capacitores, além da elaboração de trabalhos de medição e projeto de correção do fator de potência em plantas industriais reais pode complementar a investigação e resultados desse trabalho.

## REFERÊNCIAS

- ARRILLAGA, J.; WATSON, N.R. Power System Harmonics. (eds J. Arrillaga and N.R. Watson), 2003.
- BOYLESTAD, Robert L. Introdução à análise de circuitos. 12ª Edição, tradução: Daniel Vieira e Jorge Ritter; revisão técnica: Benedito Donizete Bonatto – São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2012.
- CENTRAIS ELÉTRICAS DE SANTA CATARINA S.A. (Celesc). Norma Técnica NT-02: Padrão de Entrada de Energia Elétrica. Disponível em: <https://www.celesc.com.br/arquivos/normas-tecnicas/padrao-entrada/NT02.pdf>. Acesso em: 21 abr. de 2024.
- DESHPANDE, R. P. Capacitors. New York: McGraw-Hill, 2015.
- DUGAN, Roger C.; McGRANAGHAN, Mark F.; SANTOSO, Surya; BEATY, H. Wayne. Electrical Power Systems Quality. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 2004.
- GIRIDHARAN, M. K. Electrical Systems Design. 2. ed. New Delhi: I K International Publishing House, 2015.
- GUMILAR, Langlang; CAHYANI, Denis Eka; AFANDI, Arif Nur; MONIKA, Dezetty; RUMOKOY, Stieven Netanel. Optimalization harmonic shunt passive filter using detuned reactor and capacitor bank to improvement power quality in hybrid power plant. AIP Conference Proceedings, v. 2217, n. 1, 2020. Disponível em: <https://pubs.aip.org/aip/acp/article-abstract/2217/1/030003/1025037/Optimalization-Harmonic-Shunt-Passive-Filter-Using?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em: 15 jun. 2024.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE 519: Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. New York: IEEE, 2014.
- KASSICK, E.V. Harmônicas em Sistemas Industriais de Baixa Tensão, Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, 2004.
- KNESCHKE, T. A. Distortion and power factor of nonlinear loads. In: RAILROAD CONFERENCE 1999 ASME/IEEE, 1999. Anais [...]. 1999.
- LA ROSA, Francisco C. Harmonics and Power Systems. Taylor & Francis Group, LLC, Boca Raton, USA, 2006.
- MASOUM, Mohammad A.S.; FUCHS, Ewald F. Power Quality in Power Systems and Electrical Machines. 2. ed. London: Academic Press, 2015.
- MAMEDE, J. Instalações Elétricas Industriais. 6. ed., Rio de Janeiro, LTC: 2001.

NILSSON, James W.; RIEDEL, Susan A. *Electric Circuits*. 10. ed. Upper Saddle River: Pearson, 2014.

OPPENHEIM, Alan V.; WILLSKY, Alan S. *Sinais e sistemas*. São Paulo: Pearson, 1997.

PERETA, H. A.; LANDIM, J. P.; NOGUEIRA, L. R. Filtro de dessintonia para banco de capacitores. XI Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e VII Encontro Latino Americano de Pós-Graduação - Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, 2007.

RESENDE, F.; PAULILLO, G. Capítulo viii compensação reativa e qualidade da energia elétrica. 2013.

SADIKU, Matthew N. O.; ALEXANDER, Charles K. *Fundamentos de Circuitos Elétricos*. 5. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2013.

WEG Automação S.A. Manual para a Correção do Fator de Potência. [Online]. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hea/h8b/WEG-correcao-do-fator-de-potencia-958-manual-portugues-br.pdf>. 2009.

ZHANG, Bin; ZHANG, Yiming. Research on LC parallel resonant circuit. *Journal of Physics: Conference Series*, v. 2527, n. 1, p. 012039, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2527/1/012039>. Acesso em: 15 jun. 2024.

**APÊNDICE A:**  
**CÁLCULO DO BANCO DE CAPACITORES E REATOR DE DESSINTONIA**

Dados da rede no momento da medição inicial:

Potência ativa (P)	593,4 W
Potência aparente (S)	990,4 VA
Potência reativa (Q)	793 VAr
$\lambda$ (fator de potência)	0,5991
THDv	5,6 %
THDi	41,613%
Tensão da rede ( $V_i$ )	221,4V

Dados para cálculo do banco de capacitores:

Fator de potência desejado: 0,98

$$\varphi = \cos^{-1}(0,98)$$

$$\varphi = 11,47^\circ$$

Para o calculo da potência reativa com fator de potência em 0,98:

$$\tan(\varphi) = \frac{Q_{novo}}{P}$$

$$\tan(11,47^\circ) = \frac{Q_{novo}}{593,4W}$$

$$\mathbf{Q_{novo} = 120,56 VAr}$$

O capacitor deverá fornecer para a rede  $Q_{cap}$ :

$$Q_{cap} = Q - Q_{novo}$$

$$Q_{cap} = 793 - 120,56$$

$$\mathbf{Q_{cap} = 672,44 VAr}$$

Dados do capacitor escolhido:

Tensão nominal do capacitor ( $V_e$ )	380 V
Frequência da rede	60 Hz
Potência reativa do capacitor	1670 VA
Capacitância	30,7 $\mu F$

Dados adicionais necessários para o cálculo do reator de dessintonia:

Frequência de dessintonia ( $f_0$ )	160 Hz
-------------------------------------	--------

Cálculo da indutância do reator de dessintonia para dessintonizar o circuito na frequência desejada:

$$L_f = \frac{f V_{LL}^2}{f_0^2 2\pi Q_c}$$

$$L_f = \frac{60 \cdot (380)^2}{160^2 \cdot 2\pi \cdot 1670}$$

$$L_f = \mathbf{32,25 \text{ mH}}$$

Cálculo da tensão sobre os terminais do capacitor quando o reator de dessintonia calculado for instalado em série:

$$Z_L = X_L = 2\pi \cdot f \cdot L$$

$$Z_L = 2\pi \cdot 60 \cdot 33\text{m}$$

$$Z_L = \mathbf{12,44 < 90^\circ \Omega}$$

$$Z_C = X_C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}$$

$$Z_C = \frac{1}{2\pi \cdot 60 \cdot 30,7\mu}$$

$$Z_C = \frac{1}{2\pi \cdot 60 \cdot 30,7\mu}$$

$$Z_C = \mathbf{86,40 < -90^\circ \Omega}$$

$$Z_T = Z_R + Z_L + Z_C$$

$$Z_T = 0 + j12,44 - j86,40$$

$$Z_T = -j73,96 \Omega$$

$$\mathbf{Z_T = 73,96 < -90^\circ \Omega}$$

No circuito em estudo,  $Z_R$  é desprezível.

Calculo da corrente no ramo reator de dessintonia mais capacitor:

$$I_{ramo} = \frac{V_i}{Z_T}$$

$$I_{ramo} = \frac{221,4}{73,96}$$

$$\mathbf{I_{ramo} = 2,99 A}$$

Calculo da tensão sobre o capacitor:

$$V_c = I_{ramo} \cdot Z_C$$

$$V_c = 2,99 \cdot 86,40$$

$$V_c = 258,33 V$$

$$\mathbf{V_c = 258,33 V}$$

Calculo da potência no capacitor com  $V_c = 258,33 V$ :

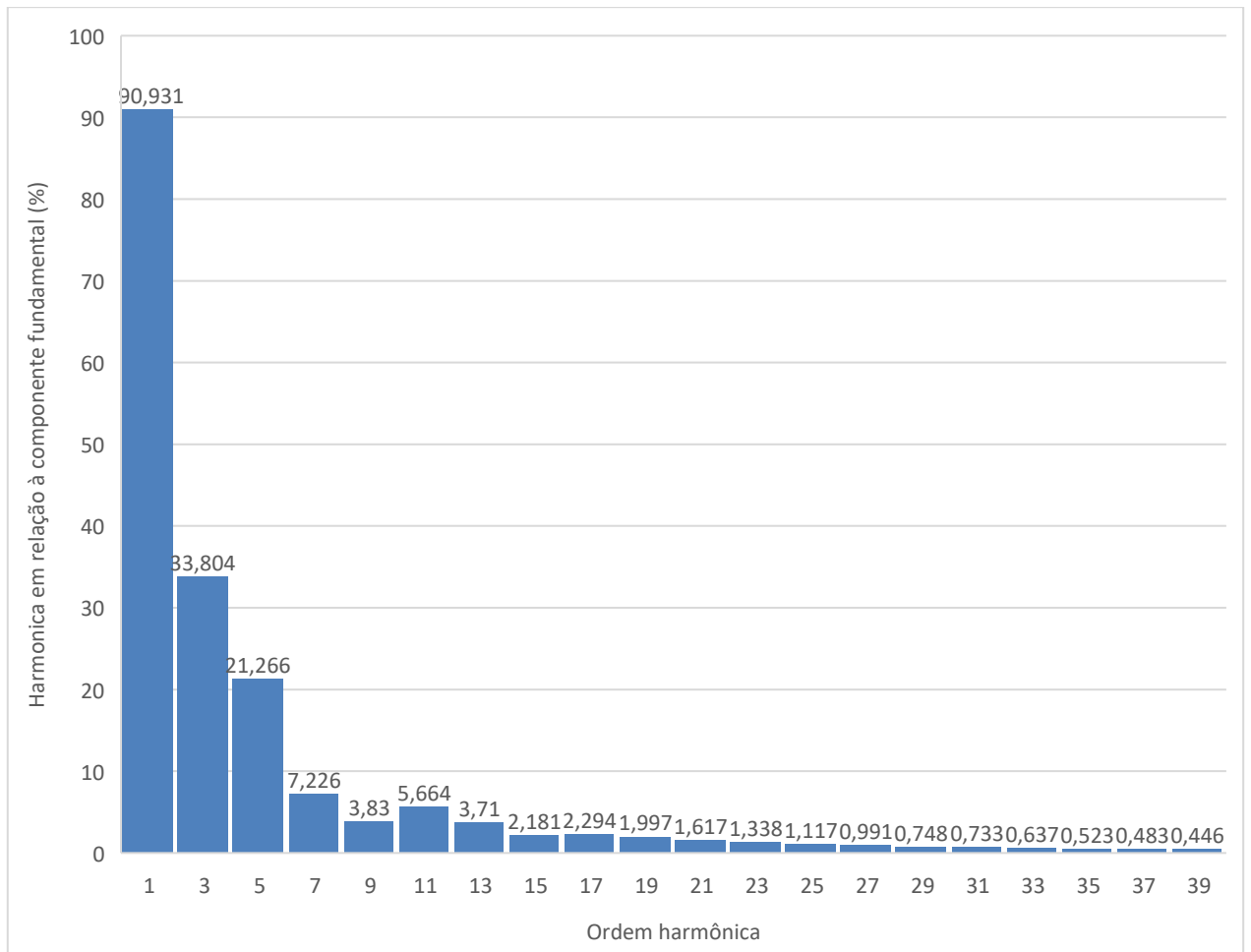
$$Q_{cap\_novo} = Q_{cap} \left( \frac{V_c}{V_e} \right)^2$$

$$Q_{cap\_novo} = 1670 \left( \frac{258,33}{380} \right)^2$$

$$\mathbf{Q_{cap\_novo} = 771,78 VAR}$$

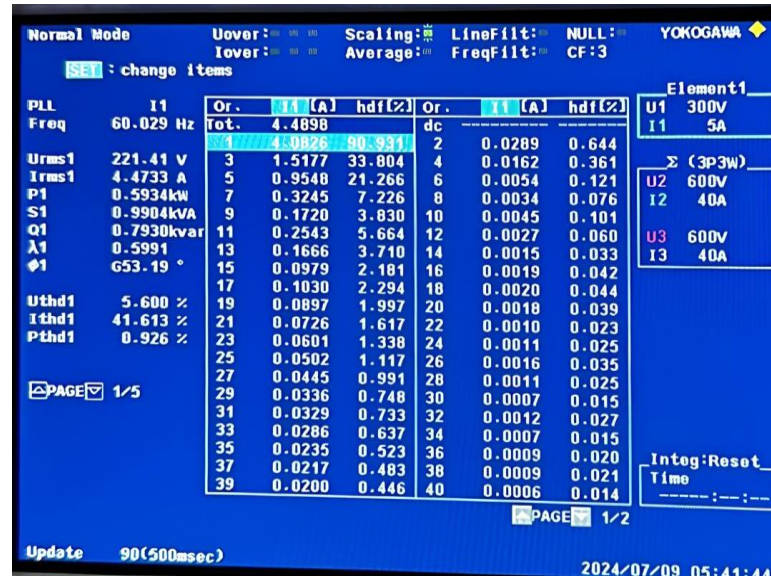
**APÊNDICE B:**  
**ESPECTRO HARMÔNICO E CONDIÇÃO DA REDE NOS TRES CENÁRIOS**  
**APRESENTADOS**

Gráfico B 1 - Espectro harmônico sem correção do fator de potência.



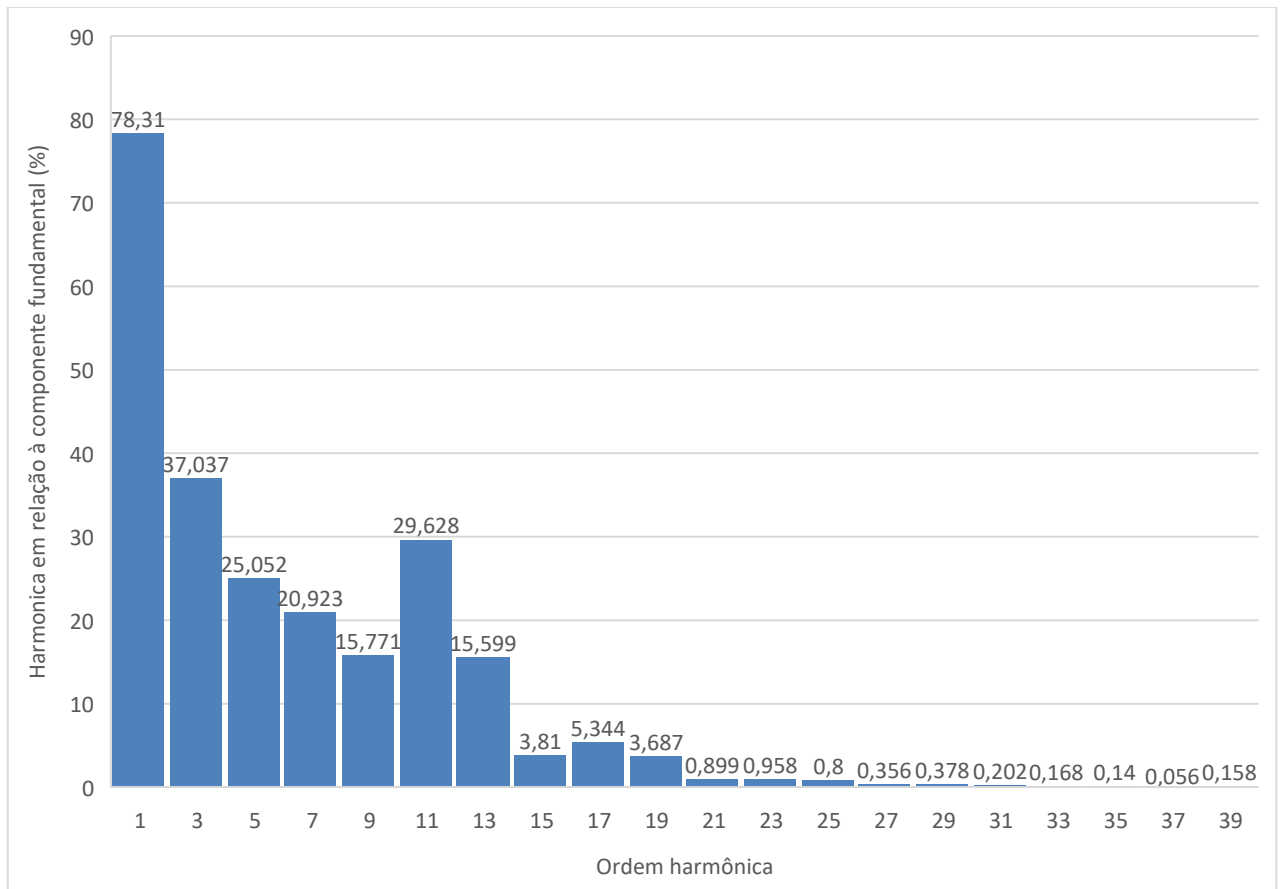
Fonte: a autora (2024)

Figura B 1 - Dados de rede sem correção do fator de potência



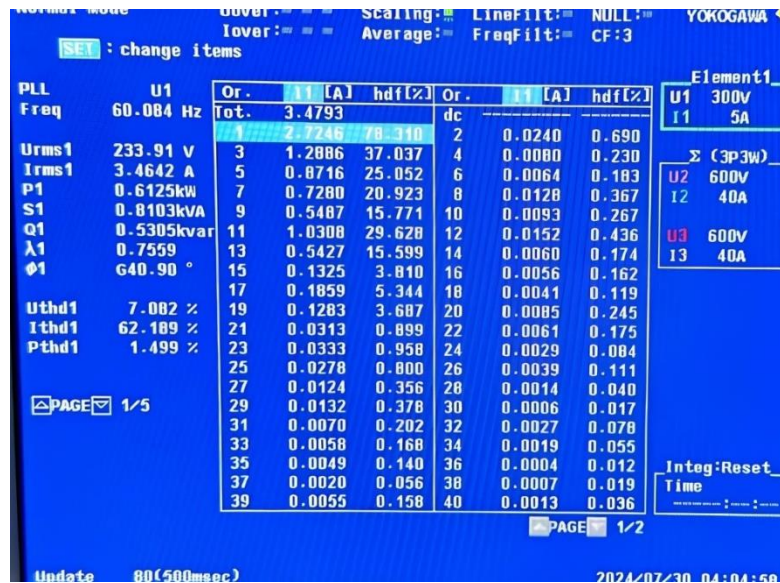
Fonte: a autora (2024)

Gráfico B 2 - Espectro harmônico com correção do fator de potência, sem reator de dessintonia



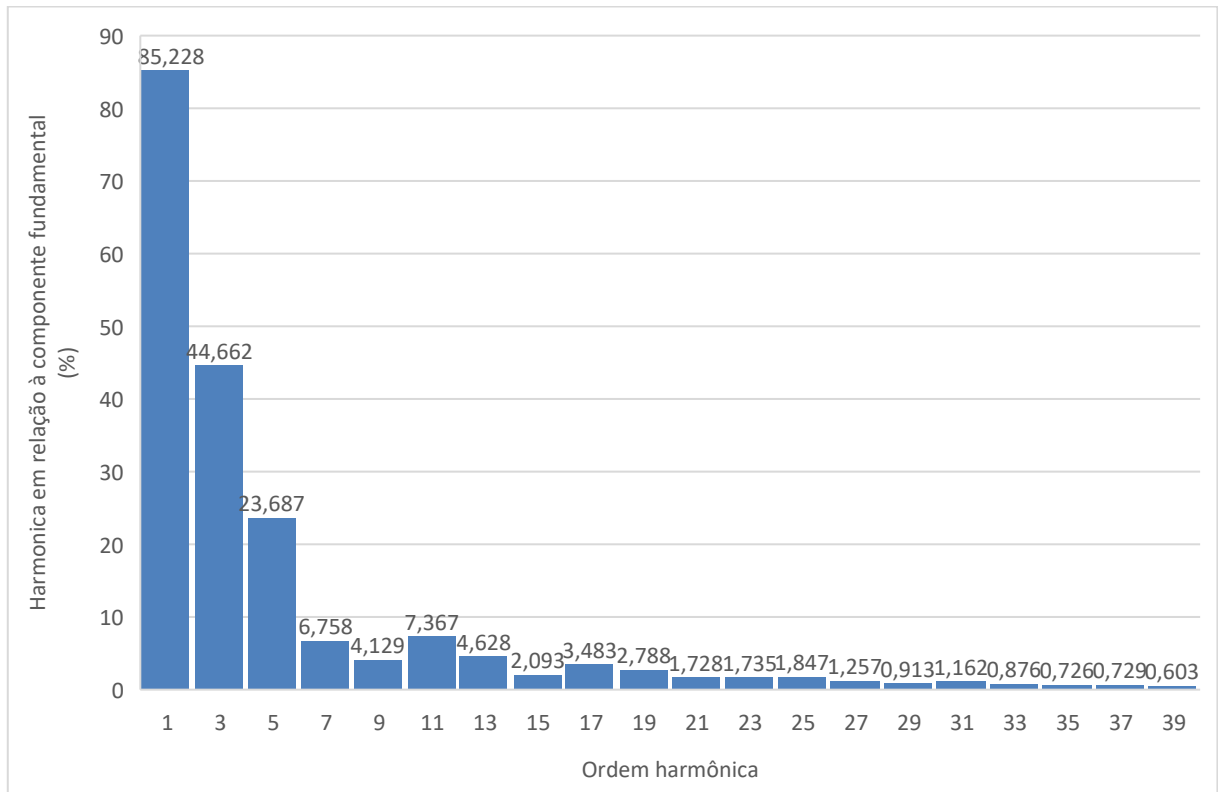
Fonte: a autora (2024)

Figura B 2 - Dados de rede com correção do fator de potência, sem reator de dessintonia



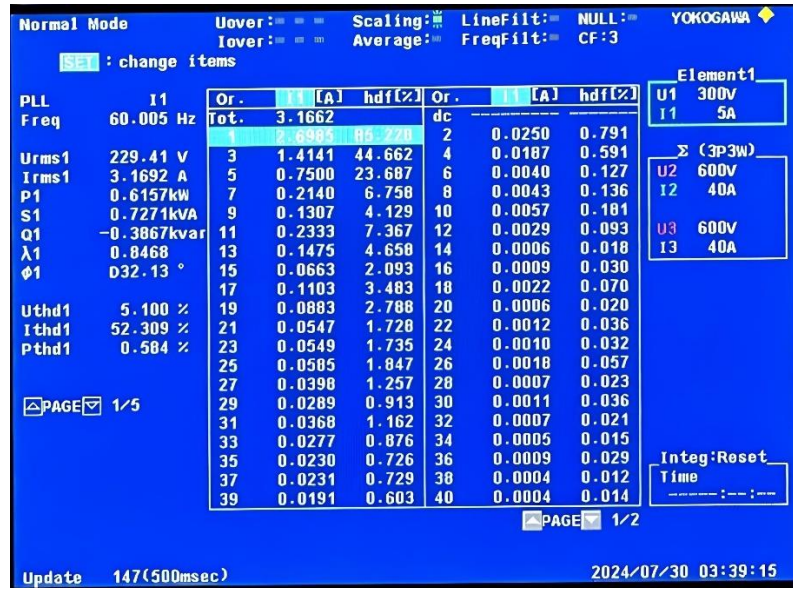
Fonte: a autora (2024)

Gráfico B 3 - Espectro harmônico com correção do fator de potência, com reator de dessintonia.

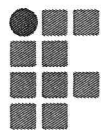


Fonte: a autora (2024)

Figura B 3 - Dados de rede com correção do fator de potência, com reator de dessintonia



Fonte: a autora (2024)



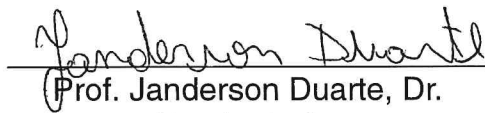
**MONITCHELIE DJHULIA BRAZ**


**A IMPORTÂNCIA DA UTILIZAÇÃO DE FILTROS DE DESSINTONIA NA  
CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA EM REDES COM CARGAS NÃO  
LINEARES: UMA INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL**

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título em Bacharel em Engenharia Elétrica, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo indicada.

Joinville, 14 de agosto de 2024.

  
Prof. Luis Sergio Barros Marques, Dr.  
Orientador  
IFSC - Joinville

  
Prof. Janderson Duarte, Dr.  
Coorientador  
IFSC - Joinville

  
Prof. Joice Luiz Jerônimo, MSc.  
IFSC - Joinville

  
Prof. Michael Klug, Dr.  
IFSC - Joinville