



Artigo

Influência do fator de potência na demanda de potência reativa em cargas de usinagem: análise experimental e correção por capacitores

**Jairton da Silva Falcão Filho¹, Maria Izabel da Silva Guerra², Romênia Gurgel Viera³,
Igor Pacífico Xavier da Silva⁴**

¹Universidade Federal Rural do Semiárido; jairton.mag@hotmail.com

²Universidade Federal Rural do Semiárido; izabel.guerra@ufersa.edu.br

³Universidade Federal Rural do Semiárido; romenia.vieira@ufersa.edu.br

⁴Universidade Federal Rural do Semiárido; contato.igorxsilva@gmail.com

Recebido: 25/05/2026;

Aceito: 06/07/2026;

Publicado: 15/07/2026;

Resumo: A qualidade da energia elétrica vem sendo amplamente estudada devido à sua influência direta na eficiência energética, na confiabilidade operacional e na vida útil dos equipamentos elétricos. Nesse contexto, a elevada demanda de potência reativa por cargas indutivas, especialmente em instalações industriais e laboratoriais, pode ocasionar baixos valores de fator de potência, aumentando perdas elétricas, quedas de tensão e custos operacionais, o que evidencia a necessidade de estratégias de compensação de potência reativa. Assim, o presente trabalho tem como objetivo realizar uma análise da influência da potência reativa de um torno mecânico (utilizado em práticas laboratoriais de uma instituição de ensino) no fator de potência total da instalação, que é um dos indicadores da qualidade da energia elétrica. Para isso, foi calculada a redução da potência reativa usando capacitores. Inicialmente, foi realizada uma abordagem teórica sobre o princípio de funcionamento do torno mecânico, o fator de potência, as causas do baixo fator de potência, suas consequências, a legislação vigente de reativos e a correção por meio de capacitores. Em seguida, foi descrito como foram realizadas as medições e, por fim, foi realizado o dimensionamento dos capacitores, considerando quatro cenários, visando o melhoramento da qualidade da energia elétrica. Verificou-se que o capacitor dimensionado no Cenário 3, de 3,33 kVAr, foi o que melhor contribuiu para o aumento do fator de potência, o que contribuiria para melhorar a qualidade da energia elétrica.

Palavras-chave: qualidade da energia elétrica; torno mecânico; potência reativa; fator de potência; banco de capacitores.

Analysis of the influence of reactive power from a lathe machine in the UFERSA machining laboratory on the installation power factor

Abstract: Power quality has been extensively investigated due to its direct influence on energy efficiency, operational reliability, and the service life of electrical equipment. In this context, the high reactive power demand imposed by inductive loads, particularly in industrial and laboratory installations, may lead to low power factor values, resulting in increased electrical losses, voltage drops, and operating costs, thereby highlighting the need for reactive power compensation strategies. Therefore, this study aims to analyze the influence of the reactive power demand of a lathe machine, used in laboratory activities at an educational institution, on the overall power factor of the electrical installation, which is one of the main indicators of power quality. To achieve this objective, the reduction of reactive power through capacitor-based compensation was evaluated. Initially, a theoretical review was conducted addressing the operating principle of the lathe machine, the concept of power factor, the causes and consequences of low power factor, the applicable regulations concerning reactive power, and power factor correction using capacitors. Subsequently, the measurement procedures were described, followed by the

capacitor bank sizing process considering four different scenarios aimed at improving power quality. The results demonstrated that the capacitor bank designed in Scenario 3, with a rated capacity of 3.33 kVAr, provided the most significant improvement in the installation's power factor, indicating its effectiveness in reducing reactive power demand and enhancing the overall quality of the electrical power supply.

Keywords: power quality; lathe machine; reactive power; power factor; capacitors

1. INTRODUÇÃO

Durante as últimas décadas, o setor elétrico vem passando por mudanças em decorrência do desenvolvimento da sociedade. Os principais fatores que influenciam estas mudanças são: o aumento da demanda por energia, a escassez de recursos de geração elétrica, a grande inserção de cargas não lineares e a maior exigência da qualidade da energia elétrica [1].

Ainda de acordo com [1], devido ao desenvolvimento de novas tecnologias e da eletrônica, houve uma grande introdução de componentes eletrônicos no sistema elétrico que, por serem elementos não lineares, provocam distorções nas ondas de tensão da rede elétrica. Entretanto, estes mesmos dispositivos são sensíveis a estas distorções, o que acarreta um escalonamento de problemas, tornando importante avaliar a qualidade da energia elétrica.

A qualidade da energia elétrica depende de fatores que afetam a amplitude e a forma de onda da tensão e da corrente. Em relação à sua forma, ela deve ser a mais próxima possível de uma onda senoidal. E, em referência às amplitudes, estas devem se manter constantes e equilibradas dentro de limites aceitáveis estabelecidos nas normas vigentes [1]. As alterações destas características podem prejudicar a operação dos equipamentos elétricos.

Outro fator que influencia a qualidade da energia elétrica é a potência. Em sistemas elétricos existem dois tipos de potência, uma ativa e uma reativa, cuja soma vetorial resulta em uma terceira, que é a potência aparente. De maneira geral, essas potências podem ser explicadas da seguinte forma: os equipamentos que transformam energia elétrica em uma outra forma de energia útil são considerados consumidores de energia ativa, já os equipamentos que utilizam a energia magnetizante no seu princípio de funcionamento são considerados consumidores de energia ativa e reativa [2].

Os equipamentos industriais, por exemplo, em sua maioria são consumidores de energia reativa indutiva, tais como motores elétricos e transformadores, ou seja, enquanto a potência ativa é consumida na transformação em trabalho, a reativa, que é responsável pela geração dos campos magnéticos e elétricos, está apenas “ocupando espaço” no sistema elétrico [3]. Outro exemplo são as cargas não lineares, como diodos e transistores, que, além de aumentar a potência reativa da instalação (o que tem como consequência reduzir o fator de potência), aumentam as harmônicas e prejudicam a qualidade da energia elétrica. Entretanto, uma única carga não linear de baixa potência não acarreta tanto impacto na rede elétrica; ela traz maior impacto quando se encontra em maior quantidade, e é o que vem ocorrendo com o crescimento da automação industrial [4].

Deste modo, uma das maneiras de penalizar os consumidores que apresentam baixo fator de potência em sua instalação é a cobrança, pelas concessionárias, do uso excedente de energia reativa, uma vez que está apenas “ocupando espaço” no sistema elétrico e exigindo da própria concessionária maiores investimentos no sistema de distribuição de energia elétrica. Como solução, os consumidores podem corrigir seu fator de potência, adequando-se ao mínimo exigido pelas normas regulamentadoras vigentes. Para isso, os capacitores são utilizados para reduzir a potência reativa indutiva da instalação, proporcionando melhora na qualidade da energia elétrica.

Neste trabalho¹ será analisado o fator de potência oriundo de um torno mecânico, visto que é um dos parâmetros que influenciam a qualidade da energia elétrica da instalação. Será estudada sua influência na energia reativa do sistema, bem como um possível método para melhorar esse indicador.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Na presente seção serão discutidos as causas e o impacto do baixo fator de potência em sistemas elétricos segundo a literatura, bem como os conceitos básicos para o entendimento dos indicadores de qualidade da energia elétrica, base do presente estudo.

2.1. Baixo fator de potência: causas e impactos em sistemas elétricos

O fator de potência é um indicador da qualidade da energia elétrica e expressa a relação entre a potência ativa

¹Este artigo está baseado no trabalho desenvolvido por [5], oriundo de pesquisa realizada no âmbito do Trabalho de Conclusão de Curso apresentado em 2017 no curso de Bacharelado em Ciência e Tecnologia da Universidade Federal Rural do Semi-Árido.

efetivamente convertida em trabalho útil e a potência aparente fornecida pelo sistema elétrico. Seu valor está diretamente associado ao equilíbrio entre as potências ativa e reativa, de modo que o aumento da demanda de potência reativa reduz o fator de potência e compromete a eficiência operacional das instalações elétricas. Nas últimas décadas, autores como [6], [7], [8] e [9] têm destacado que a crescente utilização de cargas indutivas e equipamentos eletromecânicos intensificou os problemas relacionados ao consumo de potência reativa, tornando o controle do fator de potência uma estratégia fundamental para a melhoria da eficiência energética, da qualidade da energia e da confiabilidade dos sistemas elétricos [6-9].

Entre as cargas associadas ao baixo fator de potência destacam-se os motores de indução. Segundo [10], esses equipamentos necessitam de uma corrente de magnetização para estabelecer o fluxo magnético no entreferro, sendo essa parcela predominantemente reativa e praticamente constante para uma tensão de alimentação fixa. [11] complementam afirmando que, quando o motor opera em vazio ou com baixo carregamento, a potência ativa requerida limita-se essencialmente às perdas mecânicas e magnéticas, enquanto a potência reativa permanece praticamente inalterada. Como consequência, o fator de potência assume valores reduzidos, elevando a potência aparente demandada pelo sistema e aumentando a corrente elétrica na instalação.

Resultados semelhantes foram observados por [12] para transformadores de potência operando em vazio ou submetidos a pequenas cargas. Os autores verificaram que a corrente de excitação necessária para magnetizar o núcleo representa uma parcela significativa da potência reativa absorvida, ao passo que a potência ativa se restringe principalmente às perdas no ferro e nos enrolamentos. Dessa forma, transformadores que operam por longos períodos com baixo carregamento contribuem para o aumento da demanda de potência reativa do sistema e para a redução da qualidade da energia elétrica.

No caso dos sistemas de iluminação, [13] demonstraram que lâmpadas de descarga equipadas com reatores eletromagnéticos apresentam comportamento semelhante ao de outras cargas indutivas. A indutância do reator, necessária para limitar a corrente e estabilizar a operação da lâmpada, demanda potência reativa para o estabelecimento do campo magnético. [14] ressalta que, na ausência de dispositivos de compensação, como bancos de capacitores ou reatores eletrônicos com correção ativa, a potência reativa absorvida pode representar parcela significativa da potência aparente do circuito, reduzindo o fator de potência do sistema de iluminação.

Além das características construtivas das cargas, as condições operacionais também influenciam o fator de potência. [15] observaram que, para equipamentos cuja impedância de magnetização pode ser considerada aproximadamente constante, a potência reativa varia aproximadamente com o quadrado da tensão de alimentação. De forma semelhante, [16] verificaram que elevações da tensão provocam aumento mais expressivo da potência reativa do que da potência ativa, reduzindo ainda mais o fator de potência e intensificando a circulação de potência reativa nas redes elétricas. Em ambientes industriais, esse cenário é agravado pela ampla utilização de fornos de indução, fornos a arco elétrico, máquinas de soldagem, bombas, tornos, retíficas e outros acionamentos eletromecânicos com elevada demanda de potência reativa.

No contexto do equipamento analisado neste trabalho, os tornos mecânicos são considerados consumidores significativos de potência ativa e reativa, uma vez que seus motores elétricos necessitam de potência reativa para estabelecer o campo magnético nos enrolamentos [17]. Em determinadas condições de operação, esses equipamentos podem apresentar baixos fatores de potência, especialmente quando a demanda de potência reativa é elevada em relação à potência ativa.

Os tornos mecânicos são máquinas-ferramenta utilizadas para usinar peças por meio da remoção de material com uma ferramenta de corte. Durante o processo, a peça é fixada à placa de fixação e colocada em movimento de rotação pelo eixo-árvore, possibilitando a realização das operações de usinagem [5].

Do ponto de vista do sistema elétrico, os efeitos do baixo fator de potência são amplamente discutidos na literatura. [18] demonstrou que, para uma mesma potência ativa, a redução do fator de potência implica aumento da potência aparente e, conseqüentemente, da corrente elétrica necessária para alimentar a carga. Esse aumento de corrente provoca maiores perdas por efeito Joule nos condutores, uma vez que tais perdas são proporcionais ao quadrado da corrente elétrica. [19] acrescentam que o aumento da corrente também intensifica as quedas de tensão ao longo dos alimentadores, reduzindo a qualidade da energia elétrica fornecida e comprometendo a estabilidade operacional das redes de distribuição e transmissão.

Outro impacto relevante refere-se à utilização da infraestrutura elétrica instalada. Conforme discutido por [6], o maior carregamento de transformadores, cabos, dispositivos de proteção e demais equipamentos reduz a capacidade disponível para alimentação de novas cargas, promovendo a subutilização da capacidade instalada. Parte da potência aparente do sistema passa a ser ocupada pela circulação de potência reativa, diminuindo a eficiência global da instalação e podendo antecipar investimentos em expansão da infraestrutura elétrica.

Além dos aspectos técnicos, o baixo fator de potência também produz consequências econômicas. [20] destaca que unidades consumidoras sujeitas à cobrança por energia reativa excedente podem sofrer penalidades tarifárias quando operam com fator de potência inferior aos limites estabelecidos pela regulamentação. [6] e [7] reforçam que a correção do fator de potência por meio da compensação de potência reativa constitui uma das principais estratégias para redução de custos operacionais, melhoria da eficiência energética e aumento da capacidade de utilização das instalações elétricas industriais.

2.2. Qualidade da energia elétrica

O termo qualidade da energia elétrica está associado ao conjunto de fenômenos que ocorrem em sistemas elétricos de potência e que influenciam as formas de onda de tensão e corrente, podendo resultar em falhas ou no funcionamento inadequado de equipamentos. Essas perturbações podem manifestar-se em qualquer segmento do sistema elétrico, tanto nas redes das concessionárias quanto nas instalações consumidoras [21].

De acordo com [22], os indicadores de qualidade da energia elétrica podem ser classificados em dois grupos: regime permanente ou transitório. No primeiro grupo incluem-se a tensão em regime permanente, o fator de potência, as distorções harmônicas, o desequilíbrio de tensão e a flutuação de tensão. Já no segundo grupo, enquadram-se as variações de tensão de curta duração, subdivididas em variações momentâneas e variações temporárias de tensão.

2.3. Fator de potência

O fator de potência é um índice que calcula a parcela da energia total (energia aparente) fornecida para uma instalação que efetivamente é convertida em trabalho útil (potência ativa). A outra parcela (energia reativa) é usada para manter os campos magnéticos e elétricos necessários para o funcionamento de equipamentos como motores elétricos [4].

Dessa forma, o fator de potência pode ser definido como a relação que existe entre a potência ativa e a potência aparente. Esta relação pode ser vista na Equação 1.

$$F_p = \frac{P}{S} \quad (1)$$

Onde, P = potência ativa (kW); S = potência aparente (kVA).

Adicionalmente, sabendo que a corrente elétrica é uma função complexa compreendida por uma parte real e uma parte imaginária, pode-se afirmar que a parte real está relacionada à potência ativa e a imaginária à potência reativa. Essa parte de energia reativa existe devido à defasagem angular entre a tensão e a corrente elétrica. Deste modo, o fator de potência também pode ser calculado conforme a Equação 2 [4].

$$F_p = \cos |\theta_v - \theta_i| \quad (2)$$

Onde, Fp = fator de potência; θ_v = ângulo de defasagem da tensão (°); θ_i = ângulo de defasagem da corrente (°).

É importante destacar que a redução do fator de potência implica no aumento da corrente total demandada pela instalação elétrica, mesmo em condições de potência ativa aproximadamente constante. Esse comportamento ocorre em razão da elevação da potência aparente associada ao maior consumo de energia reativa, resultando em maiores solicitações de corrente nos condutores e equipamentos do sistema. Como consequência, podem ocorrer sobrecargas em linhas de transmissão, redes de distribuição e subestações, além do aumento das perdas elétricas por efeito Joule, comprometendo a eficiência energética e as condições operacionais do sistema elétrico [5]. Dito isto, corrigir o fator de potência é uma estratégia utilizada para minimizar essas consequências negativas.

2.4. Correção do fator de potência

A correção do fator de potência traz benefícios tanto para as indústrias quanto para as concessionárias de energia elétrica. Para a indústria, pode-se citar a diminuição da conta de energia elétrica, o aumento da eficiência de energia e o aumento da vida útil das instalações e equipamentos. Para as concessionárias, a correção do fator de potência diminui os custos de geração, aumenta a capacidade do sistema de transmissão e distribuição, além de proporcionar que o bloco de energia reativa deixe de circular no sistema de transmissão e distribuição [23].

Para a correção do fator de potência, primeiro é necessário analisar a instalação elétrica de modo a quantificar o fator de potência e verificar se está dentro dos valores mínimos estabelecidos em norma. Em caso negativo, o segundo procedimento é tentar, de algum modo, deixar o fator de potência com o mínimo estabelecido em norma, ou até mesmo com fator de potência unitário, que é quando há a máxima eficiência da utilização de energia elétrica [2].

[5] cita três maneiras de elevar o fator de potência, sendo uma delas a utilização de um capacitor ou banco de capacitores para compensação da energia reativa. De modo geral, para o sistema de compensação de energia por meio de capacitores, é necessário calcular a potência capacitiva através da Equação 3. E, para saber qual capacitor é capaz de gerar essa potência reativa, a Equação 4 pode ser utilizada [24].

$$Q_{\text{capacitor}} = P * [\text{tg}(\cos^{-1}(F_{p1})) - \text{tg}(\cos^{-1}(F_{p2}))] \quad (3)$$

$$C = \frac{Q_{\text{capacitor}}}{V_{\text{FF}}^2 \cdot 2\pi \cdot f \cdot 10^{-9}} \quad (4)$$

Onde $Q_{\text{capacitor}}$ é a potência reativa do capacitor (kVar); P é a potência ativa demandada pela carga (kW);

Fp_1 é o fator de potência medido; Fp_2 é o fator de potência desejado após correção; C é a capacitância (μF); V_{FF} é a tensão fase-fase (V); e f é a frequência (Hz).

Para uma máquina como o torno mecânico, equipamento foco do presente estudo, a correção do fator de potência é fundamental, pois ele necessita de altas demandas de energia reativa para seu funcionamento, especialmente quando funciona com cargas abaixo da nominal. Assim sendo, no tópico a seguir será abordado todo o processo de medição, bem como os materiais utilizados e os dados obtidos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, serão descritos os métodos utilizados para atingir o objetivo proposto no estudo. O esquema da Figura 1 descreve as etapas adotadas no desenvolvimento da presente pesquisa.

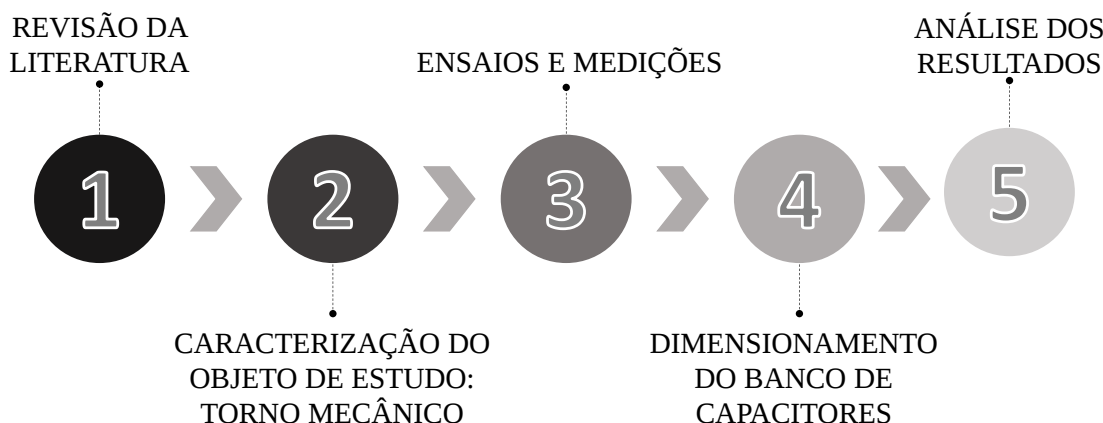


FIGURA 1. Esquema metodológico (autoria própria).

- i. Revisão da literatura e levantamento normativo: inicialmente, realizou-se uma revisão bibliográfica com o objetivo de fundamentar teoricamente a problemática do baixo fator de potência em sistemas elétricos industriais. Foram abordados conceitos relacionados à potência reativa, à qualidade da energia elétrica, aos impactos técnicos e econômicos do baixo fator de potência, bem como métodos de compensação por meio de bancos de capacitores. Paralelamente, realizou-se um levantamento das normas e regulamentações aplicáveis às medições e à cobrança de energia reativa pelas concessionárias de energia elétrica.
- ii. Caracterização do objeto de estudo: nesta etapa, realizou-se a caracterização do equipamento analisado, no caso, um torno mecânico instalado no laboratório de usinagem de uma instituição de ensino. Foram levados em consideração aspectos como potência nominal, regime de operação, local de instalação e tempo médio de utilização. Essas informações foram utilizadas para compreender o perfil de consumo do local e subsidiar as etapas posteriores da pesquisa.
- iii. Ensaios experimentais e medições elétricas: com base na caracterização do equipamento, foram conduzidos ensaios experimentais em condições reais de operação do equipamento objeto do estudo. Durante os testes, foram monitoradas grandezas elétricas relevantes, como tensão, corrente, potência ativa, potência reativa e fator de potência, a fim de avaliar o comportamento elétrico do sistema e identificar os níveis de demanda reativa associados ao funcionamento do equipamento.
- iv. Dimensionamento do banco de capacitores: a partir dos dados obtidos nos ensaios, realizou-se o dimensionamento de bancos de capacitores para compensação da potência reativa. Foram considerados quatro cenários distintos de compensação, descritos entre as seções 4.2.1 e 4.2.4. O objetivo é analisar diferentes condições operacionais e identificar a alternativa mais adequada para a correção do fator de potência da instalação.
- v. Análise dos resultados: por fim, os resultados obtidos foram analisados de forma comparativa, considerando a redução da potência reativa demandada, a elevação do fator de potência e os impactos na qualidade da energia elétrica da instalação. A análise permitiu identificar o cenário de compensação mais eficiente, evidenciando a contribuição do banco de capacitores para a melhoria do desempenho elétrico do sistema.

O presente estudo busca avaliar a influência do fator de potência na qualidade da energia elétrica, oriunda da potência reativa gerada por um torno mecânico instalado em um laboratório de usinagem de uma instituição de ensino. A partir disso, a subseção seguinte descreve o objeto de estudo, ou seja, o equipamento torno mecânico, bem como suas características nominais de potência e horas de uso. Em sequência, na Subseção 3.2, serão descritos os ensaios e medições realizados. Ressalta-se que as etapas metodológicas foram realizadas conforme o trabalho original de [5].

3.1. Torno mecânico

O torno mecânico utilizado neste estudo está localizado nas dependências laboratoriais de uma instituição de ensino. Tal equipamento é do modelo ND-220 GOLD da marca Nardini S.A., com ligação trifásica [25]. A Figura 2 ilustra a placa contida na parte externa do torno, com algumas especificações técnicas.



FIGURA 2. Placa externa com especificações (autoria própria).

Para uma máquina como o torno, por exemplo, que é um equipamento bastante utilizado nas indústrias metalúrgicas e que necessita de altas demandas de energia reativa para seu funcionamento, especialmente quando funciona com cargas abaixo da nominal, a correção do fator de potência é fundamental.

Dito isso, no tópico a seguir será abordado como se deu todo o processo de medição, bem como os materiais utilizados e dados obtidos através dos ensaios.

3.2. Ensaios e medições

A princípio, foi feito o levantamento da periodicidade de utilização do torno através de um diálogo com os técnicos responsáveis pelo laboratório para poder determinar os melhores dias para fazer as medições. Foi visto que, em sua maioria, o torno mecânico é utilizado durante um terço do período letivo, no qual são realizadas aulas práticas com a turma durante aproximadamente 1h e 30min e em dois dias da semana. Devido a esse fato, foi estabelecido que a correção mais adequada para o equipamento seria a do tipo individual, ou seja, quando o capacitor é ligado junto ao equipamento que se quer melhorar o fator de potência.

Sabendo que a cobrança de reativos é realizada conforme estabelecido pela Resolução Normativa nº 1000 de 2021 [26], observou-se que a norma determina que o fator de potência, seja indutivo ou capacitivo, tem como limite mínimo para consumidores do grupo A o valor de 0,92. Assim, para fins de faturamento, as concessionárias devem considerar como excedentes os valores de energia reativa que ultrapassem o limite correspondente ao fator de potência de 0,92. Entre as 23h30 e 6h30, essa cobrança aplica-se apenas aos fatores de potência capacitivos inferiores a 0,92, verificados a cada hora. Já no período complementar diário, a cobrança incide sobre os fatores de potência indutivos inferiores a 0,92, também avaliados em intervalos de uma hora.

Dessa forma, optou-se por fazer as medições durante a utilização do equipamento pelo técnico do laboratório, simulando o seu uso pelos discentes, de modo a verificar o comportamento das variáveis que influenciam o fator de potência durante seu funcionamento. Cada simulação teve duração de aproximadamente 30 minutos de pleno funcionamento, complementada pelas medições realizadas 10 minutos antes do ligamento da máquina e 10 minutos depois do desligamento do equipamento, para avaliar efetivamente a influência do torno quando inserido na rede.

O equipamento utilizado na medição foi o analisador de energia da INSTRUTHERM®, modelo AE-100. Ele armazena os dados de acordo com um intervalo de tempo definido, sendo de 5 s, 30 s, 1 min ou 2 min. Como as medições foram feitas em um curto intervalo de tempo, escolheu-se o de 5 s para que houvesse uma maior precisão dos dados.

Ao término das medições, foi obtido um total de 1207 leituras, sendo cada uma delas composta pela tensão, corrente, potências totais do circuito (ativa, reativa e aparente), fator de potência, ângulo de defasagem de cada fase e do neutro, frequência da rede e corrente no neutro.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a realização dos ensaios experimentais em condições reais de operação do torno mecânico em estudo, foi analisado o comportamento elétrico do sistema, identificando-se os níveis de demanda de potência reativa associados ao funcionamento do equipamento, conforme apresentado no Item 4.1 da Seção 4. Em seguida, no Item 4.2, foram considerados quatro cenários distintos para o dimensionamento de bancos de capacitores, com o objetivo de identificar a alternativa mais adequada para a correção do fator de potência da instalação. No Item 4.3, foram comparados os parâmetros de qualidade da energia elétrica antes e após a aplicação dos bancos de

capacitores dimensionados, a fim de identificar o cenário de melhor desempenho. Por fim, no Item 4.4, os resultados obtidos para o cenário selecionado foram discutidos e confrontados com a revisão da literatura apresentada na Seção 2.

4.1. Resultado do ensaio

Os dados obtidos pelo analisador de energia foram migrados para o *software* Excel® e plotados em gráficos para melhor interpretação e manipulação e, assim, foram realizados os cálculos pertinentes ao dimensionamento do banco de capacitores. Os gráficos com os valores de potência ativa obtidos nos dois dias de análise estão contidos na Figura 3 e na Figura 4, respectivamente. Na Figura 5 e na Figura 6 estão os gráficos com os valores medidos de potência reativa e nas Figuras 7 e 8 encontram-se os gráficos com os valores obtidos de potência aparente. Já na Figura 9 e na Figura 10 estão contidos os gráficos com os valores de fator de potência medidos, bem como o fator de potência médio calculado. Por último, estão os gráficos com os valores das correntes totais, nas Figuras 11 e 12. É importante ressaltar que os gráficos com os valores medidos no primeiro dia de medição encontram-se à esquerda, enquanto os gráficos com os valores obtidos no segundo dia estão à direita. Em todas as figuras estão apresentados os momentos em que o torno é ligado e desligado.

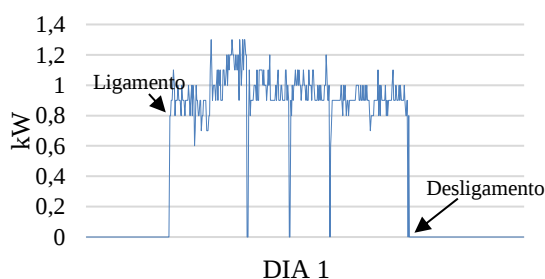


FIGURA 3. Potência ativa 1ª medição (autoria própria).

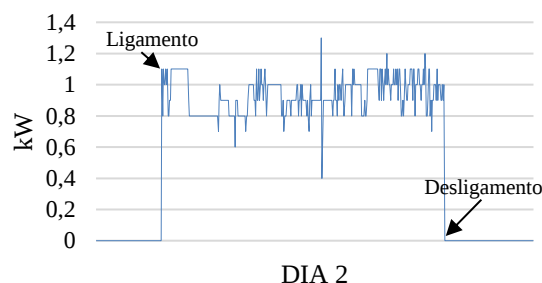


FIGURA 4. Potência ativa 2ª medição (autoria própria).

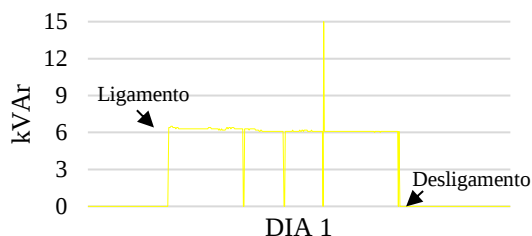


FIGURA 5. Potência reativa 1ª medição (autoria própria).

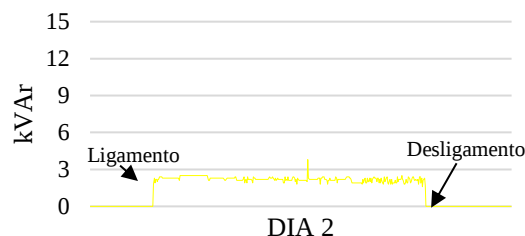


FIGURA 6. Potência reativa 2ª medição (autoria própria).

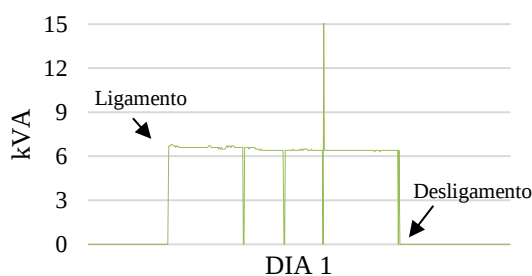


FIGURA 7. Potência aparente 1ª medição (autoria própria).

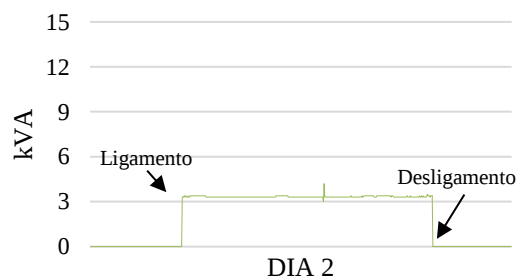


FIGURA 8. Potência aparente 2ª medição (autoria própria).

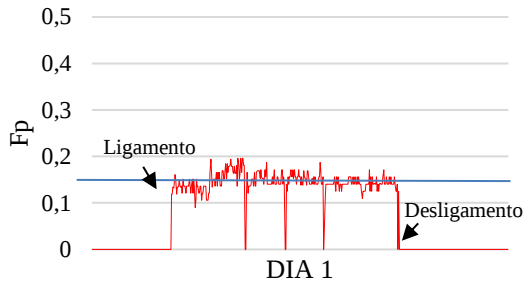


FIGURA 9. Fator de potência 1ª medição (autoria própria).

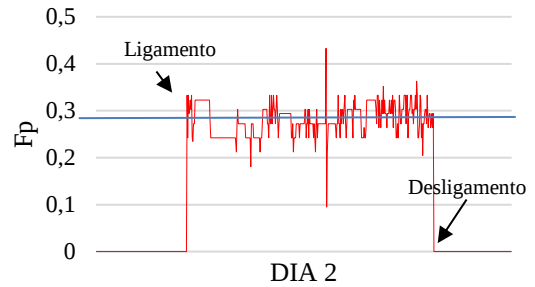


FIGURA 10. Fator de potência 2ª medição (autoria própria).

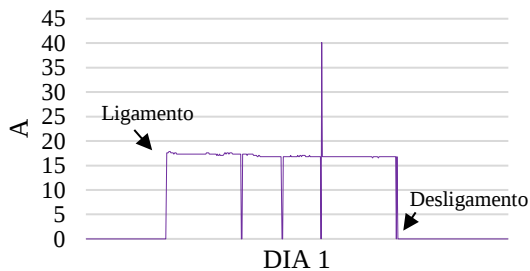


FIGURA 11. Corrente total 1ª medição (autoria própria).

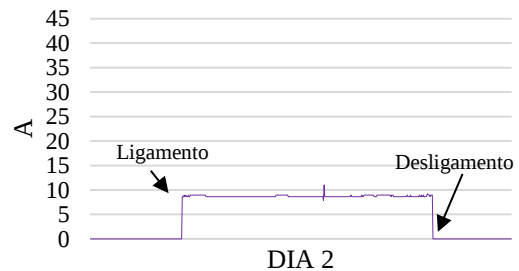


FIGURA 12. Corrente total 2ª medição (autoria própria).

Como pode ser visto na Figura 9 e na Figura 10, o torno apresenta fatores de potência muito abaixo do recomendado por norma, que deve ser de 0,92, o que pode ser explicado pela grande quantidade de potência reativa que é utilizada pelo mesmo (Figura 5 e Figura 6), quando comparada com a potência ativa que é consumida (Figura 3 e Figura 4).

Como já foi abordado em tópicos anteriores, o baixo fator de potência é um indicador de má qualidade da energia elétrica e causa perdas na rede, podendo gerar cobranças de multas por reativos à unidade consumidora. Desta forma, é necessária a utilização de mecanismos que elevem este parâmetro. No presente estudo, o meio escolhido foi o uso de capacitores, por ser o mais econômico e versátil entre os citados no trabalho de [5].

Assim sendo, optou-se pela ligação do banco de capacitores do tipo individual, uma vez que as medições foram feitas apenas observando a influência de um único equipamento. Por isso, o banco deve ser instalado junto à carga, ou seja, o torno mecânico, como mostra a Figura 13. É importante ressaltar que, caso ele seja ligado de outra forma, a mesma eficiência não poderá ser garantida.

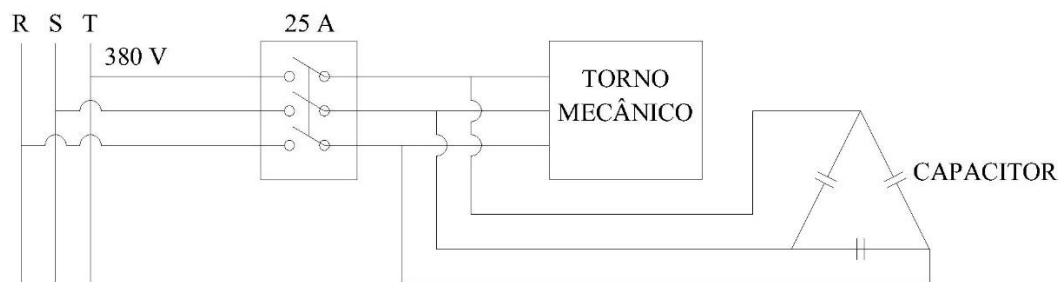


FIGURA 13. Ligação do capacitor ao torno mecânico (autoria própria).

Após localizar o ponto de instalação do banco de capacitores, é necessário dimensionar a sua potência, mas, para isso, consideraram-se quatro cenários. Os itens 4.2.1, 4.2.2, 4.2.3 e 4.2.4 explicam e demonstram cada um dos cenários, de modo a verificar qual deles apresenta melhor sistema de compensação.

4.2. Dimensionamento do banco de capacitores

A partir dos dados obtidos nos ensaios, realizou-se o dimensionamento de bancos de capacitores para compensação da potência reativa; para isso, consideraram-se quatro cenários.

4.2.1. Cenário 1

Como as medições foram feitas antes, durante e depois da utilização do torno, foi possível notar que quando o torno é ligado, há uma grande demanda de potência (potência aparente), sendo que uma pequena parte é de potência ativa e todo o resto é de potência reativa indutiva.

No primeiro dia de medição, foi possível observar que existe um ponto que destoa dos outros valores; este é o instante de demanda máxima de potência reativa, com valor de 15 kVAr (Figura 5). Nesse mesmo instante, a potência ativa é de 0,6 kW (Figura 3), a potência aparente é de 15,3 kVA (Figura 7), o fator de potência é de 0,039 (Figura 9) e a corrente é de 23,25 A (Figura 11). O ponto que se destaca na segunda medição apresenta uma potência ativa de 0,4 kW (Figura 4), potência reativa de 3,8 kVAr (Figura 6), potência aparente de 4,2 kVA (Figura 8), fator de potência de 0,095 (Figura 10) e corrente de 6,38 A (Figura 12).

Com estes dois pontos, foi escolhido aquele que teve maior parcela de potência reativa e, então, foram extraídos sua potência ativa e seu fator de potência. Também foi estimado atingir, após a correção, um valor de 0,95 indutivo de fator de potência. Assim, usando a Equação 3, foi calculada a necessidade de um banco de capacitores de 15,175 kVAr, como mostra a Equação (5).

$$Q_{\text{capacitor}} = 0,6 * [\text{tg}(\cos^{-1}(0,039)) - \text{tg}(\cos^{-1}(0,95))] \quad (5)$$

Comercialmente, não há um banco de capacitores que atenda especificamente a esta potência reativa. O mais próximo é o de 15 kVAr da empresa WEG S.A., cujo código é 11313821 e série E para 380 V, que é a tensão de operação do torno [27]. Para este instante de demanda máxima de potência reativa, com a utilização desse capacitor, o fator de potência sobe para 1, o que está acima do 0,95 estimado, pois o valor comercial mais próximo é igual à máxima potência reativa indutiva medida durante o ensaio. Com o aumento do fator de potência, a potência aparente reduziria de 15,3 kVA para 0,6 kVA e a corrente cairia de 23,25 A para 0,92 A.

4.2.2. Cenário 2

No segundo cenário desconsiderou-se o pico obtido nas medições do primeiro dia de medição, justificado pelo fato de aparecer apenas uma vez nas medições e em um intervalo de tempo relativamente pequeno. Então, considerado o instante que possuía a segunda maior demanda de potência reativa, visto que apareceu com maior frequência no decorrer da análise, para fins de cálculo, a potência reativa considerada é de 6,5 kVAr, a potência ativa de 0,9 kW, uma potência aparente de 6,8 kVA, um fator de potência de 0,132 e a corrente de 10,33 A. Com posse desses valores, foi calculado uma nova potência reativa capacitiva para se obter o fator de potência de 0,95, como mostra a Equação (6)

$$Q_{\text{capacitor}} = 0,9 * [\text{tg}(\cos^{-1}(0,132)) - \text{tg}(\cos^{-1}(0,95))] \quad (6)$$

Através da Equação 6, foi obtida uma potência reativa de 6,46 kVAr. Como comercialmente não há essa potência, foi escolhido o mais próximo, que é o de 6,67 kVAr da WEG S.A., cujo código é 10630798 e série C para 380 V [28].

Através da Equação 2 foi calculado o novo fator de potência para este cenário, quando considerado o banco de capacitores da Figura 19. Foi obtido um valor de fator de potência de 0,98, valor acima do estimado, mas explicado pelo fato do banco possuir uma potência reativa relativamente acima da dimensionada. Com o aumento do fator de potência, a potência reativa reduziu de 6,5 kVAr para 0,17 kVAr, a aparente diminuiu de 6,8 kVA para 0,916 kVA e a corrente foi de 10,33 A para 1,4 A.

4.2.3. Cenário 3

Para o Cenário 3, foi considerado o maior valor de potência reativa detectada no segundo dia de medição, mas após a eliminação do pico observado nesse dia. Este instante possui o valor de 0,8 kW de potência ativa, 2,5 kVAr de potência reativa, 3,3 kVA de potência aparente, 0,242 de fator de potência e corrente de 5,02 A. Com esses valores, foi calculada uma nova potência reativa capacitiva para se obter o fator de potência de 0,95, como mostra a Equação (7).

$$Q_{\text{capacitor}} = 0,8 * [\text{tg}(\cos^{-1}(0,242)) - \text{tg}(\cos^{-1}(0,95))] \quad (7)$$

Com o uso da Equação 7, foi obtida uma potência reativa de 2,95 kVAr. Comercialmente não há banco de capacitores com esse valor específico. O mais próximo é o de 3,33 kVAr da WEG S.A., cujo código é 11488809 série B para 380 V [29].

Através da Equação 2 foi calculado o fator de potência para este cenário, considerando a instalação do banco da Figura 20. Um valor de 0,69 de fator de potência foi obtido, sendo abaixo do esperado. Com o aumento do fator de potência, a potência reativa caiu de 2,5 kVAr para 0,83 kVAr, a aparente caiu de 3,3 kVA para 1,15 kVA e a corrente caiu de 5,02 A para 1,75 A.

4.2.4. Cenário 4

Por fim, no último cenário, ou seja, no Cenário 4, foram desconsiderados os picos e foi feita uma média entre o maior valor de potência reativa do primeiro dia de medição (6,5 kVAr) e o do segundo dia de medição (2,5 kVAr), obtendo-se um valor de aproximadamente 4,5 kVAr. Comercialmente, o capacitor de valor mais próximo é de 5 kVAr, da WEG S.A., cujo código é 10045951, série B, para 380 V [30]. Essa média foi feita tentando buscar um capacitor que pudesse ajustar o fator de potência aos valores de medição dos dois dias.

Utilizando o banco da Figura 21 para corrigir os instantes utilizados nos cálculos do Cenário 2 e do Cenário 3, através da Equação 2, tem-se, respectivamente, os valores de 1,5 kVAr e 2,5 kVAr para a potência reativa, 1,75 kVA e 2,62 kVA para a potência aparente, 0,51 e 0,30 para o fator de potência e 2,65 A e 3,99 A para a corrente elétrica.

Após o estudo detalhado de cada cenário, o Item 4.3 ilustrará o comportamento das variáveis analisadas simulando a inserção dos capacitores de cada cenário.

4.3. Análise dos dados antes e após a correção do fator de potência

No presente item são comparados os parâmetros de qualidade da energia elétrica antes e depois de uma possível utilização dos capacitores dimensionados no Item 3.

Após a escolha dos bancos de capacitores nos Cenários 1, 2, 3 e 4, foi feita a simulação de como se comportariam as variáveis envolvidas no sistema sem e com o banco de capacitores conectado. Os dados obtidos para os dois dias com o capacitor de 15 kVA (dimensionado no Cenário 1) foram inseridos nos gráficos da Figura 14 e Figura 15 (potência reativa), Figura 16 e Figura 17 (potência aparente), Figura 18 e Figura 19 (corrente elétrica), Figura 20 e Figura 21 (fator de potência), junto com os dados medidos (na cor cinza), para uma melhor comparação.

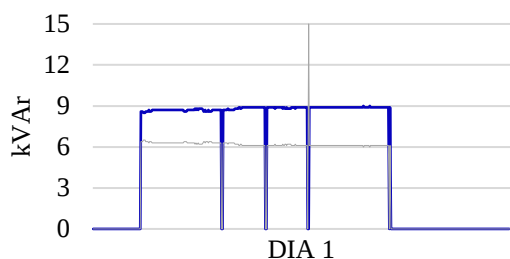


FIGURA 14. Dia 1 - Potência reativa do Cenário 1 antes e após a correção do fator de potência (autoria própria).

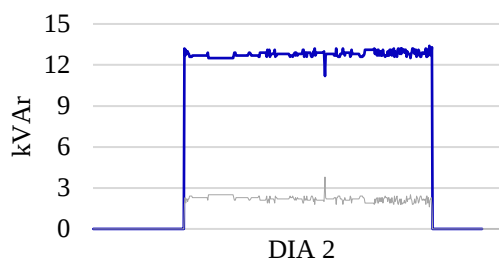


FIGURA 15. Dia 2 - Potência reativa do Cenário 1 antes e após a correção do fator de potência (autoria própria).

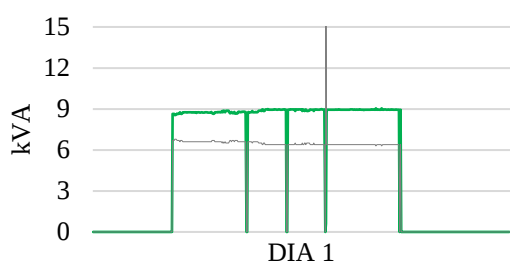


FIGURA 16. Dia 1 - Potência aparente do Cenário 1 antes e após a correção do fator de potência (autoria própria).



FIGURA 17. Dia 2 - Potência aparente do Cenário 1 antes e após a correção do fator de potência (autoria própria).

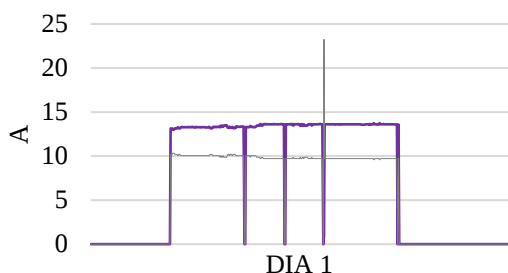


FIGURA 18. Dia 1 – Corrente elétrica do Cenário 1 antes e após a correção do fator de potência (autoria própria).



FIGURA 19. Dia 2 – Corrente elétrica do Cenário 1 antes e após a correção do fator de potência (autoria própria).

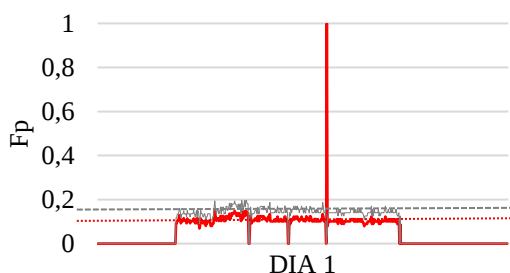


FIGURA 20. Dia 1 – Fator de potência do Cenário 1 antes e após a correção do fator de potência (autoria própria).

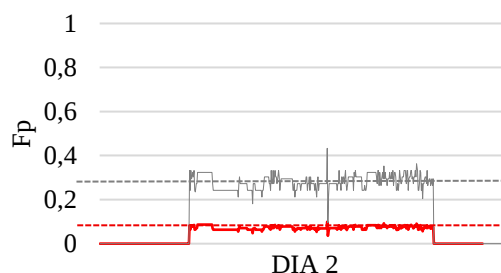


FIGURA 21. Dia 2 – Fator de potência do Cenário 1 antes e após a correção do fator de potência (autoria própria).

Analisando a potência reativa, potência aparente, corrente elétrica total e fator de potência antes e depois da inserção do banco de capacitores, para ambos os dias, foi possível observar que já não haveria mais energia reativa indutiva. Entretanto, como o valor usado como base para a obtenção do banco de capacitores no Cenário 1 está muito acima da média, a simulação mostra que isso faria com que houvesse um crescimento de energia reativa, mas agora de caráter capacitivo. Por conta disso, o fator de potência continuaria baixo e menor do que o valor medido.

Através das Figuras 15, 17 e 19 também é possível observar que, no segundo dia, haveria um aumento mais significativo das potências reativa e aparente e da corrente (respectivamente), chegando a ultrapassar 3 vezes os valores medidos in loco.

Da mesma forma como foi feito para o capacitor de 15kVAr, foram plotados gráficos que representassem o comportamento da potência reativa, potência aparente, corrente total e fator de potência para a instalação elétrica antes (em cinza) e após a correção do fator de potência, sendo que agora utilizando o capacitor calculado no Cenário 2, ou seja, um banco de capacitores de 6,67 kVAr, como mostram as Figuras 22 e 23, 24 e 25, 26 e 27, 28 e 29, respectivamente.

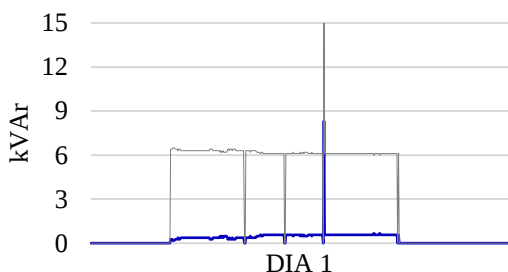


FIGURA 22. Dia 1 – Potência reativa do Cenário 2 antes e após a correção do fator de potência (autoria própria).

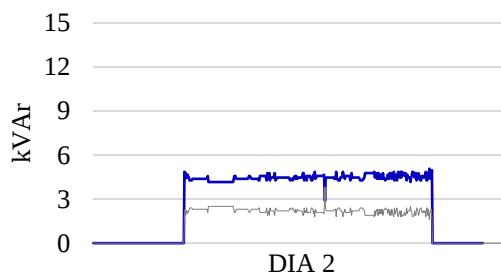


FIGURA 23. Dia 2 – Potência reativa do Cenário 2 antes e após a correção do fator de potência (autoria própria).

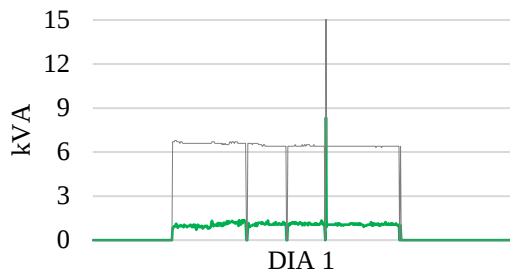


FIGURA 24. Dia 1 – Potência aparente do Cenário 2 antes e após a correção do fator de potência (autoria própria).

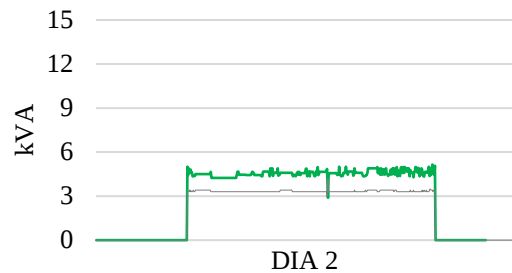


FIGURA 25. Dia 2 – Potência aparente do Cenário 2 antes e após a correção do fator de potência (autoria própria).

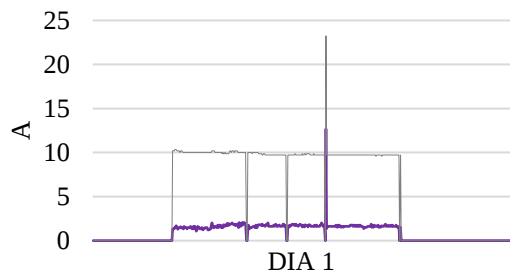


FIGURA 26. Dia 1 – Corrente elétrica do Cenário 2 antes e após a correção do fator de potência (autoria própria).

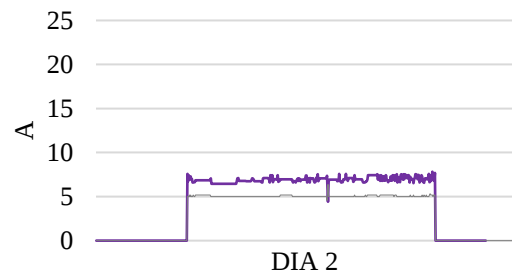


FIGURA 27. Dia 2 – Corrente elétrica do Cenário 2 antes e após a correção do fator de potência (autoria própria).

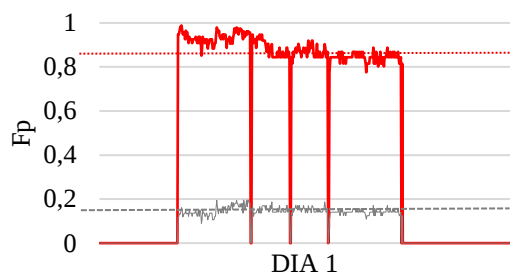


FIGURA 28. Dia 1 – Fator de potência do Cenário 2 antes e após a correção do fator de potência (autoria própria).

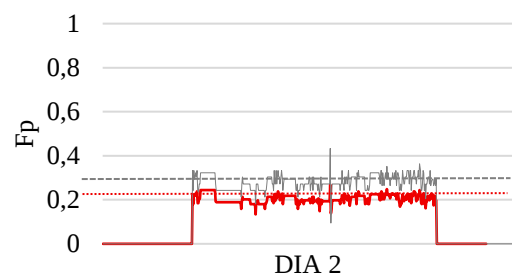


FIGURA 29. Dia 2 – Fator de potência do Cenário 2 antes e após a correção do fator de potência (autoria própria).

Observando a Figura 22, percebe-se que no Dia 1 haveria uma grande diminuição do reativo e, portanto, um aumento do fator de potência (Figura 28), uma diminuição na potência aparente (Figura 24) e, conseqüentemente, redução na corrente total (Figura 26) solicitada pelo equipamento objeto do estudo.

Porém, se o mesmo banco for tomado como base para a correção do fator de potência no segundo dia de medição, percebe-se, pela Figura 23, que uma situação similar àquela em que se utilizou o capacitor de 15 kVAR voltaria a se repetir, ou seja, a potência reativa indutiva desapareceria, porém, surgiria uma potência reativa capacitiva maior do que a anterior. Como, dependendo da atividade realizada, o turno pode solicitar da rede elétrica situações similares às medidas tanto no Dia 1 como no Dia 2, e o objetivo deste trabalho também é garantir a melhoria da qualidade da energia elétrica, não faria sentido utilizar um banco que em uma situação vai ajudar e em outra pode até aumentar o problema.

De forma análoga ao que foi feito com os cenários anteriores, os valores obtidos com as medições in loco foram inseridos no mesmo gráfico da simulação que considera a inserção do capacitor de 3,33 kVAR no sistema (Cenário 3). O objetivo é fazer uma análise comparativa do comportamento da potência reativa, potência aparente, corrente total e fator de potência antes (em cinza) e após a correção do fator de potência, como mostram as Figuras 30 e 31, Figuras 32 e 33, Figuras 34 e 35, Figuras 36 e 37, respectivamente.

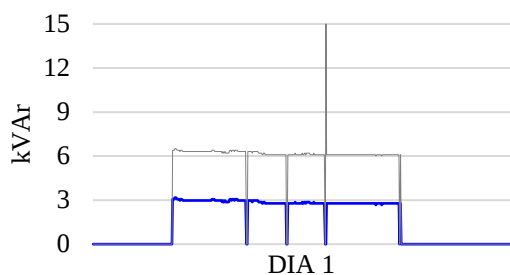


FIGURA 30. Dia 1 – Potência reativa do Cenário 3 antes e após a correção do fator de potência (autoria própria).

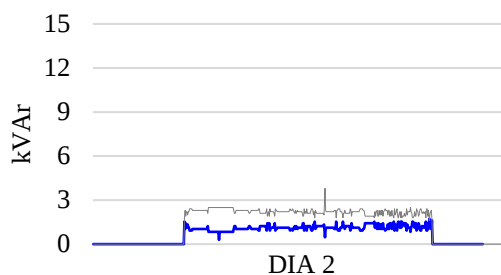


FIGURA 31. Dia 2 – Potência reativa do Cenário 3 antes e após a correção do fator de potência (autoria própria).

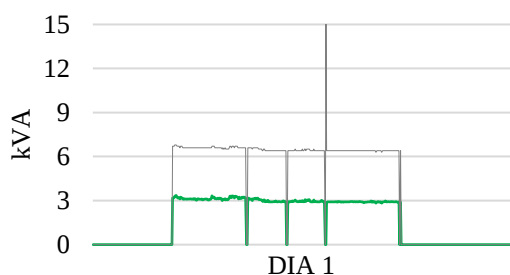


FIGURA 32. Dia 1 – Potência aparente do Cenário 3 antes e após a correção do fator de potência (autoria própria).

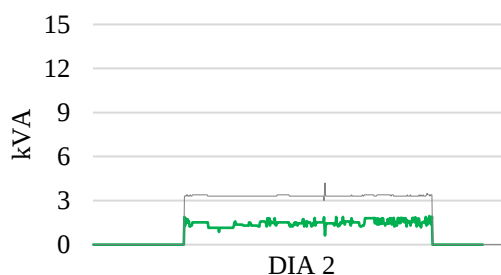


FIGURA 33. Dia 2 – Potência aparente do Cenário 3 antes e após a correção do fator de potência (autoria própria).

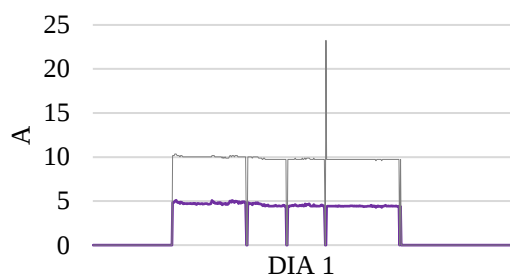


FIGURA 34. Dia 1 – Corrente elétrica do Cenário 3 antes e após a correção do fator de potência (autoria própria).

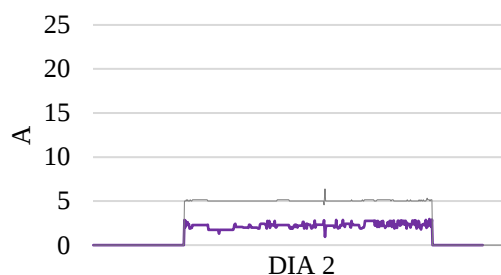


FIGURA 35. Dia 2 – Corrente elétrica do Cenário 3 antes e após a correção do fator de potência (autoria própria).

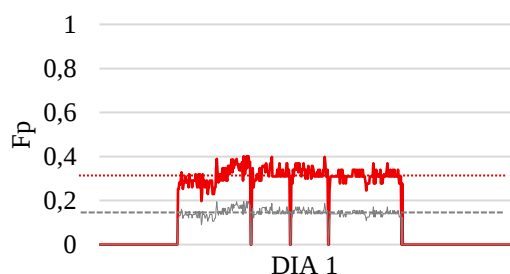


FIGURA 36. Dia 1 – Fator de potência do Cenário 3 antes e após a correção do fator de potência (autoria própria).

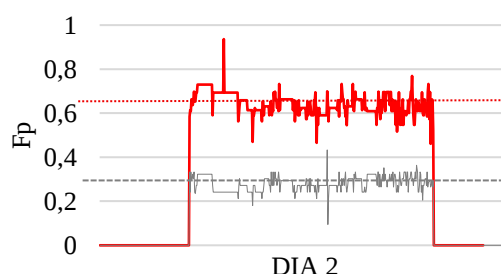


FIGURA 37. Dia 2 – Fator de potência do Cenário 3 antes e após a correção do fator de potência (autoria própria).

Através da Figura 36 e da Figura 37, percebe-se que foi dimensionado um banco de capacitores que conseguiria aumentar o fator de potência para as duas medições, ou seja, um banco para um ponto médio entre as medições. Após a análise da Figura 30 e da Figura 31, pode ser visto que, se for utilizado um banco de 3,3 kVAr, para o primeiro dia de análise, a potência reativa indutiva cairia pela metade e, para o segundo dia de medição, a potência reativa indutiva desapareceria, porém, apareceria um reativo capacitivo, mas com valor menor do que foi

medido. Com isso, em ambos os dias, observa-se uma diminuição considerável da potência aparente (Figura 32 e Figura 33) e da corrente elétrica (Figura 34 e Figura 35), chegando a quase 50% de redução em cada parâmetro.

Fazendo o mesmo que foi feito com todos os outros cenários, os valores medidos *in loco*, sem a presença de banco de capacitores (em preto), foram plotados no mesmo gráfico da simulação que considera a inserção de um banco de capacitores de 5 kVAr, dimensionado no Cenário 4. Os gráficos que representariam o comportamento da potência reativa, potência aparente, corrente total e fator de potência após a correção são ilustrados na Figura 36 e Figura 37, Figura 38 e Figura 39, Figura 40 e Figura 41, Figura 42 e Figura 43, respectivamente.

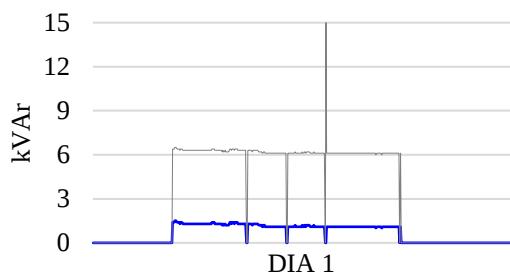


FIGURA 36. Dia 1 – Potência reativa do Cenário 4 antes e após a correção do fator de potência (autoria própria).

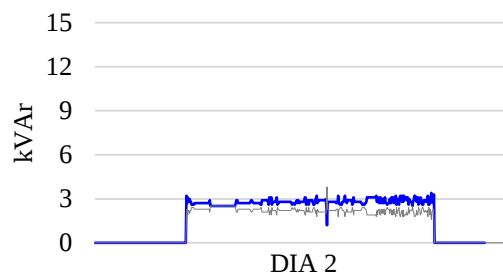


FIGURA 37. Dia 2 – Potência reativa do Cenário 4 antes e após a correção do fator de potência (autoria própria).

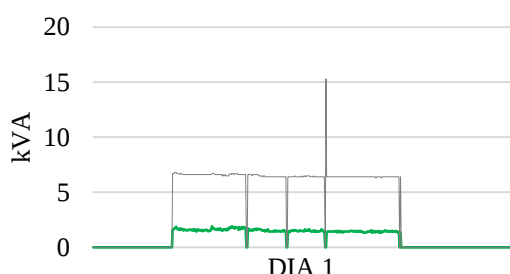


FIGURA 38. Dia 1 – Potência aparente do Cenário 4 antes e após a correção do fator de potência (autoria própria).

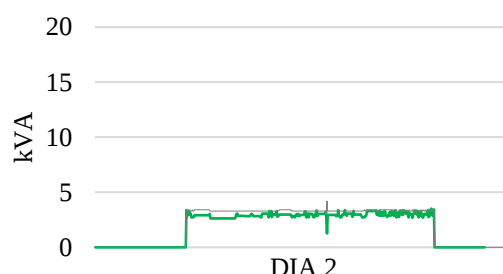


FIGURA 39. Dia 2 – Potência aparente do Cenário 4 antes e após a correção do fator de potência (autoria própria).

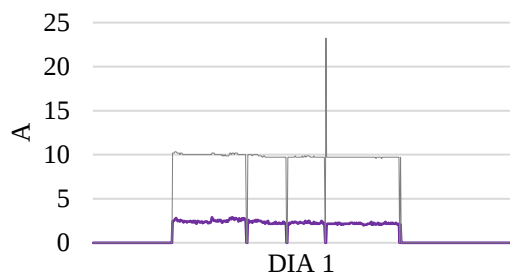


FIGURA 40. Dia 1 – Corrente elétrica do Cenário 4 antes e após a correção do fator de potência (autoria própria).

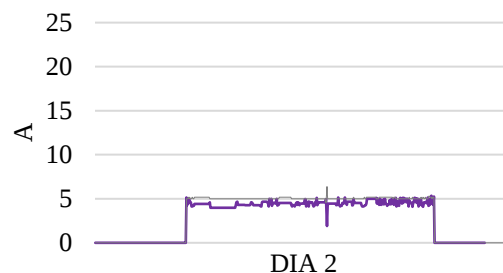


FIGURA 41. Dia 2 – Corrente elétrica do Cenário 4 antes e após a correção do fator de potência (autoria própria).

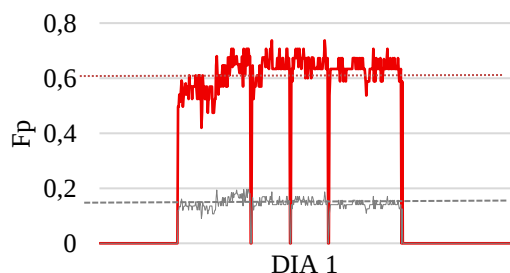


FIGURA 42. Dia 1 – Fator de potência do Cenário 4 antes e após a correção do fator de potência (autoria própria).

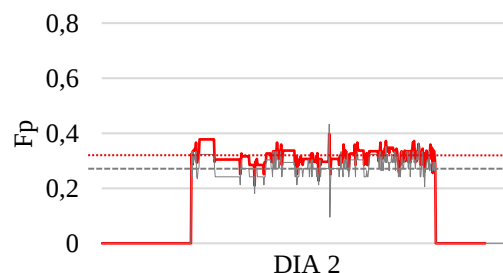


FIGURA 43. Dia 2 – Fator de potência do Cenário 4 antes e após a correção do fator de potência (autoria própria).

Ao utilizar o banco dimensionado no Cenário 4 na simulação correspondente ao primeiro dia, a potência reativa indutiva (Figura 36) reduziria consideravelmente, chegando a valores próximos a 1 kVAr. Para a simulação referente ao segundo dia, de forma análoga ao que aconteceria com a inserção do banco dimensionado no Cenário 3, apareceria um reativo capacitivo (Figura 37), porém ainda maior que o anterior.

Para o primeiro dia, o fator de potência (Figura 42) aumentaria bastante, chegando a valores próximos a 0,75. Para o segundo dia, também haveria um crescimento do fator de potência (Figura 43), porém pouco significativo. Como a corrente elétrica é influenciada pela potência aparente, haveria uma grande queda no valor para o Dia 1 (Figura 40), porém, para o Dia 2, a queda seria quase insignificante, como mostra a Figura 41.

No Item 4.4, os resultados serão discutidos e confrontados com a revisão da literatura apresentada no Item 2.2.

4.4. Discussão dos resultados

A análise comparativa dos quatro cenários avaliados evidencia a influência direta do dimensionamento do banco de capacitores sobre o comportamento elétrico da instalação, especialmente no que se refere ao equilíbrio entre potência ativa, potência reativa, potência aparente e fator de potência. De maneira geral, os resultados demonstram que a correção do fator de potência em cargas indutivas variáveis não depende apenas da eliminação da potência reativa indutiva, mas também do ajuste adequado entre a compensação capacitiva e o perfil dinâmico de operação da carga, conforme apontado na literatura [19] [6].

No Cenário 1, observou-se uma condição típica de supercompensação severa, na qual o banco de capacitores foi dimensionado acima da necessidade real da instalação. Embora tenha ocorrido eliminação da potência reativa indutiva, o sistema passou a operar com predominância de potência reativa capacitiva, resultando em fator de potência ainda baixo e comportamento instável entre os dois dias de medição. Esse cenário evidencia que o excesso de compensação pode ser tão prejudicial quanto a deficiência de potência reativa, uma vez que provoca aumento da potência aparente e da corrente elétrica em determinadas condições operacionais, conforme já relatado na literatura para sistemas com compensação inadequada [15-16].

O Cenário 2 apresentou desempenho satisfatório apenas para uma das condições de operação analisadas. No primeiro dia, houve redução significativa da potência reativa, melhora do fator de potência e diminuição da corrente elétrica, indicando uma condição de compensação adequada. Entretanto, no segundo dia, o sistema voltou a apresentar comportamento de supercompensação, ainda que menos acentuado que no Cenário 1. Esse resultado evidencia a limitação de bancos de capacitores fixos quando aplicados a cargas com variação operacional significativa, como é o caso do torno mecânico estudado. A literatura aponta que esse tipo de carga apresenta variações de demanda de potência reativa em função do regime de operação, o que dificulta o estabelecimento de um ponto fixo de compensação eficiente para todos os cenários de funcionamento [8] [10].

No Cenário 3, observou-se um melhor desempenho entre as alternativas analisadas. O banco de capacitores intermediário permitiu uma redução consistente da potência reativa nos dois dias de medição, evitando tanto a subcompensação quanto a supercompensação significativa. Como consequência, houve redução expressiva da potência aparente e da corrente elétrica em ambas as condições de operação, indicando maior estabilidade e robustez do sistema de compensação. Esse comportamento está em consonância com estudos que destacam que a compensação ótima de potência reativa deve buscar um ponto de equilíbrio que minimize a circulação de reativos sem inverter o fluxo de potência no sistema, garantindo melhoria consistente do fator de potência em diferentes regimes operacionais [19].

O Cenário 4 apresentou comportamento intermediário, com melhoria significativa do fator de potência apenas em uma das condições de operação. Embora tenha promovido redução da potência reativa e da corrente elétrica no primeiro dia, no segundo dia sua eficácia foi reduzida, com leve aumento de potência reativa capacitiva e pequena variação no fator de potência e na corrente. Esse resultado reforça que a proximidade do ponto ótimo de compensação não garante necessariamente robustez frente à variabilidade operacional da carga, especialmente em sistemas sujeitos a variações dinâmicas de carga mecânica e regime de funcionamento.

A comparação entre os quatro cenários permite concluir que o desempenho do sistema de compensação está associado ao nível de aderência entre o banco de capacitores e o comportamento real da carga. Os cenários 1 e 2 evidenciam os efeitos negativos do dimensionamento inadequado, seja por supercompensação ou por dependência de uma condição específica de operação. O Cenário 4, embora tecnicamente viável em determinados regimes, mostrou-se instável frente às variações operacionais. Em contrapartida, o Cenário 3 apresentou o melhor desempenho na redução de potência reativa, na estabilidade do fator de potência e na diminuição da corrente elétrica.

Com relação à qualidade da energia elétrica, os resultados corroboram a literatura ao demonstrar que a compensação de potência reativa deve ser projetada considerando o perfil de carga e sua variabilidade temporal, e não apenas valores instantâneos ou extremos de operação. Isso porque a potência aparente e a corrente elétrica são diretamente influenciadas pelo balanço entre potência ativa e reativa, de modo que desvios do ponto ótimo de compensação resultam em perdas de eficiência e possível deterioração da qualidade da energia fornecida [15] [6].

Assim, conclui-se que, entre os cenários analisados, o Cenário 3 representa a solução mais adequada para a instalação estudada, por proporcionar o melhor equilíbrio entre eficiência energética e estabilidade operacional, demonstrando que o dimensionamento intermediário do banco de capacitores constitui a estratégia mais eficiente para cargas com comportamento variável, como o torno mecânico analisado.

5. CONCLUSÃO

Durante a análise dos dados, foi observado que a energia magnetizante solicitada para o funcionamento do torno mecânico contribui para a redução do fator de potência e, consequentemente, para a qualidade da energia elétrica. No caso específico do torno mecânico, apenas de 10% e 35% da energia fornecida pela rede elétrica é efetivamente convertida em trabalho, evidenciando um aproveitamento bastante ineficiente da energia disponível.

Ao tentar diminuir a potência reativa com o uso de capacitores, foi visto que não é tão fácil eliminar todos os reativos em virtude da variação da carga acoplada ao equipamento e das peculiaridades de cada trabalho executado, fazendo com que na maioria das situações, o fator de potência não fique dentro do limite estabelecido pela ANEEL.

Como o torno mecânico é um equipamento que possui uma diversidade de utilização, sua potência demandada estará em concordância com a atividade executada e dependerá da corrente e da tensão elétrica, que são termos variantes no tempo. Por conta disso, o torno nunca irá apresentar uma grande regularidade de potência reativa, fazendo com que, quando se usa um instante específico como referência para dimensionar o banco de capacitores, alguns instantes sejam corrigidos e, em outros momentos, o uso do banco possa até aumentar a potência reativa.

Deste modo, foi concluído que, para garantir a qualidade da energia elétrica do laboratório, são necessárias medições durante um período mais longo, como os valores médios obtidos na fatura mensal de energia elétrica. Desta forma, como sugestão, poderia ser feita uma análise mais precisa da energia demandada pelo torno mecânico durante este intervalo, para assim ter como base a faixa de potência reativa mais requerida pelo equipamento.

Para o caso estudado, foi visto que o capacitor de 3,3 kVAr, dimensionado no Cenário 3, é o que melhoraria de forma mais efetiva o fator de potência da instalação. Em ambos os dias, esse banco de capacitores diminuiria a potência reativa em aproximadamente 50% e, consequentemente, reduziria a potência aparente e a corrente elétrica. A potência ativa não seria afetada, pois ela não é influenciada pelo fator de potência, representando apenas a potência útil utilizada pela máquina.

Ao introduzir o banco de capacitores ao sistema, além da redução da potência reativa indutiva e do aumento do fator de potência, haverá uma menor demanda por energia, pois a potência aparente se reduz. As perdas por efeito Joule também se amortizam, pois a corrente diminui, evitando uma redução no tempo de vida dos equipamentos.

Se for levada em consideração a cobrança por reativos, o banco de capacitores a ser usado deveria ser o de 5 kVAr (Cenário 4). Afinal, como o torno é usado apenas durante os períodos da manhã e da tarde e o banco seria instalado individualmente ao equipamento, as cobranças por excedentes de reativo capacitivo não existiriam, pois elas só são contabilizadas das 23h30min às 6h30min, conforme explicado no Item 3.2.

Finalmente, com o presente estudo, foi visto que, para uma redução mais efetiva da energia reativa do laboratório oriunda dos tornos mecânicos, seria necessário realizar o estudo durante todo o período letivo e obedecer às regras de leitura estabelecidas nas normas vigentes ou utilizar um medidor de energia especificamente para esse local, pois ajudaria na precisão para o dimensionamento do capacitor e, consequentemente, uma redução na cobrança por excedentes reativos. Além disso, é necessária também a análise dos outros itens da qualidade da energia elétrica, como as harmônicas, que podem influenciar diretamente o rendimento dos capacitores e a vida útil dos equipamentos.

REFERÊNCIAS

- [1] DELGADO, J. D. B. Gestão da qualidade total aplicada ao sector do fornecimento da energia eléctrica. Doutorado (Dissertação) – Curso de Engenharia Eletrotécnica, Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2002.
- [2] CREDER, H. Instalações Elétricas. 15. ed. Rio de Janeiro: LTC Editora AS, 2007.
- [3] MAMEDE FILHO, J. Instalações elétricas industriais. 7. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2007.
- [4] COTRIM, A. A. M. B. Instalações elétricas. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.
- [5] FALCÃO FILHO, J. S.; GUERRA, M. I. S.; VIEIRA, R. G. Análise da influência da potência reativa de um torno mecânico do laboratório de usinagem da Ufersa no fator de potência da instalação. Trabalho de Conclusão de Curso, Bacharelado em Ciência e Tecnologia, Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, RN, 2017.
- [6] SIDHU, A. S. et al. Power factor improvement and reactive power management in industrial systems. *Energies*, 2021.
- [7] ALVES, A. F. et al. Eficiência energética e correção do fator de potência em instalações industriais. *Revista Brasileira de Energia*, 2020.

- [8] DENKENA, B.; HEIDE, M.; BÖTTCHER, T. Power factor optimization in industrial manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Processes*, 2026.
- [9] KARA, S.; LI, W. Unit process energy consumption models for material removal processes. *CIRP Annals*, v. 60, n. 1, p. 37–40, 2011.
- [10] OLIVO, M. et al. A new method for the accurate prediction of on-load power factor in two-pole induction motors considering shaft eddy currents. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, v. 35, n. 3, p. 1196–1207, 2020. DOI: 10.1109/TEC.2020.2976617.
- [11] ULIANA, L. S.; GASTALDINI, C. C.; TISCHER, C. B. Revisão sobre as principais técnicas de controle para motores de indução. *Ciência e Natura*, v. 42, 2020. DOI: 10.5902/2179460X40520.
- [12] KOLCUN, M. et al. Active and Reactive Power Losses in Distribution Transformers. *Acta Polytechnica Hungarica*, v. 17, n. 1, p. 161–174, 2020. DOI: 10.12700/APH.17.1.2020.1.9.
- [13] MOLINA, J.; SAINZ, L.; MONJO, L. Model of discharge lamps with saturated magnetic ballast and non-square arc voltage. *Electric Power Systems Research*, v. 104, p. 42–51, 2013.
- [14] ALONSO, J. M. Electronic Ballasts. In: RASHID, M. H. (ed.). *Power Electronics Handbook*. 3. ed. Oxford: Elsevier, 2011.
- [15] TÉLLEZ, A. et al. Voltage control and reactive power management in distribution systems. *Electric Power Systems Research*, 2018.
- [16] KOSOBUDZKI, K. et al. Reactive Power Compensation for Single-Phase AC Motors Using Integral Power Theory. *Energies*, v. 18, n. 10, 2025. DOI: 10.3390/en18102641.
- [17] Freire, J. M. *Torno Mecânico, Livros Técnicos e Científicos*. ed. S.^a, Rio de Janeiro, 1984.
- [18] OLIVEIRA, C. C. B. *Fator de Potência em Sistemas Elétricos*. São Paulo: Edgard Blücher, 2000.
- [19] MOHANTY, S.; KISHOR, N.; RAY, P. K. Optimal reactive power compensation in electrical distribution systems with distributed resources: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 91, p. 695–728, 2018.
- [20] DUALIBE, A. *Fator de Potência e Energia Reativa*. São Paulo: Érica, 2000.
- [21] OLIVEIRA, J. C. Projeto SIDAQUEE. *Qualidade da energia elétrica: definição e análise dos itens de qualidade*. Cap.II, Universidade Federal de Uberlândia, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica, Grupo de Qualidade e Racionalização da Energia Elétrica, 2000.
- [22] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. Resolução Normativa nº 956, de 7 de dezembro de 2021. Aprova os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 8 – Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica. Brasília, DF, 2021.
- [23] SILVA, M. C. I. Correção do fator de potência de cargas industriais com dinâmica rápida. Mestrado (Dissertação) – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.
- [24] DUALIBE, P. *Capacitores: Instalação e correção do fator de potência*. São Paulo, 2000.
- [25] INDÚSTRIAS NARDINI S.A. Nodus ND – 220. Disponível em: <<https://nardinisa.com.br/produto/nodus-nd-220/>>. Acesso em: 24 maio 2026
- [26] BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa ANEEL nº 1.000, de 7 de dezembro de 2021. Estabelece as regras de prestação do serviço público de distribuição de energia elétrica, revoga as Resoluções Normativas ANEEL nº 414/2010, nº 470/2011, nº 901/2020 e dá outras providências. *Diário Oficial da União: Seção 1*, Brasília, DF, n. 231, p. 109, 9 dez. 2021.
- [27] MERCADO LIVRE. Unidade Capacitiva Trifásica WEG 15 kVAR 380 V UCWT15V40N22HD. Disponível em: <<https://www.mercadolivre.com.br/unidade-capacitiva-trifasica-weg-15kvar-380v-ucwt15v40n22hd/up/MLBU1720028318>>. Acesso em: 24 de maio de 2026.

- [28] WEG. Unidade Capacitiva Monofásica UCW6,67V40-M10. Disponível em: <<https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Automação-e-Controle-Industrial/Controls/Capacitores-e-Correção-do-Fator-de-Potência/Capacitores-para-Correção-do-Fator-de-Potência/Unidade-capacitiva-monofásica/UNIDADE-CAPACITIVA-UCW6%2C67V40-M10/p/10630797>>. Acesso em: 24 de maio de 2026.
- [29] MOVESTOCK. Capacitor Monofásico WEG UCW 333 V40 – cód. 11488809 – 33,3kvar. Disponível em: <https://movestock.com/insumos-industriais/eletronicos/componentes_eletronicos/produto/capacitor-monofasico-weg-ucw-333-v40-cod-11488809-333kvar-1?srsltid=AfmBOop7i3oxZAbuSyb3ux-9Az7Ds8yPiRY6wyAkoYQtUIZ4mEOpxHr6>. Acesso em: 24 maio 2026.
- [30] MERCADO LIVRE. Capacitor Correção Fator Potência Mono 380 V 5 kVAR WEG. Disponível em: <<https://www.mercadolivre.com.br/capacitor-correcao-fator-potencia-mono-380v-5kvar-weg/up/MLBU1385285768>>. Acesso em: 24 de maio de 2026.