

REDUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA DE MOTORES ELÉTRICOS AO EMPREGAR ACIONAMENTO POR MEIO DE INVERSORES DE FREQUÊNCIA

Bruna Resende¹; Giovanne Manzan¹; João Pedro Santos¹; Marcelo Lucas¹; Lucas de Oliveira Estevam²; Leandro Aureliano da Silva¹; Antonio Manoel Batista da Silva^{1,2}

¹Universidade de Uberaba – Uniube

² Programa de pós-graduação em Engenharia Química – Universidade de Uberaba - Uniube

Autor correspondente: antonio.manoel@uniube.br

RESUMO

Este trabalho aborda a eficiência energética em um sistema elétrico que possui um motor de indução trifásico, inicialmente acionado por uma *soft starter*, que apresentou a viabilidade de substituição por um acionamento com inversor de frequência. O estudo apresenta como base um sistema de exaustão utilizado em uma indústria de produção de chapas de madeira, o qual trabalha com a sua potência máxima durante todo o processo. Por meio de testes em laboratório, foi possível demonstrar que a aplicação adequada do sistema de acionamento é capaz de contribuir para a redução de custos com energia elétrica. Como consequência, também aumenta a expectativa de vida útil do motor, resultando na diminuição dos custos de manutenção. Assim, os resultados indicam a viabilidade da utilização de inversores de frequência para o tipo de sistema de produção.

Palavras-chave: Acionamentos de Máquinas. Energia. Máquinas elétricas. Eficiência energética.

ABSTRACT

This work addresses energy efficiency in an electrical system that has a three-phase induction motor, initially driven by a soft starter, which is expected to be replaced by a frequency inverter drive. The study presents as a basis an exhaust system used in a wooden sheet production industry, which works at maximum power throughout the process. Through laboratory tests, it was possible to demonstrate that an adequate application of the operating system can contribute to the reduction of energy costs. Therefore, it also increases the engine's useful life expectancy, resulting in reduced maintenance costs. Thus, the results indicate the use of frequency inverters for the type of production system.

Keywords: Machine Drives. Energy. Electric machines. Energy efficiency.

1. INTRODUÇÃO

Contemporaneamente, é inegável que um dos maiores custos quando se trata de uma indústria é referente ao consumo de energia elétrica, seja em sua planta, seja em seus domínios administrativos, ou até mesmo no armazenamento de seus produtos. De acordo o grupo ABB (2024), 45% da energia distribuída no planeta é consumida pelos motores elétricos, tanto industriais como prediais, sendo assim, é claro que eles são os maiores responsáveis pelos custos referentes a consumo elétrico de uma indústria (Capó, 2021). Entre eles, os motores de indução trifásico correspondem a maior parte da utilização industrial, e na grande maioria, possuem baixa eficiência e alto consumo (Bruno, 2018). Dessa forma, pensando em maneiras de diminuir o consumo de energia de uma planta, o presente trabalho levanta a seguinte questão: como reduzir o consumo de energia elétrica de um motor de indução trifásico de forma eficiente?

Para esse propósito, um sistema de exaustão industrial é analisado, para o qual é realizada a substituição de um acionamento de um motor elétrico com *soft starter* por um acionamento com inversor de frequência, e a partir dessa mudança, é investiga-se se ocorre uma redução significativa da potência demandada pelo motor, diminuindo o seu consumo de energia. Considerando a dinâmica da planta e com base em cálculos preliminares, utilizando um circuito ideal como referência, espera-se gerar uma economia de gasto de até 70%.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Nessa seção são abordados os seguintes tópicos a respeito do assunto em questão, quais sejam: consumo de energia, redução de consumo de energia



em unidades industriais, motores elétricos e inversores de frequência, potência em corrente alternada e fator de potência.

2.1 Consumo de energia

O consumo de energia é quanto de energia é empregada para efetuar um processo ou fazer funcionar um dispositivo ou equipamento durante um determinado intervalo tempo para realizar um determinado trabalho. Tal consumo de energia depende de dois atributos: da potência do aparato e de seu tempo de uso. A potência do equipamento é especificada pelo fabricante, e normalmente é em kW, e o tempo deve ser ajustado em horas. Dessa forma, para obter o consumo em kWh basta multiplicar a potência do equipamento pelo tempo em que ele permanece em operação.

Um ponto crucial é a noção de potência, que indica o fluxo de energia ao longo de um período específico, posto que “as distintas manifestações de energia existentes no mundo têm a capacidade de serem transformadas entre si, corroborando as leis das conversões de energia (Barreto, 2015). O consumo energia pode necessitar de, e abranger, diferentes áreas primárias. Dessa forma, o consumo de energia elétrica pode ser proveniente de combustíveis fósseis (petróleo, gás natural, carvão), de energia renovável (solar, eólica, hidráulica), resultando em transportes, aquecimento, refrigeração, iluminação, entre outros, de acordo com o EPE (2018). Esse consumo pode variar significativamente dependendo de vários fatores, como o tamanho do sistema ou dispositivo, a eficiência energética, o tempo de utilização e o tipo de atividades realizadas. De acordo com o BEN (2016), aproximadamente 30% da energia elétrica produzida no país é consumida pelo setor industrial. Assim, é possível observar que a indústria apresenta uma parcela de consumo considerável em relação ao que é gerado pelo sistema elétrico nacional.

2.2 Redução do consumo energético unidades industriais

A preocupação com a redução do consumo de energia remete às recentes crises energéticas no Brasil. É motivada também, seja pela necessidade da contenção de despesas operacionais e/ou pela tão difundida necessidade de redução dos impactos ambientais (Sousa e Silva, 2012). No âmbito empresarial, da mesma forma que na indústria, a relevância do controle nos gastos com energia está em constante ascensão. Fatores ligados à diminuição de despesas decorrentes da competitividade do mercado, incertezas quanto à disponibilidade de energia e restrições ambientais sustentam a necessidade de uma gestão mais eficiente desse recurso energético (Barreto, 2015).

Em nota publicada pela Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Conservação de Energia (ABESCO), em maio de 2017, o principal motivo do desperdício de energia elétrica é a desatualização de maquinário industrial, de





lâmpadas e de eletrodomésticos. A indústria é um setor que consome boa parte da energia gerada pelo sistema elétrico nacional, muitas vezes proveniente de fontes não renováveis. A redução do consumo energético ajudaria a diminuir as emissões de gases de efeito estufa e outros poluentes, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas e a preservação do meio ambiente (Sousa e Silva, 2012). Ao adotar medidas para reduzir o consumo energético, as indústrias podem melhorar sua eficiência energética. Isso significa utilizar menos energia para produzir a mesma quantidade de bens ou serviços, o que resulta em redução de custos operacionais. A energia economizada pode ser redirecionada para investimentos em outras áreas da empresa, melhorando assim a competitividade perante o mercado.

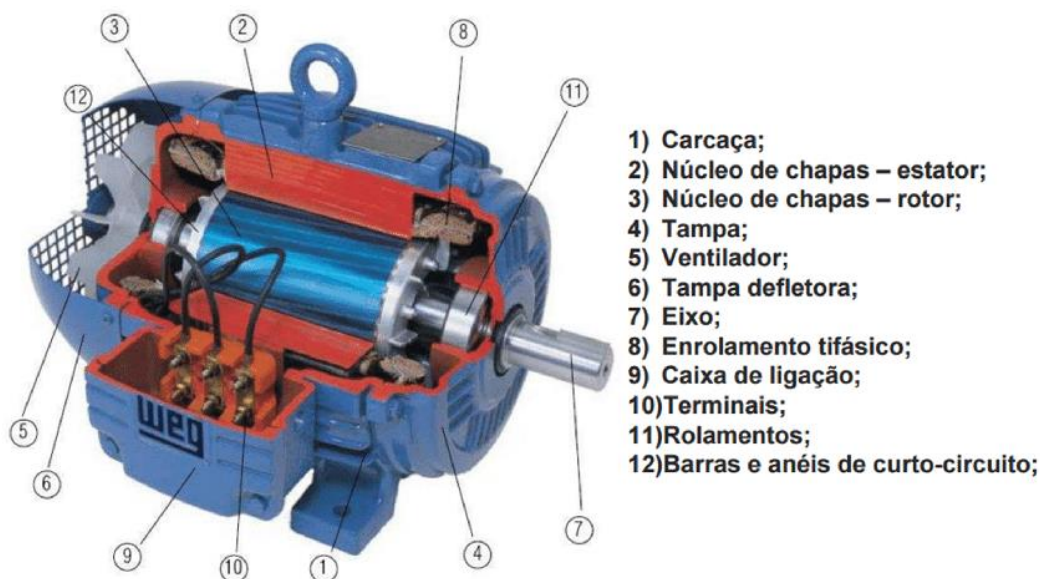
De outro modo, cada vez mais, as empresas em geral são cobradas por sua responsabilidade social e seu impacto no meio ambiente. A redução do consumo energético na indústria demonstra compromisso com a sustentabilidade e com a preservação dos recursos naturais para as gerações futuras. De acordo com Sousa e Silva (2012), empresas que adotam práticas sustentáveis e eficientes do ponto de vista energético são vistas com bons olhos por consumidores e investidores, que valorizam a responsabilidade ambiental. Sendo assim, para alcançar a redução do consumo energético no setor industrial, são necessárias diversas ações como: a implementação de sistemas de gestão energética, a adoção de tecnologias mais eficientes, o treinamento de funcionários para práticas sustentáveis e a avaliação constante do desempenho energético da empresa. O engajamento de toda a equipe e o estabelecimento de metas claras são fundamentais para obter resultados significativos na redução do consumo industrial de energia (Barreto, 2015).

2.3 Uma abordagem sobre os motores elétricos

Os motores elétricos de corrente alternada, principalmente os motores de indução são amplamente aplicados em indústrias, empresas comerciais e em residências. Esses motores convertem energia elétrica em energia mecânica e fornecem energia rotativa para muitos dispositivos, equipamentos e aparatos. Eles são conhecidos por sua eficiência energética, baixo custo de manutenção e baixo impacto ambiental em comparação com os motores de combustão interna. Os motores elétricos são usados também em veículos elétricos, eletrodomésticos, máquinas industriais, bombas de água, ventiladores e muitos outros dispositivos. Sua versatilidade e capacidade de ajustar a velocidade e o torque conforme necessário os tornam um facilitador essencial no avanço da engenharia elétrica (Sousa; Silva, 2012). Construtivamente, um motor elétrico consiste em um estator fixo e um rotor móvel. O estator abriga as bobinas condutoras enroladas em várias ranhuras do núcleo de ferro. E o rotor consiste em um eixo e um enrolamento acionado por eletricidade. As partes constituintes podem ser observadas na figura 1 a seguir:



Figura 1 – Motor de indução trifásico



Fonte: WEG (2024).

Quando a corrente passa pelo enrolamento do estator, um campo magnético é gerado. Este campo magnético interage com as bobinas do rotor, criando forças atrativas e repulsivas que vira o rotor (Bruno, 2018). A direção e a velocidade de rotação podem ser controladas ajustando a corrente elétrica fornecida ao motor. Com os progressos tecnológicos, os motores elétricos têm se tornado mais eficientes (Capó, 2021), compactos e potentes, contribuindo para a sustentabilidade ambiental (Araújo, 2003). A evolução tecnológica tem impulsionado o desenvolvimento contínuo dos motores elétricos, resultando em avanços significativos em sua linha construtiva. Hoje, existem diferentes tipos de motores elétricos, como motores de corrente contínua (DC) e motores de corrente alternada (AC), os motores de alto rendimento, os motores de passo, os motores de relutância, entre muitos outros, cada um com suas características específicas.

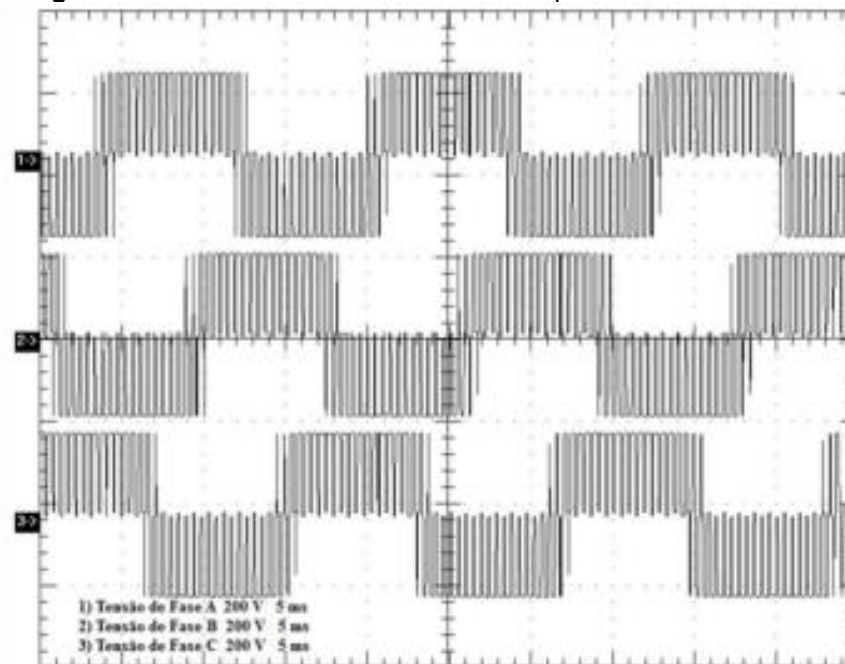
2.4 Inversores de Frequência

Muitos processos industriais necessitam do controle de velocidade de um motor elétrico para garantir seu pleno funcionamento de um determinado mecanismo. Porém, variar a velocidade de um motor elétrico não é uma tarefa fácil quando se trata de sistemas de corrente alternada, e são, nesses casos, que o inversor de frequência é amplamente utilizado. Seu funcionamento consiste na variação da frequência da tensão da fonte alimentadora por meio de alguns conversores, e dessa forma, o motor pode ser controlado de modo a prover um ajuste contínuo de velocidade e conjugado em relação a carga



mecânica (Franchi, 2008). Na figura 2, é possível observar como é o sinal de saída de um inversor de frequência em cada uma das fases: A, B, C, representadas pelos números: 1, 2, 3.

Figura 2 – Sinal de saída do inversor de frequência



Fonte: ServiceDrive (2024).

Como pode ser observado na imagem da figura 2, a saída do inversor não é uma onda senoidal perfeita, e especialmente em frequências mais altas pode haver distorção harmônica devido à modulação por largura de pulso, mas essa distorção é geralmente controlada para garantir a operação eficiente do motor elétrico de corrente alternada (Cordeiro, 2022). E de acordo com Bruno (2018), os inversores podem operar no modo vetorial ou escalar. O controle vetorial permite um controle mais preciso da velocidade e posição do motor, enquanto o controle escalar é mais simples embora seja adequado para muitas aplicações. Esses equipamentos na verdade possuem uma nomenclatura popular inadequada, posto que não “invertem” a frequência como a descrição sugere, mas sim a convertem, já que o sinal de saída continua semelhante ao sinal de entrada em termos de fase.

2.4.1 Composição dos Circuitos

Com o avanço da eletrônica de potência, o desenvolvimento desses equipamentos se deu por meio de dispositivos de estado sólido, inicialmente com tiristores e atualmente com transistores, do tipo IGBT (Franchi, 2008). Por meio de um processo de conversão CC - CA, o sinal de saída de um inversor possui frequência e magnitude controláveis, dessa forma, a velocidade do motor elétrico

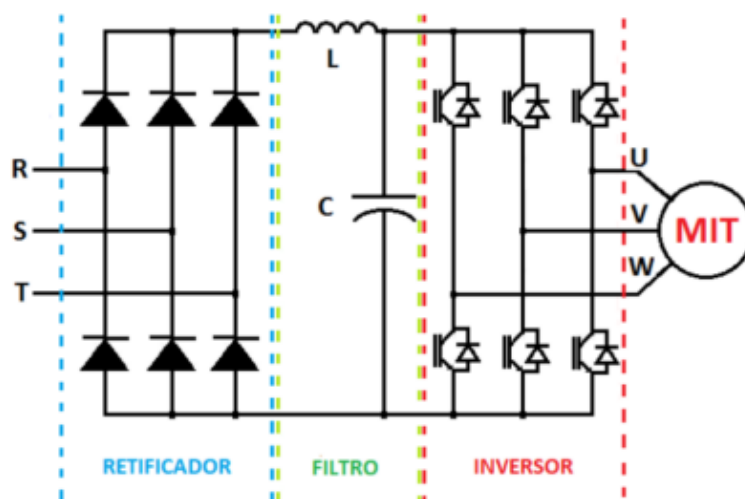


é modulada. De acordo com Bruno (2018), os inversores de frequência são constituídos basicamente de:

- retificador: converte o sinal alternado em sinal contínuo, geralmente composto por diodos;
- filtro/Barramento CC: regula a tensão retificada, amortecendo as oscilações no sinal contínuo;
- circuito Inversor: converte a tensão contínua do Barramento CC em tensão alternada novamente, é nesse circuito que ocorre a conversão da frequência. Composto de transistores IGBTs.

Pode-se observar (figura 3) como estes componentes estão dispostos nos inversores:

Figura 3 – Circuito interno simplificado




Fonte: Bruno (2018).

A tensão de saída varia conforme o tipo de acionamento de frequência do inversor, fornecendo uma corrente próxima da senoidal ao motor elétrico. O circuito de comando dos transistores é o elemento responsável pela geração dos pulsos de controle, a partir de microcontroladores e, atuando sobre a taxa de variação do chaveamento das bases, controla-se a frequência do sinal gerado (Franchi, 2008).

2.4.2 Vantagens e Desvantagens

Dentre as vantagens da utilização dos conversores de frequência, pode-se citar o aumento da vida útil do motor, assim como a redução nos desgastes mecânicos estruturais. Também, é possível citar a ausência de faíscamentos nas bobinas, e a possibilidade de trabalhar em rotações superiores as nominais do equipamento (Franchi, 2008). Velocidades baixas significam ciclos menores dos



rolamentos, ventoinhas e demais componentes. A frequência ajustável influencia positivamente na vida útil do motor. Com a utilização dos conversores, os motores de corrente alternada possuem as mesmas vantagens em relação aos motores de corrente contínua (Araújo, 2003). Em relação as desvantagens, os inversores de frequência possuem algumas características pontuais, conforme cita Cordeiro (2022): (1) o aumento de ruído no motor devido a frequência de chaveamento do sinal, (2) uma pequena perda energética devido a característica não totalmente senoidal da tensão nos terminais do motor e (3) uma significativa geração de harmônicos na rede elétrica.

2.4.3 Eficiência Energética

Com a utilização dos inversores de frequência para variação da velocidade, há a redução do consumo de energia elétrica, visto que, ao se reduzir a velocidade, reduz-se também a tensão e corrente do motor, logo, diminui-se o consumo energia (Araújo, 2003). Além das vantagens inerentes, há também a capacidade de redução do consumo de energia elétrica do motor, ocasionando em um sistema um pouco mais eficiente. Porém, essa redução é influenciada por diversos fatores do sistema, entre eles é possível destacar: o fator de potência do motor, assim como seu rendimento, a carga e o seu conjugado, o torque de partida e o torque nominal necessário, entre outros fatores físicos e operacionais do sistema em questão. De acordo com Bruno (2018), diversos estudos foram realizados com o propósito de padronizar e calcular a eficiência energética desse tipo de acionamento em relação aos tradicionais. Porém, devido a esses fatores, é muito complexo coletar dados suficientes para generalizar essas características. Dessa forma, um tipo de sistema é estudado e relacionado, seja sistema de bombeamento, exaustão ou transporte. É de conhecimento que apesar de haver uma redução no consumo, o inversor ocasiona perdas de energia, devido às características do seu sinal de saída.

2.4.4 Tipos de Controle

Existem três tipos principais de controle de frequência que os inversores podem se basear, (Cordeiro, 2022): (1) Os VFDs CSI (Inversores de Corrente de Fonte) destacam-se por sua capacidade regenerativa, permitindo a absorção do fluxo de energia de volta para a fonte de alimentação, embora demandem indutores volumosos e dispendiosos, (2) Os VFDs VSI (Inversores de Tensão de Fonte) apresentam limitações como fator de potência insatisfatório, risco de travamento do motor e ausência de regeneração, o que resulta em sua aplicação restrita, e (3) Os VFDs PWM (Modulação por Largura de Pulso) ganham preferência na indústria devido ao excelente fator de potência, eficiência elevada e baixo custo. Esses dispositivos utilizam pulsos de tensão de diferentes comprimentos para simular uma onda senoidal, sendo o transistor bipolar de porta isolada (IGBT) o componente atualmente adotado (Cordeiro, 2022).

2.5 Tipos de Potências

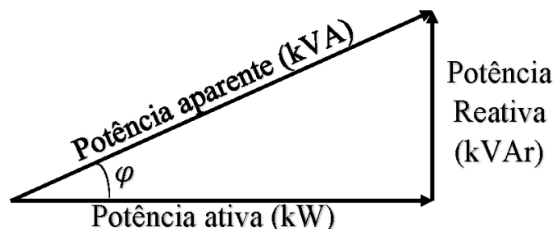
No contexto da alimentação em corrente alternada, algumas particularidades surgem em comparação com o suprimento em corrente contínua. Destaca-se a questão das potências, cujas características específicas do sinal elétrico introduzem diferenças notáveis entre ambas. É crucial compreender que as variações no fluxo de corrente alternada, ao contrário da corrente contínua constante, influenciam significativamente o comportamento e as propriedades das potências envolvidas (Sousa e Silva, 2012). Para Araújo (2003), as potências se dividem em:

- Potência Reativa: expressa em kVAr é a potência responsável por criar e manter os campos eletromagnéticos das cargas indutivas, sendo a energia que não é transformada efetivamente em trabalho.
- Potência Ativa: expressa em kW é a potência que é transformada em trabalho, gerando calor, luz, movimento. Também é denominada de potência útil, sendo responsável pela energia que é realmente transferida a carga.
- Potência Aparente: expressa em kVA representa a potência total que é entregue a carga, sendo responsável pela combinação da energia reativa e ativa.

2.6 Fator de Potência

Com seu valor máximo limitado a 1, o fator de potência é uma medida adimensional que representa a fração da potência aparente que efetivamente realiza trabalho. Este fator está relacionado ao cosseno do ângulo do triângulo de potências, mostrado na figura 4, “que é o ângulo de defasagem entre as formas de onda da tensão e da corrente em um sistema elétrico” (Barreto, 2015).

Figura 4 – Triângulo das Potências



Fonte: SKZ Engenharia (2024).

Pode-se calcular o fator de potência usando as razões trigonométricas, como mostrado na equação 1.


$$\text{Cos}\varnothing = \frac{P \text{ (KW)}}{S \text{ (KVA)}} \quad (1)$$

em que: $\text{cos}\varnothing$ é o fator de potência, P é a potência ativa e S é a potência aparente.

Um baixo fator de potência indica que o sistema é muito reativo, causando aquecimento desnecessário nos alimentadores e sobrecarga nos circuitos. A legislação brasileira que trata do fator de potência nas indústrias tem como base principal a resolução normativa ANEEL nº 414/2010, alterada pela resolução nº 569/2013, que estabelece as condições gerais de fornecimento de energia elétrica. De acordo com essa normativa, as unidades consumidoras industriais são incentivadas a manter um fator de potência igual ou superior a 0,92, visando otimizar a eficiência do sistema elétrico nacional. O não atendimento a esse requisito pode acarretar penalidades financeiras, conforme as regras estabelecidas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

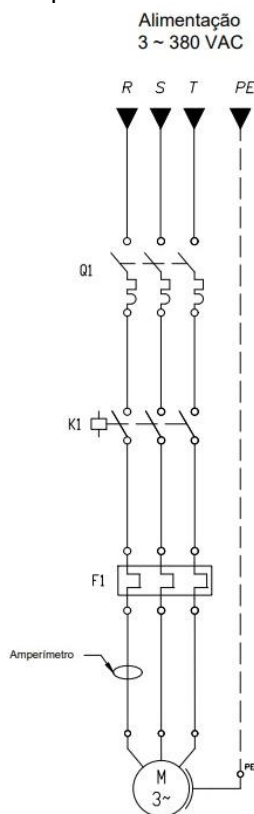
Para o procedimento experimental do trabalho, uma simulação em laboratório em escala reduzida foi efetuada. Ela que visou a correta representação de um sistema de exaustão real utilizado na indústria. Para isso, alguns materiais foram necessários, assim como os equipamentos e os instrumentos de medição, que são elencados a seguir: (1) um inversor de frequência trifásico - WEG CFW500, 2 CV, 380V; (2) um alicate amperímetro Fluke 303 Calibrado; (3) um exaustor ArGetec - ARX 60 - 13400 m³/h - 1730 rpm c/ Motor de Indução Trifásico - 1,5 CV; (4) um contator tripolar 7A, 220V - WEG CWC07; e (5) um disjuntor tripolar Siemens - C10. Para a coleta dos dados, a simulação do acionamento foi dividida em duas etapas: a primeira foi realizada com uma partida direta e a segunda utilizando um inversor de frequência WEG, mostrado na figura 5. Optou-se pela utilização da partida direta ao invés de uma *soft starter*, uma vez que em regime permanente, o motor consome potências ligeiramente semelhantes, e a aceleração no momento da partida não influencia significativamente no consumo final de energia, tornando assim o sistema menos complexo.

Figura 5 – Inversor CFW500



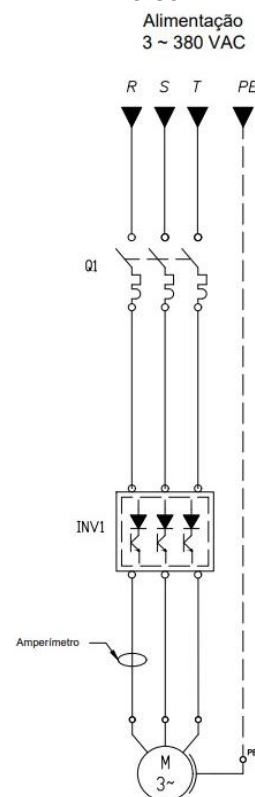
Fonte: Elaborada pelos autores.

Figura 6 – Diagrama elétrico partida direta



Fonte: Elaborada pelos autores.

Figura 7 – Diagrama elétrico partida com inversor



Fonte: Elaborada pelos autores.

No acionamento por partida direta (figura 6), foram medidas tanto a tensão quanto a corrente de saída para o motor. Com esses dados, foi possível calcular a potência consumida pelo sistema, assim como sua eficiência energética. A partir da coleta, houve possibilidade de estimar o gasto energético desse acionamento ao longo de um período de 24 horas correntes. Com o inversor de frequência, o mesmo teste foi realizado, com os parâmetros iguais, mensurando a tensão e corrente de saída, calculando assim a potência consumida, eficiência e seu consumo. O diagrama da ligação utilizando o inversor está representado na figura 7, em que pode ser observado que o método de medição foi o mesmo, para não se ter diferença nos valores apresentados.

Figura 8 – Exaustor Utilizado nos testes em laboratório

Fonte: Elaborada pelos autores.

Os testes ocorreram da seguinte forma: foi estabelecido um período de operação de 1 hora, com uma alocação de 85% do tempo para o funcionamento do exaustor sem carga (com comporta fechada) e 15% do tempo para o exaustor com carga (com comporta aberta), simulando fielmente o funcionamento do sistema instalado atualmente. Com base nisso, determinou-se que o exaustor operaria por 17 minutos sem carga, seguidos por 3 minutos com carga, repetindo esse ciclo mais vezes dentro do período de 1 hora.

Com o acionamento por inversor, durante os períodos em que o exaustor não apresentar carga, o motor foi acionado com uma velocidade mínima predefinida e atingiu a velocidade máxima quando houve demanda de carga. Na partida direta, onde não há possibilidade de controle de velocidade, a etapa foi realizada à velocidade máxima. Os dados de tensão e corrente foram coletados empregando um alicate amperímetro, e as demais informações foram coletadas a partir da IHM (Interface Homem Máquina) e dos parâmetros de leitura do próprio inversor. A partir desse processo, os dados foram analisados e comparados entre as duas etapas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na tabela 1 é apresentada a primeira medição com o sistema em partida direta e exaustor sem carga.

Tabela 1 – Teste partida direta sem carga

Frequência (Hz)	Corrente (A)	Tensão (V)	FP
60	2,4	380,5	0,82

Fonte: Elaborada pelos autores.

Após decorrido o tempo estimado, foi aplicada carga ao exaustor, coletando os valores que podem ser observados na tabela 2.

Tabela 2 – Teste partida direta com carga

Frequência (Hz)	Corrente (A)	Tensão (V)	FP
60	4,1	380,5	0,82

Fonte: Elaborada pelos autores.

Alterando o tipo de acionamento do motor e utilizando um inversor trifásico CFW500, os testes foram repetidos, com e sem carga. No teste sem carga, a frequência do inversor foi variada para melhor entendimento do comportamento do sistema.

Tabela 3 – Teste inversor sem carga.

Freq (Hz)	Corrente (A)	Tensão (V)	FP
10	1,7	65	0,51
15	1,8	94	0,43
20	1,8	123	0,43
30	1,9	185	0,44
40	2,0	248	0,48
50	2,2	310	0,54
60	2,4	372	0,57

Fonte: Elaborada pelos autores.



Neste primeiro teste com o inversor, fez-se necessário determinar qual é a frequência mínima que aciona o exaustor sem carga. Posto que, com a frequência de 10 Hz, o sistema apresentava instabilidade e a velocidade de rotação das pás não era suficiente para gerar uma vazão considerável de ar. E a frequência de 20 Hz apresentava uma maior tensão, conseqüentemente um consumo maior, optou-se pela frequência de 15 Hz, a qual foi baseada em outro sistema de exaustão presente na indústria estudada, que utiliza esse tipo de acionamento. Após essa avaliação, houve sequência com o teste do inversor com carga.

Tabela 4 – Teste inversor com carga.

Frequência (Hz)	Corrente (A)	Tensão (V)	FP
60	4,1	371	0,80

Fonte: Elaborada pelos autores.

A partir dos dados coletados, foram realizados os cálculos que possibilitaram a análise do efeito do inversor sobre o sistema. Para comparação da eficiência energética nas duas situações, é necessário o cálculo das potências: ativa, aparente e reativa, utilizando os dados das tabelas de 1 a 4. Posto que o sistema é trifásico, para a potência aparente, segundo descreve TME (2023), utilizou-se a seguinte fórmula.

$$S = \sqrt{3} VI \quad (2)$$

em que: S = Potência aparente (VA), I = Corrente de linha (A) e V = Tensão de linha (V).

Para a potência ativa foi utilizada a potência calculada e o fator de potência conforme a equação 3.

$$P = fp \times S \quad (3)$$

em que: P = Potência ativa (W), fp = fator de potência, S = Potência aparente (VA).

Já para a Potência Reativa, utilizou-se do resultado das duas potências anteriores (TME, 2023)



$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (4)$$

em que: Q = Potência reativa (VAR), S = Potência aparente (VA) e P = Potência ativa (W).

Dessa forma, obteve-se os seguintes valores para os testes sem carga, na consideração que para o acionamento com o inversor, foi considerado a frequência de 15Hz.

Tabela 5 – Potências no circuito sem carga

Acionamento	Potência Aparente (VA)	Potência Ativa (W)	Potência Reativa (VAR)
Partida Direta	1581,70	1297,00	905,31
Inversor	293,06	126,01	264,58

Fonte: Elaborada pelos autores.

Para os testes com carga, obteve-se:

Tabela 6 – Potências no circuito com carga

Acionamento	Potência Aparente (VA)	Potência Ativa (W)	Potência Reativa (VAR)
Partida Direta	2702,08	2215,71	1546,57
Inversor	2634,62	2107,69	1580,77

Fonte: Elaborada pelos autores.

Após testes e cálculos realizados, é iniciada a comparação da eficiência energética. Levando em consideração que na empresa tomada como exemplo o valor de 1 kWh equivale a R\$0,31 centavos, e que o motor funciona com carga por 9 minutos e sem carga por 51 minutos, dentro de 1 hora, é possível fazer a projeção para um dia completo, mês e/ou ano. A partir da equação abaixo:

$$E = \frac{(P_{C. carga} \times 9) + (P_{S. carga} \times 51)}{60 \times 1000} \quad (5)$$

em que: E = Energia consumida em 1h (KWh), $P_{C.Carga}$ = Potência ativa com carga (W), $P_{S.Carga}$ = Potência ativa sem carga (W). Utilizando a fórmula 5, é encontrada a Energia gasta em 1 hora, multiplicando o resultado por 24, tem-se

a Energia em um dia, e o resultado seguinte por 365, é calculado o consumo de um ano.

Tabela 7 – Consumo de Potência Ativa

Acionamento	1h (KWh)	1 dia (KWh)	1 ano (KWh)
Partida Direta	1,4348	34,4353	12568,914
Inversor	0,4563	10,9515	3997,321

Fonte: Elaborada pelos autores.

Seguindo a mesma linha de raciocínio para as potências aparente e reativa chega-se aos resultados.

Tabela 8 – Consumo de Potência Aparente

Acionamento	1h (kVA)	1 dia (kVA)	1 ano (kVA)
Partida Direta	1,7497	41,9943	15327,944
Inversor	0,7211	17,3075	6317,256

Fonte: Elaborada pelos autores.

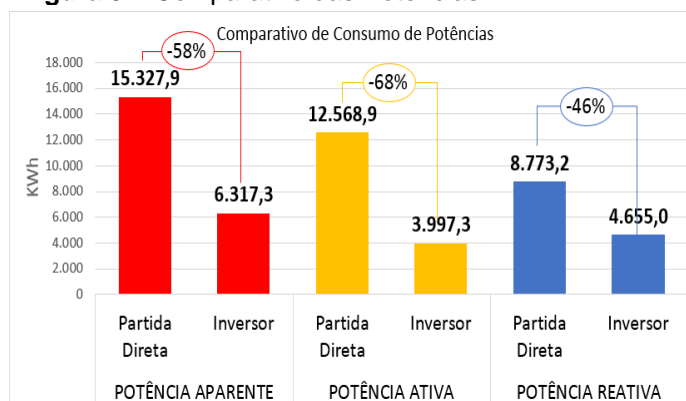
Tabela 9 – Consumo de Potência Reativa

Acionamento	1h (kVAr)	1 dia (kVAr)	1 ano (kVAr)
Partida Direta	1,0015	24,0360	8773,156
Inversor	0,5319	12,7535	4655,040

Fonte: Elaborada pelos autores.

Na Figura 9, é possível observar a proporção de redução nas potências entre um tipo de acionamento e outro.

Figura 9 – Comparativo das Potências




Fonte: Elaborada pelos autores.

Discussão

A taxa da conta de energia da concessionária na indústria analisada é de R\$0,31 por kWh. Se é multiplicada a potência ativa por esse valor, é obtido, no caso da partida direta uma fatura anual de R\$ 3.896,36. Por outro lado, com a utilização do inversor, o valor anual seria de R\$ 1.239,17. Isso significa uma redução de 68,19% no gasto financeiro com consumo energético anual desse sistema na empresa.

Dessa forma, é possível observar que há uma significativa redução nos custos anuais de operação. Essa economia pode ser investida em outras áreas da produção, aumentando a competitividade e a sustentabilidade do negócio. Além disso, é justo identificar que houve redução na potência reativa durante a utilização do inversor. Porém, é importante salientar que essa redução ocorreu pelo fato de a potência ativa também ser reduzida, diminuindo também a potência aparente. É possível observar que a utilização do inversor de frequência contribui para a drástica redução do fator de potência do sistema, tornando-o menos eficiente se comparado ao sistema de partida direta, porém com consumo energético menor. Essa redução se deve ao fato do tipo de acionamento de que o inversor frequência utilizado possui, sendo que o tipo VSI possui o pior fator de potência dentre os acionamentos. Porém, a instalação de capacitores corrigiria essa questão muito embora aumentaria o custo de implementação.

Outro fator importante a ser considerado é referente à vida útil do motor, posto que opera em baixa frequência na maior parte do tempo. Dessa forma, reduz significativamente a deterioração das partes internas como rolamentos, rotor e bobinas, se comparado com o acionamento anterior. Considerando que o inversor utilizado na simulação custa, atualmente, em torno de R\$ 3100,00, o investimento seria retornado em aproximadamente 14 meses, constituindo um retorno muito viável. Essa projeção pode ser levada em conta pensando na viabilidade da troca no sistema real. Os testes realizados não consideraram fatores como o consumo do próprio inversor, harmônicas, perdas, torque necessário, condições ambientais entre outras questões que poderiam ter



influenciado os valores medidos e calculados. Dessa forma, acredita-se que a economia real gire em torno de 60%, visto que o sistema de exaustão da planta estudada possui maior potência e dessa forma possui maior consumo, maior custo e maior complexidade. Ratifica-se, portanto, uma redução de 60% no custo de energia.

4. CONCLUSÕES

Sendo preferível a utilização de um inversor do tipo PWM, a partir da presente análise foi possível constatar que a substituição de um acionamento elétrico via *soft-starter*/partida direta por um acionamento com inversor de frequência apresenta notável viabilidade para a indústria, vis a vis a rapidez do retorno de investimento, a drástica diminuição do consumo de energia e a expectativa de aumento significativo da vida útil dos motores elétricos.

Outrossim, foi possível averiguar que o tipo de acionamento de frequência do inversor influencia diretamente na qualidade energética do sistema ao auxiliar na redução do consumo da potência reativa, ao aumentar o fator de potência da instalação, ao ajudar a garantir que a empresa cumpra com os requisitos legais vigentes na área de energia elétrica.

Além disso, é importante considerar a preocupação com o atendimento ao encargo ambiental, ao contribuir com a redução a demanda de energia e dessa forma, acorrer para reduzir a necessidade de mais geração, contribuindo assim com a sustentabilidade dos recursos naturais vigentes.


REFERÊNCIAS

ARAÚJO, João Alberto Borges de. **Aplicação de inversor de frequência para economia de energia elétrica em sistemas de irrigação por aspersão.**

2003. xvi, 158 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Ciência Agrônomicas do Campus Botucatu - UNESP, 2003 Disponível em:https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UNSP_962ee26f31adc8c6ac54c350f2f5bc92. Acesso em: 21 abr. 2024.

BEN. **Balanco energético nacional.** Ministério de Minas e Energia. 2016. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/ptbr/assuntos/secretariasntep/publicacoes/balancoenergeticonacional/anteriores/5-edicoes-anteriores/5-13-ben-2016anobase-2015.pdf/@@@download/file>. Acesso em: mar. 2024.

BARRETO, Guilherme Pimenta. **Sistema de monitoramento e controle de consumo de energia elétrica para uma residência.** Centro Universitário de Brasília – UNICEUB. Brasília. 2015. Disponível em: <https://repositorio.uniceub.br/jspui/bitstream/235/7579/1/21136802.pdf>. Acesso em: 20 out. 2023.



BRUNO, Evandro Amon. **Integração de um CLP, Inversor de frequência e motor de indução trifásico com análise vetorial**. Sensorless. 2018. xvi, 61 f. Tese (graduação) - Universidade Federal do Espírito Santo, Departamento de Engenharia Elétrica, 2018. Disponível em: < https://ele.ufes.br/sites/engenhariaeletrica.ufes.br/files/field/anexo/evandro_a_bruno.pdf >. Acesso em: abril, 2024.

CAPÓ, Martin. **O uso de motores altamente eficientes na indústria reduziria o consumo global de eletricidade em 10%**. ABB. São Paulo, 2021. Disponível em: <https://new.abb.com/news/pt-br/detail/82715/o-uso-de-motores-altamente-eficientes-na-industria-reduziria-o-consumo-global-de-eletricidade-em-10>. Acesso em: abr. 2024.

CORDEIRO, Maurício. **Princípio de funcionamento do inversor de frequência variável (VFD)**. Dicas de Instrumentação. 2022. Disponível em: <https://www.dicasdeinstrumentacao.com/principio-de-funcionamento-do-inversor-de-frequencia-variavel-vfd/>. Acesso em: 15 nov. 2024.

EPE. **Fontes de energia**. Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/fontes-de-energia>. Acesso em: mar. 2024.

FRANCHI, Carlos Moro. **Acionamentos elétricos**. 3. ed. SP: Érica, 2008.

SERVICEDRIVE. **Como a frequência é variada?** Service Drive. 2024. Tme. Disponível em: <https://www.servicedrive.com.br/lesson/como-frequencia-e-variada>. Acesso em: fev. 2024.

SKZ Engenharia. **Correção do fator de potência**. SKZ Engenharia. 2023. Disponível em: <https://skzengenharia.com.br/correcao-do-fator-de-potencia/>. Acesso em: mar. 2024.

SOUSA, E. da C; SILVA, V. **inversor de Frequência e a sua Contribuição para a Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento**. 2012. **Engenharia**, São Paulo, v. 69. n. 609, p. 112-117, 2012.

TME. **Potência ativa, passiva e aparente**. TME. 2023. Disponível em: <https://www.tme.com/br/pt/news/events/page/51962/potencia-ativa-passiva-e-aparente/>. Acesso em: jan. 2024.

WEG. W22 – **Motor elétrico trifásico**. WEG. 2020. Disponível em: <https://static2.weg.net/medias/downloadcenter/hbf/h54/WEG-w22-motor-ele-tri-co-trifasico-de-inducao-tecnico-mercado-africano-50058213-brochure-portuguese-web.pdf>. Acesso em: abr. 2024.