

REDUÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO DE MOTORES ATRAVÉS DE INVERSORES DE FREQUÊNCIA

Bruna Resende¹; Giovanne Manzan²; João Pedro Santos³; Marcelo Lucas⁴

^{1, 2, 3, 4} Universidade de Uberaba

bruna.resende15@hotmail.com; marcelo.lucas.eng@gmail.com

Resumo

Este artigo abordará a eficiência energética em um sistema elétrico que possui um motor de indução trifásico, inicialmente acionado por um soft starter, com a viabilidade de substituição deste sistema por um inversor de frequência. O estudo teve 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. Como consequência, também aumenta a 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 estudado.

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

1 Introdução

Atualmente, 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. Segundo o Grupo ABB, 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). Desses, 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 artigo levanta a seguinte questão: Como reduzir o consumo de energia elétrica de um motor de indução trifásico de forma eficiente?

Para isso, um sistema de exaustão industrial será analisado, no qual será realizada a substituição de um acionamento com soft starter por um acionamento com inversor de frequência, e a partir dessa mudança, é esperada a 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

2.1 Consumo Energético

O consumo energético refere-se à quantidade de energia utilizada por um sistema, dispositivo, residência, empresa ou país em um período específico.

A transferência de energia de um sistema para outro resulta em uma alteração de estado. Outro ponto crucial é a noção de potência, que representa o fluxo de energia ao longo de um período específico. As distintas manifestações de energia existentes no mundo têm a capacidade de serem transformadas entre si, corroborando as leis das conversões energéticas (BARRETO, 2015).

O consumo de energia é geralmente medido em unidades como quilowatt-hora (kWh) ou joules (J). O consumo energético pode abranger diferentes áreas, como o consumo de energia elétrica, combustíveis fósseis (petróleo, gás natural, carvão), energia renovável (solar, eólica, hidrelétrica), transporte, aquecimento, refrigeração, iluminação, entre outros (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.

Segundo o BEN (2016), aproximadamente 30% da energia elétrica produzida no país é consumida pelo setor industrial. Dessa forma, é possível observar que a indústria possui uma parcela de consumo considerável acerca do que é gerado.

2.2 Redução do consumo energético na indústria

A preocupação com a redução do consumo energético 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 da 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 do país, muitas vezes proveniente de fontes não renováveis. A redução do consumo energético ajuda 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.

Cada vez mais, as empresas 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.

Segundo 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 na indústria, são necessárias 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 energético industrial (BARRETO, 2015).

2.3 Motores Elétricos

Os motores elétricos são amplamente aplicados em várias indústrias e residências. Esses motores convertem energia elétrica em energia mecânica e fornecem energia para muitos dispositivos.

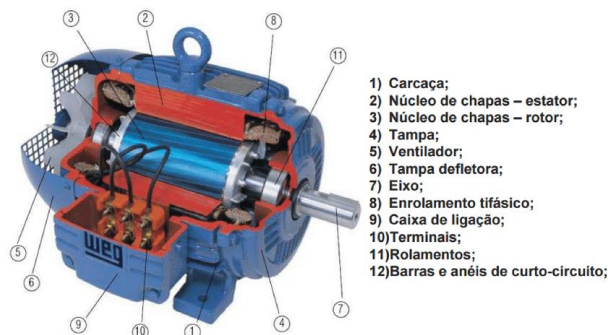
Eles são conhecidos por sua eficiência energética, baixo custo de manutenção e baixo impacto ambiental em comparação com os motores de combustão interna.

Os motores elétricos são usados 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 e SILVA, 2012).

Um motor elétrico consiste em um estator fixo e um rotor móvel. O estator consiste em bobinas condutoras enroladas em várias camadas de núcleo de ferro, e o rotor consiste em um eixo e um enrolamento acionado por eletricidade. Quando a corrente trespassa pelo enrolamento do estator, um campo magnético será gerado. Este campo magnético interage com as bobinas do rotor, criando forças atrativas e repulsivas que vira o rotor (BRUNO, 2018).

As partes constituintes podem ser observadas na figura 1 a seguir:

Figura 1: Motor de Indução Trifásico – Interno



Fonte: WEG (2020)

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 cada vez mais eficientes, 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. Hoje, existem diferentes tipos de motores elétricos, como motores de corrente contínua (DC) e motores de corrente

alternada (AC), cada um com suas características específicas.

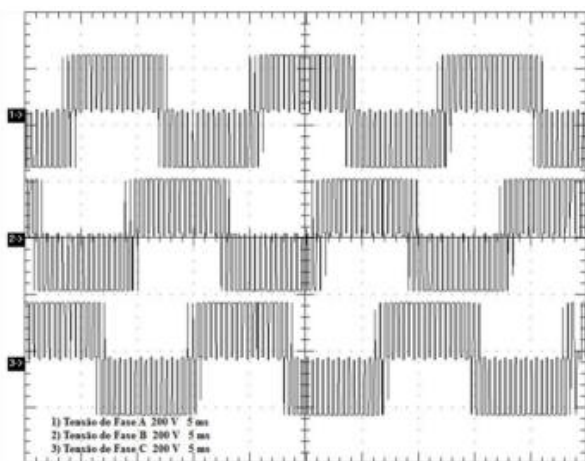
2.4 Inversores de Frequência

Muitos processos industriais necessitam do controle de velocidade de um motor elétrico para garantir seu pleno funcionamento, 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 fonte alimentadora através de alguns conversores, 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 a seguir é possível ver como é o sinal de saída de um inversor de frequência em cada uma das fases.

Figura 2: Sinal de Saída do Inversor



Fonte: ServiceDrive (2023)

Como pode ser visto na imagem, a saída do inversor não é uma onda senoidal perfeita, 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 (CORDEIRO, 2022).

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 e adequado para muitas aplicações.

Esses equipamentos na verdade possuem uma nomenclatura popular errada, visto 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, o desenvolvimento desses equipamentos se deu através de dispositivos de estado sólido, inicialmente com tiristores e atualmente com transistores, do tipo IGBT (FRANCHI, 2008).

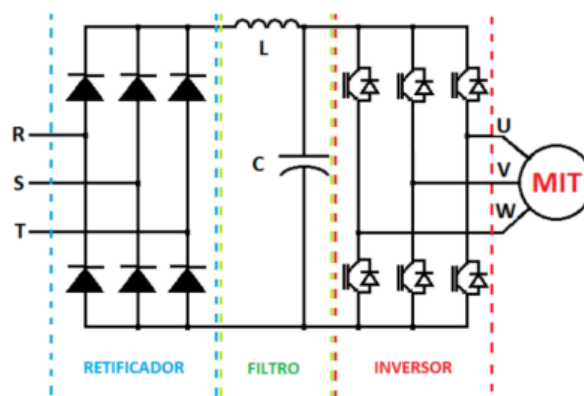
Por meio de um processo de conversão CC - CA, o sinal de saída de um inversor possui frequência e magnitude controláveis, dessa forma, a velocidade do motor elétrico é modulada.

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.

Podemos observar na 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. O circuito de comando dos transistores é o elemento responsável pela geração dos pulsos de controle, a partir de microcontroladores. 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, podemos citar o aumento da vida útil do motor, assim como a redução nos desgastes mecânicos estruturais. Também é possível citar a ausência de faiscamentos 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 pontuais, conforme cita Cordeiro (2022), o aumento de ruído no motor devido a frequência de chaveamento do sinal, assim como uma pequena perda energética devido a característica não totalmente senoidal da tensão nos terminais do motor. Outra desvantagem está relacionada a geração de harmônicos na rede elétrica.

2.4.3 Eficiência Energética

Com a utilização dos inversores 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, diminuindo o consumo energético (ARAÚJO, 2003).

Além das vantagens já citadas anteriormente, 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 objetivo 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 as características do seu sinal de saída.

2.4.4 Tipos de Controle

Segundo Cordeiro (2022), existem três tipos principais de controle de frequência que os inversores podem se basear:

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.

Já 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.

Em contraste, os VFDs PWM (Modulação por Largura de Pulso) ganham preferência na indústria devido ao excelente fator de potência, eficiência elevada e custo mais baixo. 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 corrente alternada, algumas particularidades surgem em comparação com a 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: Responsável por criar e manter os campos eletromagnéticos das cargas indutivas, sendo a energia que não é transformada efetivamente em trabalho. Expressa em kVAR.

Potência Ativa: Energia que é transformada em trabalho, gerando calor, luz, movimento, etc. Também é denominada de potência útil, sendo a energia que é realmente transferida a carga. Expressa em kW.

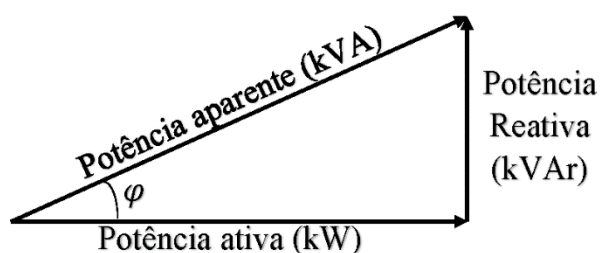
Potência Aparente: Potência total que é entregue a carga, sendo a combinação da energia reativa e ativa. Expressa em kVA.

2.6 Fator de Potência

O fator de potência é uma medida adimensional que representa a fração da potência aparente que efetivamente realiza trabalho, com seu valor

máximo limitado a 1. Este fator está relacionado ao cosseno do ângulo do triângulo de potências, podendo ser identificado através da 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 (2023)

Podemos calcular o fator de potência usando as razões trigonométricas, como foi representado pelo SKZ Engenharia (2023):

$$FP = \frac{\text{Potência Ativa (KW)}}{\text{Potência Aparente (KVA)}} \quad (1)$$

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, foi realizada uma simulação em laboratório em escala reduzida, que visou a correta representação do sistema de exaustão real utilizado na indústria. Para isso, foram necessários alguns materiais, assim como os e equipamentos de medição, que estão descritos a seguir:

- Inversor de Frequência Trifásico - WEG CFW500, 2 CV, 380V;
- Alicata Amperímetro Fluke 303 Calibrado;
- Exaustor ArGetec - ARX 60 - 13400 m³/h - 1730 rpm c/ Motor de Indução Trifásico - 1,5 CV;
- Contator Tripolar 7A, 220V - WEG CWC07;
- 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, demonstrado pela 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.

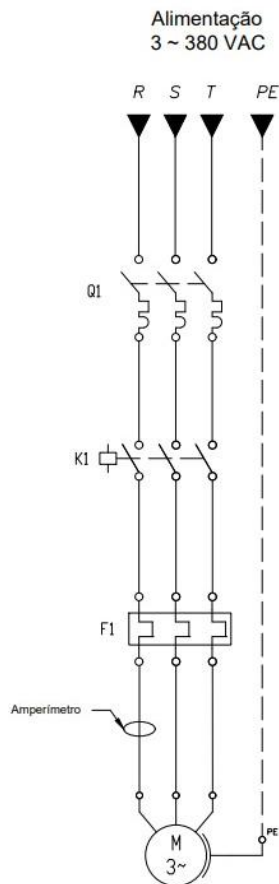
Figura 5: Inversor CFW500 utilizado



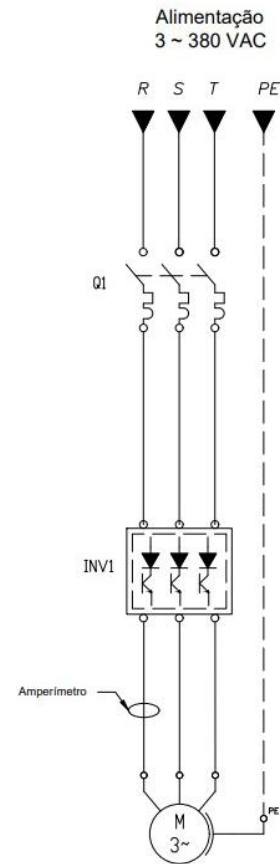
Fonte: Os Autores (2023)

No acionamento por partida direta, 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.

O método de medição e o circuito montado, pode ser observado no esquema elétrico a seguir:

Figura 6: Diagrama elétrico partida direta

Fonte: Os Autores (2023)

Figura 7: Diagrama elétrico partida com inversor

Fonte: Os Autores (2023)

Com o inversor de frequência, o mesmo teste foi realizado, com os parâmetros iguais, mensurando também 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, onde pode ser observado que o método de medição foi o mesmo, para não termos diferença nos valores apresentados.

O exaustor utilizado pode ser observado através da figura 8 a seguir.

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.

Figura 8: Exaustor Utilizado nos testes em laboratório

Fonte: Os Autores (2023)

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 através do Alicata Amperímetro, e as demais informações foram coletadas a partir da IHM e dos parâmetros de leitura do próprio inversor.

A partir desse processo, os dados foram analisados e comparados entre as duas etapas.

4 Resultados

Na tabela abaixo temos 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)	F.P
60	2,4	380,5	0,82

Fonte: Os Autores (2023)

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)	F.P
60	4,1	380,5	0,82

Fonte: Os Autores (2023)

Alterando o tipo de acionamento do motor, agora 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)	F.P.
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: Os Autores (2023)

Neste primeiro teste com o inversor, foi necessário determinar qual seria a frequência mínima que acionaria o exaustor sem carga. Visto 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 tensão maior, consequentemente

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)	F.P
60	4,1	371	0,80

Fonte: Os Autores (2023)

A partir dos dados coletados, foram realizados os cálculos que analisaram o efeito do inversor no 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.

Já que o sistema é trifásico, para a Potência Aparente, segundo descreve TME (2023), utilizamos a seguinte fórmula foi utilizada:

$$S = \sqrt{3} \times I \times V \quad (2)$$

em que:

S = Potência aparente (VA)

I = Corrente elétrica (A)

V = Tensão (V)

Para a Potência Ativa foi utilizada a potência anteriormente calculada e o fator de potência conforme abaixo (TME, 2023):

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

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)

P = Potência ativa (W)

Desta forma, obteve-se os seguintes valores para os testes sem carga, lembrando que para o acionamento com o inversor, foi considerado 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: Os Autores (2023)

Já 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: Os Autores (2023)

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 citada, 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: Os Autores (2023)

Seguindo a mesma linha de raciocínio para as potências Aparente e Reativa chegamos 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: Os Autores (2023)

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: Os Autores (2023)

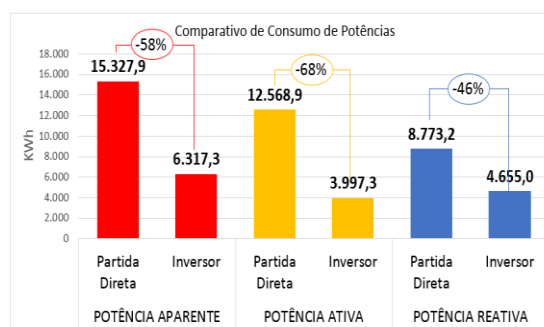
5 Discussão

Como citado anteriormente, a taxa da concessionária na indústria analisada é de R\$0,31 por KWh. Se multiplicada a Potência Ativa por esse valor, será 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 da Potência Ativa também ser reduzida, diminuindo também a Potência Aparente. É possível observar que a utilização do inversor diminuiu drasticamente o 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 frequência que o inversor utilizado possui, sendo do tipo VSI, e como comentado anteriormente, possui o pior fator de potência dentre os acionamentos. Porém, a instalação de capacitores corrigiria essa questão, porém aumentaria o custo de implementação.

A seguir, na Figura 9, é possível ver a proporção de redução nas potências entre um tipo de acionamento e outro.

Figura 9: Comparativo das Potências

Fonte: Os Autores (2023)

Outro fator importante a ser considerado é referente a vida útil do motor, já que irá operar em baixa frequência na maior parte do tempo. Dessa forma reduzindo 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, sendo um retorno 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, dessa forma possui maior consumo, maior custo e maior complexidade.

6 Conclusão

A partir do presente artigo, foi possível constatar que a substituição de um acionamento por soft starter / partida direta por um acionamento com inversor de frequência apresenta grande viabilidade para a indústria analisada, visto a rapidez do retorno de investimento, a drástica diminuição do consumo energético e o aumento significativo da vida útil do motor de indução.

Foi possível observar também que o tipo de acionamento de frequência do inversor influencia diretamente na qualidade energética do sistema, sendo preferível a utilização de um inversor do tipo PWM, reduzindo assim a potência reativa, aumentando o fator de potência, garantindo que a empresa cumpra com os requisitos legais vigentes.

Além desses fatores é importante considerar também a questão ambiental, reduzindo a demanda de energia, dessa forma, reduzindo a geração e contribuindo com a sustentabilidade do planeta.

Verifica-se neste estudo, portanto, uma redução de 60% no custo de energia.

Referências

ABESCO (Brasil). **Desperdício de energia atinge R\$ 61,7 bi em três anos**. Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Conservação de Energia (ABESCO), São Paulo, 2017. Disponível em: <<http://www.abesco.com.br/pt/novidade/desperdicio-de-energia-atinge-r-617-bi-emitres-anos/>>.

Acesso em: 21 out. 2023.

ANEEL. **Resolução Normativa Nº 414/2010**. Agência Nacional de Energia Elétrica. 2010. Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2010414.pdf>>. Acesso em: 20 out. 2023.

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. 2023.

BEN. **Balanco Energético Nacional. Ministério de Minas e Energia**. 2016. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/ptbr/assuntos/secretariassntep/publicacoes/balancoenergeticonacional/anteriores/5-edicoes-anteriores/5-13-ben-2016anobase-2015.pdf/@download/file>>. Acesso em: 19 out. 2023

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: 21 abr. 2023.

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: 21 abr. 2023.

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. 2023.

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: 20 out. 2023.

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

SERVICEDRIVE. **Como a Frequência é Variada?**. Service Drive. Disponível em: <<https://www.servicedrive.com.br/lesson/como-frequencia-e-variada/#:~:text=Basicamente%2C%20a%20varia%C3%A7%C3%A3o%20de%20freq%C3%BC%C3%AAncia,um%20tempo%20de%2016%2C67ms.>>. Acesso em: 21 abr. 2023

SKZ Engenharia. **Correção do Fator de Potência**. SKZ Engenharia. 2023. Disponível em:<

<https://skzengenharia.com.br/correcao-do-fator-de-potencia/>>. Acesso em: 25 out. 2023

SOUSA, E. da C; SILVA, V. de P. e. **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: 15 nov. 2023

WEG. **W22 – Motor Elétrico Trifásico**. WEG. 2020. Disponível em: <<https://static2.weg.net/medias/downloadcenter/hb/f/h54/WEG-w22-motor-eletrico-trifasico-de-inducao-tecnico-mercado-africano-50058213-brochure-portuguese-web.pdf>>. Acesso em: 25 out. 2023