

CONTRIBUIÇÃO PARA O ENSINO DE INVERSOR DE FREQUÊNCIA APLICADO A CARGAS INDUSTRIAIS PARA ALUNOS DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DOI: 10.37702/2175-957X.COBENGE.2023.4520

Raphael Victor Barros Saldanha - raphael.saldanha@itec.ufpa.br
Universidade Federal do Pará

Isaias Ferreira - isaias.himura@gmail.com
UFPA

CARMINDA CELIA MOURA DE MOURA CARVALHO - carminda@ufpa.br
Universidade Federal do Pará

Israel Ulisses de Leão Silva - israelulissesls@gmail.com
UFPA

Amanda Leão lopes - Leaolena.86@gmail.com
Universidade Federal do Pará

Ricardo Elias Gomes de França - rfranca.engeletricista@gmail.com
França Engenharia Elétrica LTDA

thiago farias couto - thiago.couto@itec.ufpa.br
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

Resumo: *O presente artigo tem por objetivo contribuir com o ensino de inversores de frequência através de um treinamento que concilia teoria e prática de forma simultânea. A ampla utilização do inversor de frequência na indústria para controle de diversos tipos de cargas acionadas por motores elétricos torna essencial o aprendizado sobre este equipamento. São apresentados conceitos básicos sobre o inversor e tipos de cargas industriais onde sua aplicação é realizada, a metodologia do treinamento e a descrição dos experimentos práticos. O freio de Foucault foi utilizado para simular cargas aplicadas a um motor de indução trifásico e o controle do motor realizado pelo inversor de frequência CFW-11 da WEG nos modos de controle escalar e vetorial.*

"ABENGE 50 ANOS: DESAFIOS DE ENSINO, PESQUISA E
EXTENSÃO NA EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA"

18 a 20 de setembro
Rio de Janeiro-RJ



51º Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia
VI Simpósio Internacional de Educação em Engenharia

Palavras-chave: Ensino. Inversores de Frequência. Cargas Industriais.
Treinamento. Motores Elétricos.

Realização:



Organização:



CONTRIBUIÇÃO PARA O ENSINO DE CONVERSOR DE FREQUÊNCIA APLICADO A CARGAS INDUSTRIAIS PARA ALUNOS DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

1 INTRODUÇÃO

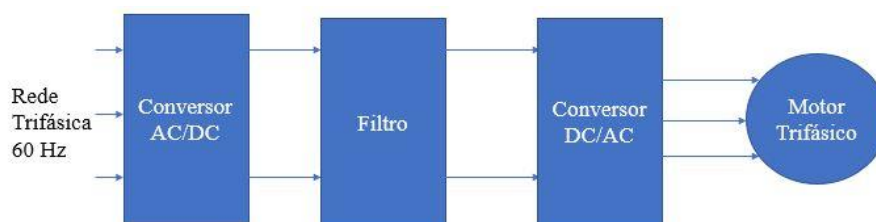
O ensino prático de aplicações dos conversores de frequência para estudantes do curso de Engenharia Elétrica contribui de forma significativa na sua formação, preparando-os para situações reais encontradas na indústria. Esta abordagem incentiva alunos do Laboratório de Instalações Elétricas da Universidade Federal do Pará (UFPA) a elaborar um treinamento, onde são expostos os principais conceitos sobre o equipamento, seu funcionamento e aplicação, além de experimentos realizados com o auxílio de bancadas didáticas.

2 O CONVERSOR DE FREQUÊNCIA

O conversor de frequência é um equipamento utilizado para controlar a velocidade de motores de indução trifásicos de corrente alternada (CA) com rotor em gaiola de esquilo, em substituição aos motores de corrente contínua (CC) utilizados anteriormente, em processos que necessitam de controle de velocidade. Sua utilização tem crescido no ambiente industrial devido a diversidade de aplicações possíveis. Um exemplo é a esteira transportadora, onde o conversor atua controlando a velocidade e o torque do motor. Esse controle permite que a esteira funcione com uma melhor velocidade para o processo produtivo, além de contribuir na redução do consumo de energia e no aumento da eficiência (FRANCHI, 2009).

De forma simplificada, o conversor de frequência é composto de um conversor CA/CC (retificador), um sistema de filtragem e um conversor CC/CA. O retificador recebe a tensão trifásica da rede 60 Hz trifásica, realiza a retificação e após a tensão retificada passar pelo sistema de filtragem, uma tensão contínua é entregue ao bloco conversor CC/CA que agora pode produzir uma tensão trifásica, com frequência ajustável. A Figura 1 ilustra os blocos construtivos de um conversor de frequência.

Figura 1 - Blocos construtivos do conversor de frequência (simplificado)



Fonte: Autores (2023)

2.1 Controle Escalar

O controle escalar, também conhecido como controle Volts por Hertz (V/f), é o modo de controle mais simples e amplamente utilizado em conversores de frequência. Neste

modo, a velocidade do motor é controlada ajustando-se a tensão e a frequência de forma proporcional. Geralmente, a relação V/f é mantida constante dentro de uma faixa de velocidades operacionais, o que permite que o motor opere em diferentes velocidades (MORAES, 2023). O controle escalar é adequado para aplicações em que alta precisão no controle de torque não é necessária.

2.2 Controle Vetorial

O controle vetorial é um modo de controle mais avançado e sofisticado que permite um controle preciso do torque e da velocidade do motor. Nesse modo, o conversor de frequência estima e controla separadamente as componentes de fluxo magnético e torque do motor (FRANCHI, 2009). Isso é feito medindo as correntes e tensões do motor, possibilitando o controle independente dessas grandezas. O controle vetorial é capaz de fornecer uma resposta dinâmica rápida, controle preciso do torque em baixas velocidades e capacidade de operação em sobrecarga. Esse modo é amplamente utilizado em aplicações que exigem alta precisão de controle, como controle de posição, controle de velocidade em malha fechada e operação com alta dinâmica.

É importante destacar que o controle vetorial é mais complexo em termos de algoritmos de controle e requer *hardware* adicional, o que pode resultar em um custo mais elevado em comparação com o controle escalar. No entanto, ele oferece benefícios significativos em termos de desempenho e precisão de controle.

3 CARGAS INDUSTRIAIS E APLICAÇÕES DE CONVERSORES

O conversor de frequência atua na proteção dos motores utilizados em compressores, bombas, esteiras transportadoras, ventiladores, dentre outros, assim como todas as cargas que neles são empregadas, protegendo-os de danos causados por variações na tensão ou corrente elétrica, situações comuns em sistemas elétricos instáveis. Outra vantagem da utilização de conversores de frequência é a redução do ruído e da vibração do equipamento, o que prolonga a vida útil de seus componentes e pode melhorar a segurança e o conforto dos trabalhadores (MORAES, 2023).

3.1 Esteiras Transportadoras

Esteiras transportadoras são sistemas mecânicos utilizados para o transporte ininterrupto de materiais em uma linha de produção, como minérios, matéria prima, produtos manufaturados, eletrônicos e automóveis em processo de montagem, o que permite a movimentação eficiente de cargas pesadas ou volumosas. Frequentemente há aplicação dos conversores de frequência em esteiras transportadoras para controlar a velocidade do transporte dos objetos e o torque do motor responsável pela movimentação da esteira (MORAES, 2023). Conseqüentemente, há um ajuste preciso da velocidade da esteira de acordo com as necessidades da produção, evitando atrasos ou danos aos materiais transportados.

3.2 Compressores

Compressores industriais são equipamentos que convertem energia elétrica em energia pneumática para comprimir e armazenar ar ou gases em um reservatório. Eles são amplamente utilizados em processos industriais como a produção de gases, pintura e secagem de superfícies; podem ser usados na produção de garrafas PET, sendo

amplamente empregados na indústria química, a exemplo do bombeamento de combustíveis fósseis em terra para navios atracados, entre outros (MAGNETROL, 2023).

Os conversores de frequência são aplicados em compressores industriais para controlar a velocidade do motor, o que permite ajustar a quantidade de ar ou gás produzido de acordo com a demanda do processo, sem alterar a quantidade de carga, variando apenas o giro do motor de acordo com a pressão da rede. Isso pode resultar em economia de energia elétrica e prolongar a vida útil do equipamento.

3.3 Bombas industriais

Bombas industriais (ao contrário dos compressores industriais, que aumentam a pressão dos fluídos em estado gasoso e adicionam energia mecânica aos fluídos, bombeando-os para o destino desejado) são equipamentos utilizados para transferir líquidos ou gases em diversos processos industriais, como abastecimento de água em grandes reservatórios, tratamento de esgoto, processos químicos na indústria no geral, entre outros (COMCORP, 2020). Os conversores de frequência são utilizados para controlar a velocidade das bombas industriais, permitindo que a quantidade de fluido transferido seja ajustada de acordo com a demanda do processo. Isso, pode ajudar a reduzir o consumo de energia elétrica, prolongar a vida útil da bomba e aumentar a eficiência do processo.

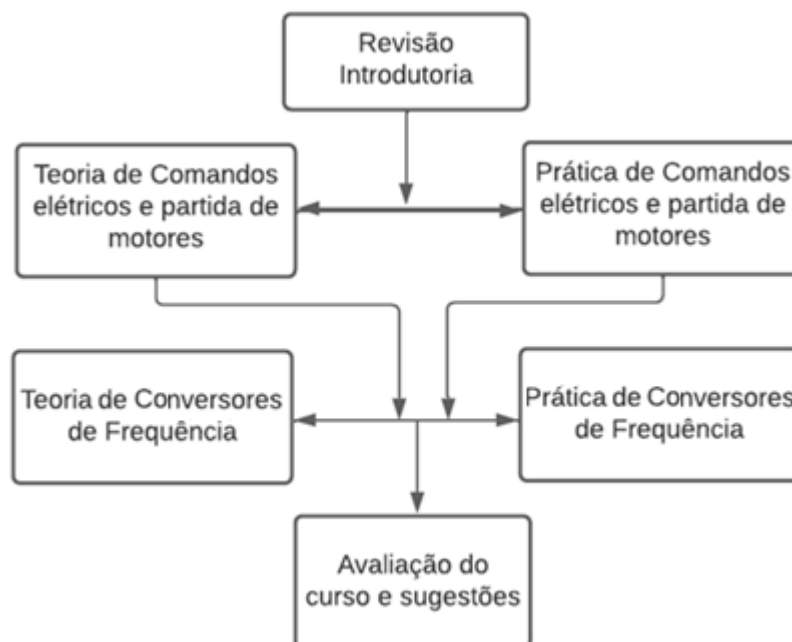
3.4 Ventiladores industriais

Ventiladores industriais são equipamentos utilizados para movimentar grandes volumes de ar em processos industriais, como a ventilação de ambientes, a refrigeração de equipamentos, a exaustão de gases, a secagem de materiais e o bem-estar dos colaboradores, de acordo com as normas trabalhistas e padrões de salubridade do ambiente (ELEKTRA, 2023). Os conversores de frequência são aplicados para controlar a velocidade do motor, permitindo que a vazão de ar seja ajustada de acordo com a necessidade do processo.

4 METODOLOGIA DE ENSINO

Inicialmente é feita uma revisão introdutória sobre conceitos básicos de eletricidade e circuitos trifásicos. Em seguida, são expostos conceitos sobre comandos elétricos e partidas de motores, intercalando a teoria e a prática em bancadas. Na sequência, os estudantes são apresentados aos conversores de frequências com aulas teóricas e, quando possível, simulações em *softwares*. Na parte prática, os estudantes realizam a montagem e testam os conceitos apresentados na teoria na bancada didática. Por fim, os estudantes fazem uma avaliação do curso para torná-lo melhor para as próximas turmas. A metodologia é resumida no fluxograma da Figura 2.

Figura 2 - Metodologia de ensino (fluxograma)



Fonte: Autores (2023)

5 EXPERIÊNCIAS

Os alunos realizam diversas experiências práticas utilizando o conversor de frequência. Os circuitos são montados em bancadas didáticas. Para simulação de cargas do motor é utilizado o freio de Foucault. O conversor de frequência utilizado está fixado em placa para uso em bancada didática (Figura 3).

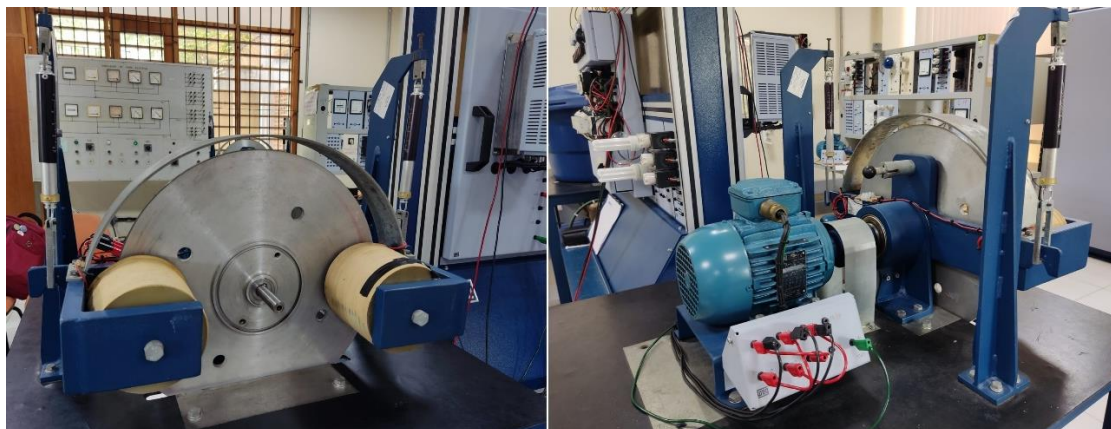
Figura 3 - Conversor de Frequência fixado em placa didática



Fonte: Autores (2023)

O freio de Foucault, mostrado na Figura 4, consiste num disco de alumínio acoplado ao eixo do motor, junto a bobinas que compõem um circuito magnético, que são alimentadas em corrente contínua, controladas por um potenciômetro anexado a uma das bancadas didáticas disponíveis no laboratório.

Figura 4 - Freio de Foucault



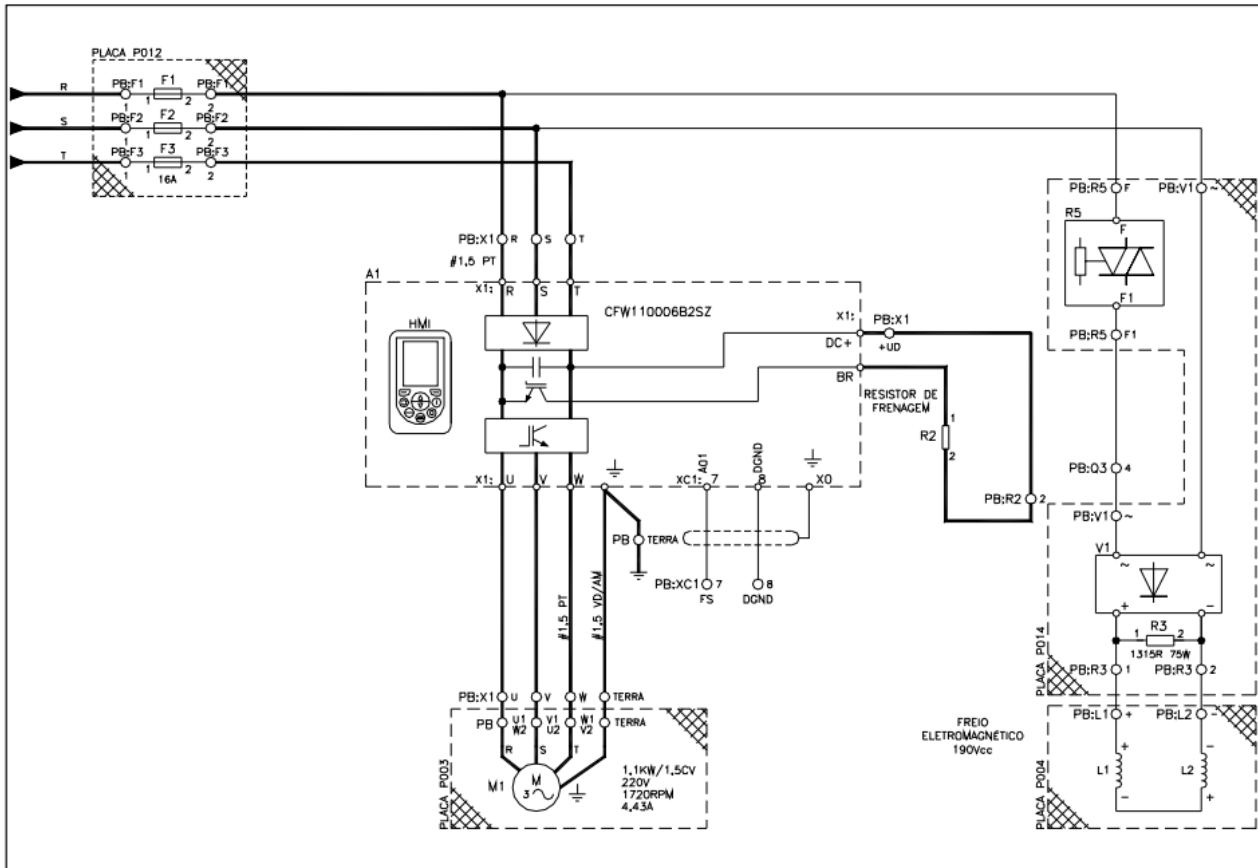
Fonte: Autores (2023)

Os experimentos simulam o controle de velocidade realizado pelo conversor de frequência em cargas de com altos conjugados na partida. Um exemplo prático é uma esteira transportadora que opera em velocidade constante, transportando objetos de peso uniforme ao longo de uma distância. Nesse caso, o motor que aciona a esteira precisa fornecer um torque elevado para superar o conjugado resistente da carga e manter a velocidade de operação constante. As experiências são realizadas nos modos de controle escalar e vetorial do conversor de frequência.

A energização do conversor de frequência, do motor de indução trifásico e das bobinas do circuito do freio de Foucault é realizada conforme os diagramas esquemáticos apresentados na Figura 5.

A seguir, serão exemplificadas duas experiências realizadas durante o treinamento em conversor de frequência.

Figura 5 - Diagrama elétrico da simulação



Fonte: Manual do kit controle de velocidade de motores CA - WEG

5.1 Experimento 1

Após a montagem do circuito, os alunos são orientados a energizar a bancada e ligar o conversor. Em seguida, realiza-se a parametrização do conversor. Ele deve ser colocado no modo de controle remoto (externo a IHM), pressionando-se a tecla LOC/REM (IHM). Os demais parâmetros a serem ajustados para esta simulação estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros ajustados para o controle escalar

Parâmetro	Operação
P0202	Ajustar tipo de controle; selecionar modo escalar: V/f 60 Hz
P0100	Ajustar rampa de aceleração; ajustar tempo para 20 s
P0101	Ajustar rampa de desaceleração; ajustar tempo para 20 s
P0205	Parâmetro Leitura: Ajustar para ler frequência
P0206	Parâmetro Leitura: Ajustar para ler corrente do motor
P0207	Parâmetro Leitura: ajustar para ler torque

Fonte: Autores (2023)

É realizada a partida do motor e, após atingir sua velocidade nominal, ajusta-se manualmente a velocidade para os valores de simulação. Em seguida, são feitos três ajustes crescentes de carga através do freio de Foucault, observando-se os valores de torque e corrente para cada situação. Os valores simulados e os resultados obtidos são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 - Valores simulados no modo de controle escalar

Sem Carga			Carga 1			Carga 2		
Velocidade Ajustada (rpm)	Torque (%)	Corrente (A)	Velocidade Ajustada (rpm)	Torque (%)	Corrente (A)	Velocidade Ajustada (rpm)	Torque (%)	Corrente (A)
200	28,7	2,4	200	28,7	3,2	200	96,5	3,4
500	15,8	2,6	500	155,7	5,7	500	199,7	7,1
1000	10,8	2,6	1000	91,5	3,9	1000	136,4	5,3

Fonte: Autores (2023)

Esse experimento permite aos alunos analisar que, no modo de controle escalar e a baixas frequências, a velocidade de rotação do eixo do motor é reduzida conforme o aumento de carga. Essa redução deve-se a necessidade de aumento do torque, o que evidencia a relação de proporcionalidade inversa entre o torque e velocidade, prevista pelo princípio da conservação de potência.

5.2 Experimento 2

A segunda simulação é feita no modo de controle vetorial. Neste tipo de controle, é necessário ajustar parâmetros referentes as características do motor, utilizando seus dados de placa. Os parâmetros a serem ajustados são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros ajustados para o controle vetorial

Parâmetro	Operação
P0202	Ajustar tipo de controle; selecionar modo vetorial: VVW
P0100	Ajustar rampa de aceleração; ajustar tempo para 20 s
P0101	Ajustar rampa de desaceleração; ajustar tempo para 20 s
P0205	Parâmetro Leitura: Ajustar para ler frequência
P0206	Parâmetro Leitura: Ajustar para ler corrente do motor
P0207	Parâmetro Leitura: ajustar para ler torque
P0296	Ajustar tensão nominal da rede
P0298	Aplicação em uso normal
P0398	Inserir fator de serviço do motor
P0399	Inserir rendimento nominal do motor
P0400	Inserir tensão nominal do motor
P0401	Inserir corrente nominal do motor
P0402	Inserir rotação nominal do motor
P0403	Inserir frequência nominal do motor
P0404	Inserir potência nominal do motor
P0406	Selecionar tipo de ventilação do motor
P0407	Inserir fator de potência nominal do motor

Fonte: Autores (2023)

Após a parametrização, é realizada a partida do motor e, após atingir sua velocidade nominal, ajusta-se manualmente a velocidade para os valores a serem simulados. Em seguida, três valores diferentes e crescentes de carga são ajustados através do freio de Foucault, sendo observados os valores de torque e corrente para cada situação, como foi feito no experimento 1. Os valores simulados e os resultados obtidos são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 - Valores simulados no modo de controle vetorial

Sem Carga			Carga 1			Carga 2		
Velocidade Ajustada (rpm)	Torque (%)	Corrente (A)	Velocidade Ajustada (rpm)	Torque (%)	Corrente (A)	Velocidade Ajustada (rpm)	Torque (%)	Corrente (A)
200	12,5	2,2	200	133,3	4,2	200	189,5	5,4
500	2	2,3	500	127	4,6	500	177	5,7
1000	-2	2,3	1000	79,1	3,8	1000	112,5	4,7

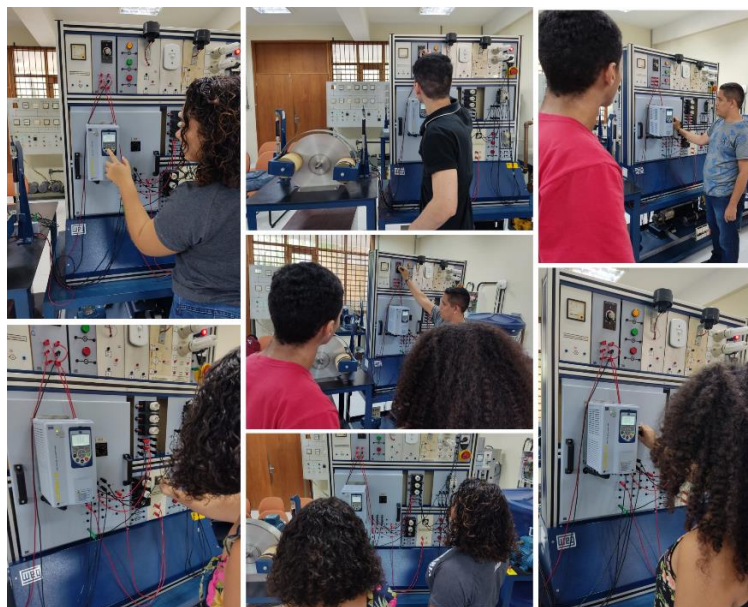
Fonte: Autores (2023)

Esse experimento demonstra aos alunos que o controle vetorial permite ao conversor ajustar o torque exigido conforme a carga aplicada, mantendo a velocidade previamente ajustada. Este ajuste é realizado através do controle de corrente do motor. Outra conclusão obtida é a limitação do motor utilizado para cargas elevadas a baixas frequências. Mesmo mantendo o torque elevado, os valores de corrente ficam acima do nominal, ocasionando falhas por sobrecorrente e/ou sobrecarga.

6 DEMONSTRAÇÃO DO TREINAMENTO

Alunos dos primeiros semestres do curso de engenharia elétrica que realizam atividades no Laboratório de Estudos Avançados em Iluminação e Instalações Elétricas da UFPA participaram de uma demonstração do treinamento. Foram apresentados conceitos básicos sobre o funcionamento do conversor de frequência e do freio de Foucault. Em seguida, sob supervisão, realizaram a partida do motor via IHM (Interface Homem-Máquina) e ajustes de velocidade através do modo de controle remoto. Durante a prática, foram orientados a observar as diferenças do controle escalar e vetorial, assim como o comportamento do motor para diferentes valores de carga. Ao término da demonstração, os alunos fizeram uma boa avaliação do treinamento.

Figura 6 - Alunos participando da demonstração do treinamento



Fonte: Autores (2023)

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Artigo apresentou as principais características dos conversores de frequência e uma metodologia que visa contribuir de forma significativa para o ensino de conversores de frequência para estudantes de engenharia elétrica.

A importância do aprendizado e ensino desse equipamento se dá devido à sua ampla utilização em diversas áreas da indústria. Quanto melhor for a formação dos estudantes, mais capacitados eles estarão para atuar nas áreas de implantação, comissionamento e até mesmo manutenção industrial.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos a coordenação do Centro de Excelência em Eficiência Energética da Amazônia (CEAMAZON) e do Laboratório de Estudos Avançados em Iluminação e Instalações Elétricas da UFPA pelo espaço e equipamentos para realização das experiências.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

ATLAS COPCO BRASIL. **Inversor de frequência X carga / alívio: qual o melhor compressor?** 2023. Disponível em: <https://www.atlascopco.com/pt-br/compressors/air-compressor-blog/inversor-frequencia-carga-alivio>. Acesso em: 26 abr. 2023.

BETA EDUCAÇÃO. **7 principais equipamentos para movimentação de cargas.** 2021. Disponível em: <https://betaeducacao.com.br/7-principais-equipamentos-para-movimentacao-de-cargas/>. Acesso em: 20 abr. 2023.

CHIAPERINI. **Compressor de ar: O que é? Onde ele é utilizado?** 2020. Disponível em: <https://www.chiaperini.com.br/utilizacao/compressor-de-ar-o-que-e-onde-ele-e-utilizado/>. Acesso em: 15 abr. 2023.

COMPCORP. **Bombas industriais e sua importância aos processos produtivos.** 2020. Disponível em: <https://www.compcorp.com.br/bombas-industriais-e-sua-importancia-aos-processos-produtivos/>. Acesso em: 31 mai. 2023.

ELEKTRA AUTOMACAO. **Ventilador Industrial: Qual a importância do equipamento para a indústria.** 2022. Disponível em: <https://www.elektraautomacao.com.br/blog/ventilador-industrial-qual-importancia-do-equipamento-para-industria/>. Acesso em: 15 abr. 2023.

FRANCHI, Cleiton Moro. **INVERSORES DE FREQUÊNCIA: TEORIA E APLICAÇÕES.** 1. ed. São Paulo: Editora Érica. 2009.

KIT controle de velocidade de motores CA – Manual do aluno. Jaraguá do Sul, SC: WEG Equipamentos Elétricos S.A. [201-?].

MORAES, Everton. **Quais os principais parâmetros de um inversor de frequência?** 2023. Disponível em: <https://www.saladaeletrica.com.br/principais-parametros-de-um-inversor-de-frequencia/>. Acesso em: 31 mai. 2023.

MAGNETROL. **Fluxo: Compressores e Bombas.** [2023]. Disponível em: <https://www.magnetrol.com/pt/fluxo-compressores-e-bombas>. Acesso em: 31 mai. 2023.

CONTRIBUTION TO THE TEACHING OF FREQUENCY CONVERTER APPLIED TO INDUSTRIAL LOADS FOR UNDERGRADUATE STUDENTS IN ELECTRICAL ENGINEERING

Abstract: *The purpose of this article is to present a methodology for teaching frequency converters through a training program that combines theory and practice simultaneously. The widespread use of frequency converters in the industry for controlling various types of loads driven by electric motors makes learning about this equipment essential. The article covers basic concepts about converters and the types of industrial loads where their application is performed, the training methodology, and the description of two practical experiments. The Foucault brake was used to simulate loads applied to a three-phase induction motor, and the motor control was performed by the frequency converter in scalar and vector control modes. The methodology was successfully applied in teaching electrical engineering students at UFPA and contributed to improving their learning experience.*

Keywords: *Teaching. Frequency converters. Industrial loads. Training program. Electric motors.*