



INVERSORES DE FREQUÊNCIA E A SUA REVOLUÇÃO NO PROCESSO DE ACIONAMENTO DE MOTORES ELÉTRICOS

Cleber Lima Nascimento ^{*1}, Aline Aparecida Rodrigues Carvalho¹, Gustavo Paulino Dayrell¹, Angelica Lourenço Oliveira², Aurea Messias de Jesus¹, Daniela Freitas Borges¹, Emerson Carlos Guimarães¹ e Ayonara Cristina da Silva¹

¹ DES-Engenharias e Sistemas de Informação – Universidade do Estado de Minas Gerais

² Departamento de Ciências Exatas e da Terra – Universidade do Estado de Minas Gerais

Resumo - O presente artigo teve por objetivo realizar um estudo acerca dos dispositivos utilizados no processo de ajuste de velocidade em motores de indução CA, os inversores de frequência. O estudo visou apresentar vários aspectos relacionados ao dispositivo, desde a sua origem, construção, aplicação e operação, demonstrando de forma didática o propósito da utilização dos inversores de frequência e como a sua implementação transformou o processo de acionamento de motores de indução CA no setor comercial e industrial, onde foi possível também verificar durante a nossa pesquisa, além dos aspectos históricos e operacionais referentes ao equipamento, os pontos positivos e negativos ligados ao uso dessa tecnologia.

Palavras-Chave – Acionamentos; Inversores de Frequência; Motores Elétricos.

FREQUENCY INVERTERS AND THEIR REVOLUTION IN THE DRIVING PROCESS OF ELECTRIC MOTORS

Abstract - This article aimed to perform a study about the devices used in the process of speed adjustment in AC induction motors, the frequency inverters. The study aimed to present several aspects related to the device, from its origin, construction, application and operation, demonstrating in a didactic and objective way the purpose of using the frequency inverters and how its implementation transformed the AC induction motor drive process in the commercial and industrial sector, where it was also possible to verify during our research, besides the historical and operational aspects related to the equipment, the positive and negative points linked to the use of this technology.

Keywords – Trigger; Frequency Inverters; Electric Motors.

*cle002house@hotmail.com

I. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas a humanidade tem experimentado avanços tecnológicos nunca antes vistos, e em praticamente todas as áreas, setores e níveis. E dentro deste contexto, em específico na área da produção industrial, podemos dar grande destaque à revolução que a substituição do trabalho humano pelas máquinas provocou no processo de avanço tecnológico que se segue até os dias atuais. Primeiramente com as máquinas a vapor, e posteriormente com o advento da eletricidade, os grandes e poderosos maquinários consolidaram o seu espaço e se tornaram parte essencial de todo e qualquer processo industrial, com os motores elétricos sendo a peça fundamental envolvida em todo esse processo.

Os motores elétricos desde o seu surgimento têm proporcionado uma gama muito variada de aplicações, em diferentes setores, e em diferentes escalas. No entanto, um dos pontos mais importantes e que sempre impactou na forma como os motores são utilizados é a quantidade de energia elétrica que é envolvida na sua operação, com o setor industrial sendo atualmente o maior responsável pela demanda energética no Brasil, segundo dados recentes da agência nacional de energia elétrica (ANEEL) [1].

Devido a isso, sempre foi um objetivo almejado pelo setor industrial, que de longe é o maior utilizador desse equipamento, a possibilidade da utilização dos motores elétricos nos seus processos de formas cada vez mais eficientes, com o menor consumo possível e com a máxima capacidade de produção.

Com isso em mente, o mercado de equipamentos elétricos tratou logo de encontrar soluções que pudessem atender a essa demanda das indústrias, com esses esforços resultando no surgimento dos inversores de frequência, também conhecidos como conversores de frequência [2].

Os inversores de frequência possibilitaram uma revolução no setor, permitindo além da operação dos motores elétricos de forma mais eficiente, a possibilidade do controle de velocidade dos motores de indução CA, que são os mais largamente utilizados nas indústrias.

Devido a este fato, o estudo e o entendimento sobre o tema se faz muito importante, sobretudo aos estudantes e

profissionais do ramo de elétrica e indústria, visto que com o avanço cada vez maior e mais acelerado da automação dos processos de produção, o conhecimento sobre todas as tecnologias e dispositivos envolvidos, dentre eles a dos inversores de frequência, se faz fundamental.

II. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A. Inversores de Frequência

Os inversores de frequência, resumidamente, são dispositivos eletrônicos estáticos, que possuem a capacidade de regular e ajustar a frequência da tensão advinda da rede elétrica, sendo por essa característica utilizados largamente na indústria no acionamento de motores assíncronos (ou CA).

O surgimento dos primeiros dispositivos capazes de controlar eletronicamente a variação de velocidade dos motores assíncronos (que viriam posteriormente a dar origem aos inversores como conhecemos hoje) pode ser atribuído a meados das décadas de 80 e 90, estando diretamente ligado com o início do avanço da tecnologia da eletrônica de potência, sobretudo das chaves eletrônicas, com os inversores surgido a partir da necessidade de se realizar o controle de forma eficiente (e principalmente econômica) dos processos que envolviam a variação de velocidade em motores assíncronos.

Em vários setores, mas principalmente no industrial, vários processos podem exigir o controle contínuo da velocidade nos motores elétricos envolvidos, independente da variação do valor da carga acoplados a eles, com esse controle podendo ser obtido através da utilização de motores de corrente contínua CC (que são muito eficientes, mas possuem um custo mais elevado em comparação aos motores CA assíncronos), ou da utilização de equipamentos que possibilitem a variação da frequência da rede que alimenta o motor, neste caso, os inversores, que representaram um salto tecnológico sem precedentes na indústria, substituindo o emprego de outros dispositivos que eram utilizados para esse mesmo fim, (como polias e caixas de redução), além de alguns modelos mais modernos também permitem o controle de outros parâmetros, como frenagem, monitoramento da corrente elétrica e proteção contra sobrecorrentes.

Figura 1: Esquema de partida direta simples.

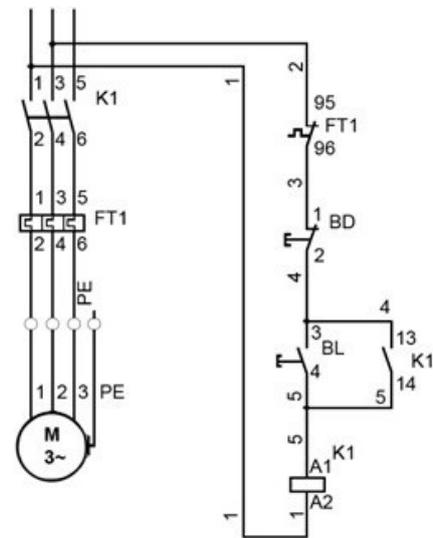
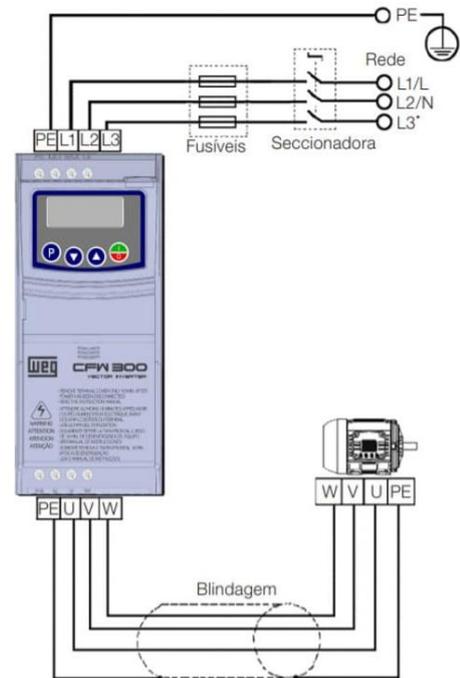


Figura 2: Esquema de partida direta utilizando inversor.



Como é possível observar através das Figuras 1 [9] e Figura 2 [10], uma ligação direta em um motor CA por exemplo, é muito mais simples e eficiente de ser realizada através do uso do inversor de frequência do que de forma direta, pois o equipamento além de não necessitar da divisão do circuito de acionamento em comando e força, sendo capaz de realizar todo o processo de comando de forma direta, dispensa o uso de elementos como contatores, disjuntores e botoeiras, reduzindo custos e ocupando menos espaço nos quadros elétricos.

B. Funcionamento

De forma resumida, os inversores de frequência operam convertendo a tensão da rede elétrica de distribuição, que possui a sua frequência e amplitude definida em valores

constantes, em uma tensão com valores de amplitude e frequência variáveis. O fenômeno obtido a partir dessa relação será a variação da velocidade mecânica de rotação do eixo do motor alimentado pelo inversor.

Tal condição ocorre devido ao fato de que qualquer variação na frequência da tensão, irá provocar também uma variação equivalente na velocidade do campo eletromagnético girante nas bobinas do estator do motor, variação esta que será induzida no rotor e convertida em rotação mecânica no eixo.

O nível de eficiência e capacidade de operação de um inversor está diretamente relacionado aos parâmetros de tensão x frequência x torque, fazendo se fundamental a compreensão da relação entre torque e fluxo magnético.

De acordo com o guia técnico da WEG [7], o torque gerado por um motor de indução é definido pela seguinte equação:

$$T = k_1 \cdot \Phi_m \cdot I_2 \quad (1)$$

E o fluxo magnético pela seguinte equação:

$$\Phi_m = k_2 \cdot \frac{V_1}{f_1} \quad (2)$$

Onde:

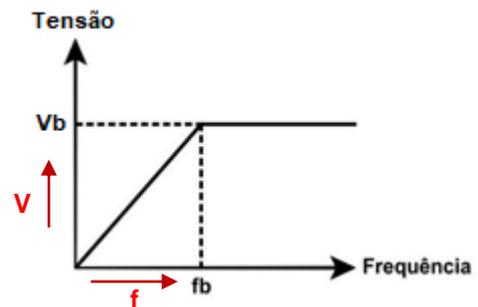
T	Torque desenvolvido no eixo do motor (N.m).
Φ_m	Fluxo de magnetização (Wb).
I_2	Corrente de rotação no eixo (A).
V_1	Tensão estática nas bobinas do estator (V).
k_1	Constante ligada ao material e ao projeto de construção do motor
k_2	Constante ligada ao material e ao projeto de construção do motor

Ao se admitir que o valor de corrente consumida pelo motor de indução depende da carga acoplada ao eixo, e considerando a carga com um valor fixo, pode-se dizer que o motor ao atingir a sua velocidade nominal, possuirá um valor de corrente praticamente constante.

Considerando esta condição, verifica-se que ao se variarem de forma proporcional as amplitudes e as frequências da tensão de entrada do motor, o fluxo de magnetização e o torque permanecerão os mesmos, no entanto, a velocidade de rotação mecânica no eixo irá variar, ou seja, a utilização do inversor possibilita o ajuste de velocidade e do conjugado do motor com relação a carga mecânica.

Através da relação definida acima, podemos finalmente estabelecer as condições ligadas a operação deste equipamento, que podem ser observadas na Figura 3 [7].

Figura 3: Relação entre tensão e frequência.

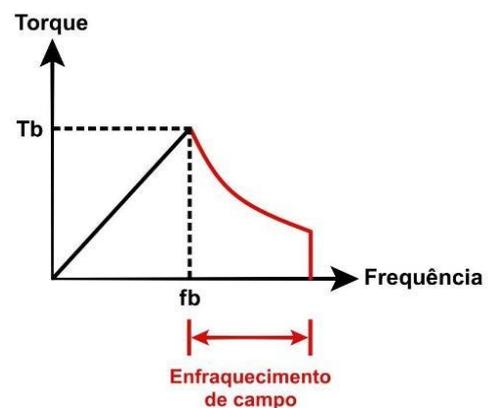


Como é possível verificar no gráfico da Figura 3, a relação de variação entre a tensão V e frequência f será proporcional e linear até a frequência nominal base (f_b) do motor. Acima desse valor, a tensão nominal base (V_b) irá se estabilizar e permanecer constante, sendo possível a partir desse ponto, variar somente a frequência da tensão aplicada aos enrolamentos do motor.

No entanto, apesar da tensão se manter estável e constante, a frequência, ao ultrapassar o limite nominal base, fará com que haja uma redução gradual no campo de magnetização gerado no estator, fenômeno este denominado como enfraquecimento de campo.

A medida em que a frequência for aumentando acima do limite, o fluxo de magnetização irá decrescer em curva, gerando a redução no torque do eixo do motor. No gráfico abaixo pode-se observar melhor essa relação torque x frequência, onde o aumento da frequência e do torque se mantém lineares até os seus respectivos pontos limites, torque nominal base (T_b) e frequência nominal base (f_b), onde a partir destes, surgirá uma região onde o torque será reduzido pelo aumento da frequência.

Figura 4: Relação entre torque e frequência.



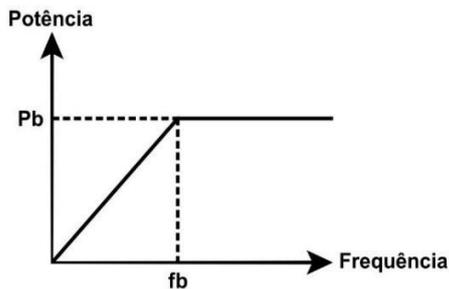
Como é possível observar na Figura 4 [7], o torque se mantém constante no seu ponto base. Considerado que a potência útil de um motor é definida pela relação (3):

$$\text{Potência} = \text{Torque} \times \text{Rotação} \quad (3)$$

É possível concluir que a potência útil do motor irá aumentar de forma proporcional e linear até atingir o limite da frequência base, e se estabilizará nesse ponto, se

mantendo constante, como pode-se observar no gráfico da Figura 5 [7].

Figura 5: Relação entre potência e frequência.



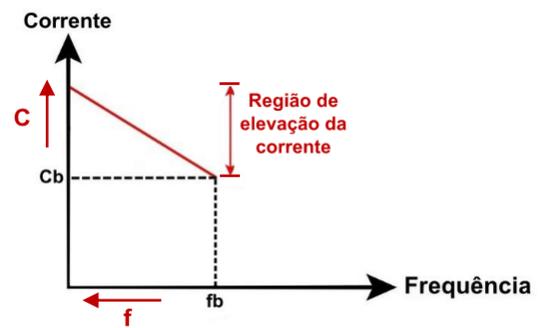
Ainda tratando sobre a questão da potência e da frequência nos motores de indução, um detalhe muito importante e que deve ser analisado com bastante atenção é a necessidade do uso e a utilização correta dos inversores no processo de partida de um motor.

Com exceção dos modelos destinados a aplicações específicas, os motores elétricos de indução são projetados para operarem nominalmente na frequência da rede de distribuição, ou seja, 60 Hz. A operação de um motor fora das especificações técnicas estipuladas pelo fabricante implica em vários riscos de segurança ao usuário além de afetar a vida útil do equipamento, portanto, é muito importante antes da instalação de um inversor, verificar se o motor a ser ligado ao equipamento é adequado para este tipo de operação.

Um dos principais problemas relacionados ao uso de inversores é o de superaquecimento nas bobinas dos motores devido a operação em baixa velocidade. Muitos modelos de motores, principalmente os mais antigos, como já foi mencionado anteriormente, foram projetados para operarem com os seus parâmetros nominais na frequência da rede de distribuição.

Caso este equipamento seja ligado em uma frequência inferior a qual foi projetado, o seu rotor passará a exigir um torque maior, com a corrente nas bobinas dos enrolamentos aumentando para tentar compensar e manter a potência exigida pela carga acoplada ao eixo, onde a medida em que a frequência for reduzida, os valores de corrente irão aumentar, levando ao aquecimento gradual das bobinas por conta do efeito joule. Por estar operando a uma velocidade inferior à da nominal devido a frequência menor da rede, o sistema de ventilação do motor não consegue resfriar adequadamente o estator, o que levará ao aumento da temperatura interna do motor, levando a danos estruturais e a sua possível queima no curto prazo.

Figura 6: Relação entre corrente e frequência.



Como é possível observar no gráfico da Figura 6, elaborada pelos autores, a medida em que a frequência f é reduzida da sua base nominal f_b , a corrente C começará a aumentar a partir da sua base nominal C_b , com essa elevação de corrente sendo a responsável por provocar o superaquecimento das bobinas dos motores, reduzindo a sua vida útil dos seus enrolamentos e a possível queima do motor.

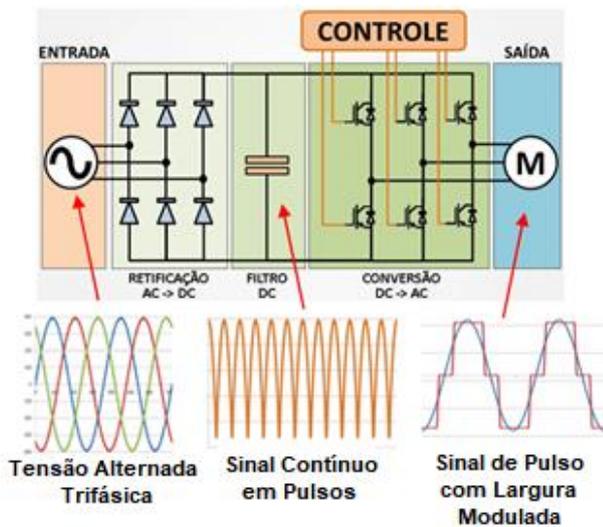
C. Estrutura

Os inversores de frequência funcionam convertendo primeiramente a tensão alternada (CA) da rede de alimentação do motor em tensão contínua (CC), e depois convertendo essa tensão CC em CA novamente, mas com a diferença de que na segunda conversão, a tensão CA será convertida em um sinal de pulso e com largura modulada, possibilitando assim que tanto a tensão como a frequência sejam ajustados, permitindo o controle da velocidade do motor.

A estrutura completa de um inversor de frequência pode ser dividida em [4]:

- 1) *Retificador*
Este componente é constituído por uma ponte retificadora trifásica, onde ligações de diodos irão retificar na entrada a tensão alternada vinda da rede elétrica em 60 Hz em um sinal de tensão contínua.
- 2) *Filtro*
O filtro é constituído por um barramento CC que tem por objetivo suavizar as ondulações no sinal CC gerado pelo retificador.
- 3) *Capacitores*
São os principais elementos que constituem o filtro, responsáveis por realizar o processo de filtragem e de ajuste das ondulações de tensão.
- 4) *Inversores*
São semicondutores que funcionam em corte e saturação (chaves abertas e fechadas respectivamente), fazendo a modulação do sinal CC e o convertendo em um sinal de pulso com largura modulada, conforme mostra a Figura 7 [05 e 10]

Figura 7: Circuito interno de um inversor de frequência.



D. Características

1) Rampas de aceleração e desaceleração

As denominadas rampas de aceleração e desaceleração são recursos presentes nos inversores, desenvolvidos com o intuito de evitar o acionamento e o desligamento abrupto do equipamento, preservando assim a sua vida útil.

O processo de acionamento por rampa em um inversor de frequência consiste em nada mais do que partir o motor com uma velocidade inferior à configurada, e ir o acelerando de forma gradual até que a atinja, dentro de um período de tempo pré-programado.

Exemplo: Se a rampa de desaceleração foi definida no inversor em 20 segundos para uma frequência de 100 Hz, então o motor irá partir de um valor nulo e irá aumentar a sua rotação conforme o valor de frequência for aumentando, até que aos 20 segundos o equipamento atinja a velocidade máxima correspondente ao valor de frequência definida em 100 Hz.

Já o processo de desaceleração por rampa funciona de maneira inversa, desacelerando o motor de forma gradual dentro de um período de tempo também pré-programado.

Essas funcionalidades, além de bastante versáteis e úteis, contribuem de forma significativa na redução de custos com manutenção, pois ao não ser necessário que o motor opere a máxima velocidade constantemente, o mesmo irá manter a sua integridade e a de outras estruturas presentes no processo ao qual faz parte preservadas por mais tempo, reduzindo o desgaste dos materiais e dispositivos envolvidos.

2) Economia de energia

Uma outra característica presente nos inversores é a possibilidade, dependendo da aplicação, da redução de consumo de energia em comparação com outros dispositivos de redução de velocidade (como redutores mecânicos), com um exemplo a ser citado sendo os da partida de motores responsáveis por processos de ventilação, compressão e bombeamento, onde o controle de vazão é realizado por dampers e válvulas.

A substituição destes dispositivos pelo inversor de frequência pode representar uma economia significativa de energia, uma vez que o inversor é capaz de realizar o ajuste de velocidade do motor em períodos definidos, diferentemente das válvulas, que somente realizam o controle da vazão durante o período em que o motor está com velocidade constante.

3) Ganho de produtividade

Os inversores possibilitam através do uso de sensores e medidores externos, que operações automáticas ligadas diretamente a variáveis do processo (como temperatura e pressão) sejam programadas diretamente no dispositivo através das suas portas de entrada, auxiliando assim no controle e monitoramento do processo, otimizando tornando mais eficiente toda a cadeia de produção.

4) Proteção

Os principais modelos disponíveis no mercado contam com sistemas de proteção contra oscilações de tensão na rede e controle de corrente, o que garantem uma vida útil maior ao equipamento.

E. Tipos de Inversores de Frequência

Os inversores de frequência podem ser divididos em dois tipos: Escalares e Vetoriais. Os inversores escalares operam em regime permanente, obedecendo a parametrização da relação Tensão/Frequência (V/F), onde se é estabelecido que tal relação deve ser diretamente proporcional entre ambas as variáveis para que o torque fornecido a carga seja constante, ou seja, caso seja realizada qualquer variação na frequência da alimentação do motor, o inversor deve realizar a compensação dessa diferença variando também a tensão na alimentação, e vice e versa, de forma a manter o equilíbrio dessa relação [6].

Este tipo de inversor não é capaz de fornecer altos torques em baixas rotações, sendo mais empregado em motores de equipamentos que exigem apenas partidas suaves e o controle da velocidade, como motores e ventiladores [6].

Já os inversores vetoriais não possuem uma curva de parametrização estabelecida, com ela variando conforme a necessidade do torque. Este tipo de inversor possui um nível de controle consideravelmente mais complexo, necessitando da inserção de outros parâmetros do motor na sua programação (como resistência, indutância, correntes nominais do motor e do estator), com essas informações sendo utilizadas para a realização de ajustes mais precisos no torque do motor, com as suas principais aplicações sendo em equipamentos que exijam um elevado nível de precisão no controle de velocidade, como em elevadores, guinchos e máquinas que necessitem além da variação de velocidade, o controle de torque e altas velocidades de resposta [6].

F. Vantagens e desvantagens dos inversores de frequência

Como já mencionado, a implementação dos inversores de frequência no processo de acionamento e controle de motores de indução assíncronos representou um salto tecnológico sem precedentes, e trouxe consigo diversas vantagens em comparação aos métodos anteriormente utilizados. Mas como em todo dispositivo que é parte fundamental na

operação de um processo, a sua utilização também apresenta algumas desvantagens, que apesar de inferiores em quantidade em comparação as vantagens, representam pontos importantes que devem ser avaliados, a Tabela 1 apresenta as vantagens e desvantagens da utilização dos inversores de frequência.

Tabela 1: Vantagens e desvantagens da utilização dos inversores de frequência

Vantagens	Desvantagens
Redução de consumo de energia em diversos processos, o que representa uma economia significativa nos custos finais de produção.	Custo de aquisição inicial consideravelmente alto, tornando-o não tão atrativo para aplicações de pequena escala.
Redução dos custos com manutenção, ao garantir uma vida útil operacional maior ao motor e aos elementos presentes no processo ao qual faz parte.	Necessidade de manutenção especializada, pois como se trata de um equipamento sofisticado, exige que a sua manutenção seja realizada por técnicos especializados, o que acaba por gerar custos adicionais à sua operação.
Redução dos valores de pico de corrente dos motores nas partidas.	
Ganho de produtividade, com o aumento da precisão e eficiência das operações dentro do processo de produção.	
Proteção dos motores contra surtos vindos da rede de alimentação.	
Processo de instalação simples.	
Aumento da segurança ao substituir o uso de variadores mecânicos e eletromagnéticos.	

III. CONCLUSÕES

Como foi possível verificar ao longo do nosso estudo, o surgimento e a implementação dos inversores de frequência foi responsável por uma verdadeira transformação no processo de acionamento de motores de indução CA, onde os avanços e descobertas possibilitaram, em comparação aos outros métodos, um nível muito maior de controle e gerenciamento dos equipamentos envolvidos nos processos de produção, reduzindo custos, otimizando recursos e aumentando a produtividade, abrindo assim espaço para o surgimento de toda um novo campo de estudos e possibilidades de aplicações, principalmente na indústria.

Nossa pesquisa teve por ideia e propósito originais, investigar e desenvolver de forma objetiva um resumo didático da literatura histórica e técnica ligada ao equipamento objeto da nossa análise, com todo o trabalho realizado tendo rendido bons resultados, cuja a finalidade foi a de fornecer a comunidade, sobretudo aos estudantes e profissionais da área, mais um referencial de estudo sobre o tema, onde procuramos apresentar e abordar o assunto sobre uma perspectiva que fosse de fácil entendimento e compreensão, que apesar de ser uma característica essencial no se refere a materiais de estudo, não foi por nós encontrada

em boa parte dos materiais que utilizamos em nossa pesquisa, sendo esta uma das razões utilizadas para a definição da concepção deste artigo.

Como uma sugestão para trabalhos futuros que possam vir a serem desenvolvidos a partir deste, deixamos como ideia, o desenvolvimento de estudos mais aprofundados a respeito da possibilidade e viabilidade da construção de projetos de inversores de frequência mais resistentes a ambientes com elevada umidade ou poeira, que conforme foi mencionado anteriormente, são condições que inviabilizam a utilização do equipamento em determinadas aplicações.

REFERÊNCIAS

- [1] ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. 2022. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 20 jul. 2022.
- [2] VIVACITY TECNOLOGIA. Introdução a Inversores de Frequência. 2022. Disponível em: <<https://www.vivacity.com.br/produtos/ProdutosDetalhes.asp?id=1528>>. Acesso em: 11 set. 2022.
- [3] OCA SOLAR ENERGIA. Inversor de frequência e soft-starter em comandos elétricos: entenda a diferença. 2020. Disponível em: <<https://www.ocaenergia.com/blog/comandos-eletricos/entenda-a-diferenca-entre-inversor-soft-starter-em-comandos-eletricos/>>. Acesso em: 11 set. 2022.
- [4] KALATEC AUTOMAÇÃO. Inversor de Frequência: Como Funciona, Tipos e Vantagens. 2021. Disponível em: <<https://blog.kalatec.com.br/inversor-de-frequencia>>. Acesso em: 11 set. 2022.
- [5] SILVEIRA, C. B. O que faz o Inversor de Frequência e como Especificar? 2016. Disponível em: <<https://www.citisystems.com.br/inversor-de-frequencia/>>. Acesso em: 20 de jul. 2022.
- [6] LEITE, Flávio A. Comparativo entre Variadores de Velocidade e Inversores de Frequência. 2018, 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Automação Industrial) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá, 2018. Disponível em: <<https://www.engautomacao.araxa.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/152/2018/12/TCC-FI%20c3%a1vio-Aparecido-Leite.pdf>>. Acesso em: 20 de jul. 2022.
- [7] WEG. Motores de indução alimentados por inversores de frequência PWM. 2016. Disponível em: <<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h35/h10/WEG-motores-de-inducao-alimentados-por-inversores-de-frequencia-pwm-50029351-brochure-portuguese-web.pdf>>. Acesso em: 20 nov. 2022.
- [8] MCEIG. Partida Direta de Motor. 2022. Disponível em: <<https://www.mceig.com.br/partida-direta-de-motor/>>. Acesso em: 20 nov. 2022.
- [9] CETTI. Inversor de Frequência Trifásico WEG CFW300. 2022. Disponível em: <<https://www.cetti.com.br/inversor-de-frequencia-trifasico-weg-cfw300-2cv-7-3a-1-5kw-220v>>. Acesso em: 20 nov. 2022.
- [10] MAIKE TECH. O que é um inversor de frequência? 2020, Disponível em: <<https://maiketech.blogspot.com/2020/06/o-que-e-um-inversor-de-frequencia.html>>. Acesso em: 20 nov. 2022.