

ANÁLISE DE PROCEDIMENTOS NA MANUTENÇÃO PREVENTIVA EM INVERSORES DE FREQUÊNCIA PARA TRABALHOS ENTRE 200 E 600 CV

Inácio Oliveira Borges¹

Nestor Galvez Ronceros²

Resumo: Devido à criticidade de sistemas que utilizam motores elétricos acima de 200CV, onde muitas vezes esse motor é o coração da planta, ou seja, o principal processo da planta industrial, a sua confiabilidade e rendimento deve sempre ser o mais alto possível. A implementação de um roteiro de manutenção preventiva nos inversores que comandam essas máquinas é de extrema importância para evitar paradas não programadas decorrentes de falhas que podem acarretar custos de manutenção elevados e prejuízos por falta de operação da linha de produção.

Palavras-chave: Inversor, Manutenção, Eletrônica Industrial.

Abstract: Due to the criticality of systems that use electric motors above 200CV, where this motor is often the heart of the plant, that is, the main process of the industrial plant, its reliability and efficiency must always be as high as possible. The implementation of a preventive maintenance schedule in the inverters that control these machines is extremely important to avoid unscheduled stops resulting from failures that can lead to high maintenance costs and losses due to the lack of operation of the production line.

Keyword: Inverter, Maintenance, Industrial Electronics.

1 Acadêmico em Engenharia Elétrica da UNIFACS – Universidade Salvador; E-mail: inacioob@gmail.com.

2 Orientador Professor da UNIFACS - Universidade Salvador; E-mail: ngalvezr1@yahoo.es

1 Introdução

De acordo com o Departamento de Energia (DOE) dos Estados Unidos, os motores são essenciais para a operação de quase todas as unidades fabris, sendo responsáveis por 60% a 70% de toda a eletricidade utilizada na indústria. Os motores elétricos estão presentes nos mais variados processos dentro da planta, do mais simples e leve trabalho como uma esteira transportadora ao mais complexo e pesado como um compressor ou um moinho.

Há alguns anos, a maioria das máquinas eram empregadas em uma única velocidade constante, e para essa finalidade, eram utilizadas chaves de partida direta. Com a modernização das plantas industriais e a necessidade de sistemas com controle de velocidade, os motores CC (corrente contínua) tomaram espaço devido a possibilidade de controle da rotação, porém com a desvantagem do elevado custo operacional por contarem com uma complexidade e demandarem mais manutenções do que os motores CA (corrente alternada), Franchi (2013).

Com a evolução da eletrônica de potência e o surgimento de microprocessadores, os inversores de frequência surgiram e a situação se inverteu, os motores CA tomaram cada vez mais espaço devido ao seu baixo custo de aquisição e manutenção. Nos dias atuais existem vários sistemas de eletrônica de potência que são capazes de fornecer potências e formas de ondas para as mais variadas aplicações, Umans (2014).

A definição de manutenção preventiva é tida pela manutenção efetuada em intervalos predeterminados, ou de acordo com critérios prescritos, sendo destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um item. (NBR 5462 da ABNT seção 2.8.7).

Os inversores de frequência são utilizados em sistemas onde há a necessidade do controle de velocidade e torque, utilizando da manipulação das grandezas elétricas que estão diretamente ligadas ao funcionamento dos motores elétricos, se aproveitando da economia de energia que o controle desses processos fornece, reduzindo perdas e mantendo sempre um alto rendimento do sistema, Danfoss (2022).

Um inversor de frequência trabalha transformando a tensão de entrada da rede CA, que por padrão opera na frequência de 60Hz no Brasil, em corrente contínua, e depois transformando de volta em corrente alternada com a capacidade de modular a tensão e frequência na saída com diversas proteções para o sistema. Inversores de frequência tem essa nomenclatura devido à natureza do seu funcionamento, convertendo a frequência da rede em uma ampla faixa de frequência podendo chegar a 400 Hz em alguns modelos mais robustos.

Os conversores de frequência também são conhecidos por outros nomes, como conversores de frequência de velocidade ajustável, conversores de frequência variável, conversores de frequência de velocidade variável, inversores de frequência, inversores e conversores de potência. (Danfoss, 2022)

O presente trabalho elabora um roteiro de manutenção preventiva focado nos principais pontos de falhas em conversores de frequência, e apresenta a importância de um bom planejamento voltado para a correção e prevenção dessas possíveis falhas, a fim de manter o rendimento e a confiabilidade do sistema sempre no maior nível possível.

2 Referencial Teórico

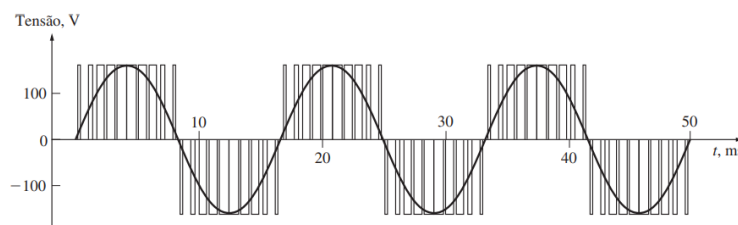
2.1 Funcionamento básico de um inversor de frequência

Segundo Umans (2014), a velocidade síncrona N (RPM) em motores de indução está relacionado com o número de polos magnéticos do motor P e é diretamente proporcional a frequência F (Hz) da corrente aplicada nas fases do motor como demonstrada na Eq. 1, ou seja, quanto maior a frequência elétrica, maior será a rotação no eixo do motor. Manipulando a frequência aplicada ao motor podemos controlar com precisão a rotação no eixo da máquina.

$$N = \frac{120 * F}{P} \quad (1)$$

O sistema de controle dos inversores de frequência utiliza o chaveamento por PWM (Pulse-Width Modulation) gerando um conjunto variado de pequenos pulsos afim de modular a tensão nas bobinas do motor e, conseqüentemente, a corrente resultante com frequência e amplitude controladas (WEG 2016). A Fig. 1 demonstra o sinal de corrente senoidal sobreposto aos pulsos PWM na saída de um inversor de frequência.

Figura 1: Exemplo de sinal PWM

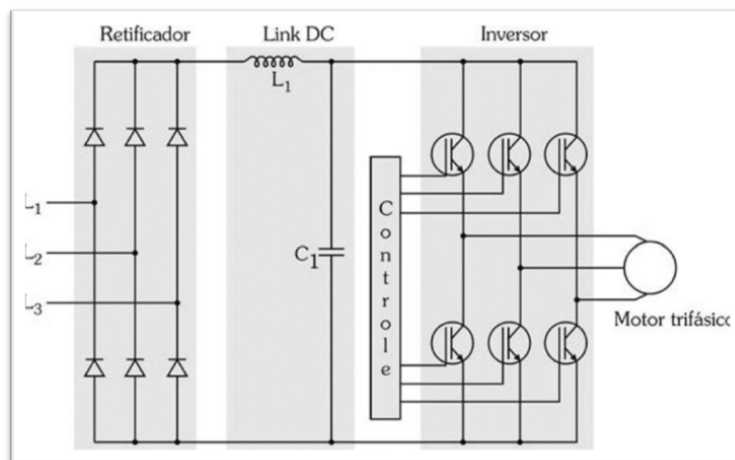


Fonte: Chapman, 2013

Uma definição bastante resumida de Hart (2016) é que um inversor de frequência funciona com um retificador ligado em série com o link DC formado por um filtro capacitivo para converter a tensão de entrada CA em Corrente Contínua, e um circuito inversor que converte a corrente contínua em corrente alternada novamente.

A Figura 2 demonstra de maneira simplificada o esquemático de um inversor de frequência. Os inversores de frequência podem ser divididos em blocos para facilitar o entendimento do conjunto:

Figura 2: Diagrama detalhado das etapas do inversor de frequência



Fonte: Franchi, 2009

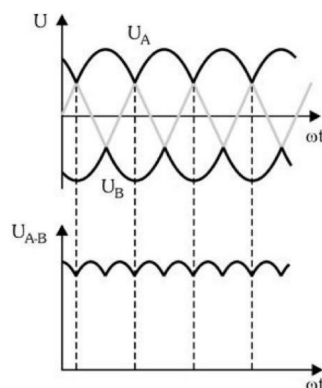
2.1.1 Retificador

Como a tensão de entrada da rede é em CA o primeiro passo a ser feito é converter a tensão alternada em tensão contínua, o dispositivo responsável por fazer essa conversão é o retificador. O circuito retificador é composto por componentes semicondutores que permitem a passagem de corrente em apenas uma direção (Malvino, 2016).

O formato de onda senoidal após passar pelo retificador se torna uma função pulsante em CC como exemplificado na Fig. 3.

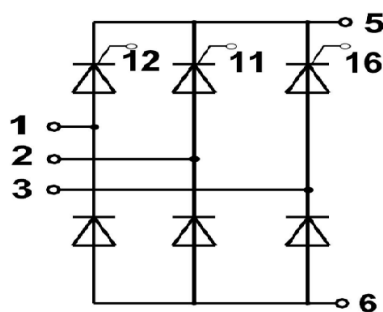
Nos inversores de potência acima de 200CV existem dois tipos de retificadores, os semi controlados, como exemplificado na Fig. 4, que utilizam diodos associados a tiristores, ou também conhecidos como SCRs (Silicon Controlled Rectifier), e os que utilizam apenas SCRs em sua construção e são conhecidos como retificadores controlados (Hart, 2012).

Figura 3: Forma de onda retificada



Fonte: Franchi, 2009

Figura 4: Esquemático de uma ponte retificadora semicontrolada utilizando SCRs em conjunto com diodos.



Fonte: Semikron, 2004

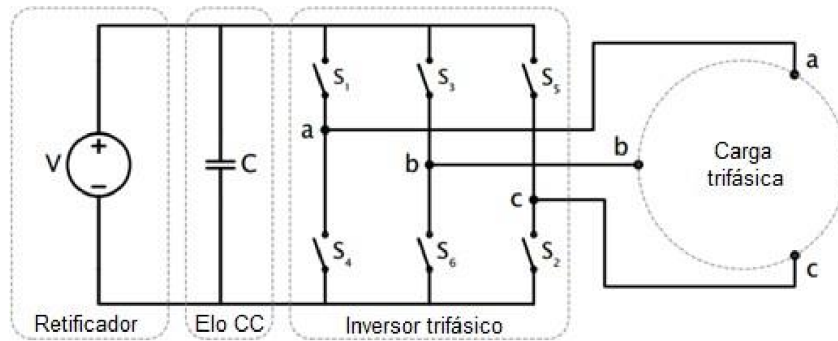
2.1.2 Link DC

O Link CC (corrente contínua), conhecido também como circuito intermediário, trabalha em conjunto com o retificador associado a um banco de capacitores a fim de manter sempre a tensão o mais estável possível no barramento CC do inversor. "Filtro ou Link CC: tem a função de regular a tensão retificada com armazenamento de energia por meio de um banco de capacitores" Franchi (2009, p.61).

2.1.3 Bloco Inversor

Segundo Borba (2009) o circuito inversor de tensão nada mais é do que um conversor CC-CA, ou seja, ele transforma a corrente contínua fornecida pelo circuito intermediário em tensão trifásica alternada. Na Fig. 5 é demonstrado o esquemático simplificado de um inversor de tensão trifásico.

Figura 5: Representação simplificada de um inversor de tensão

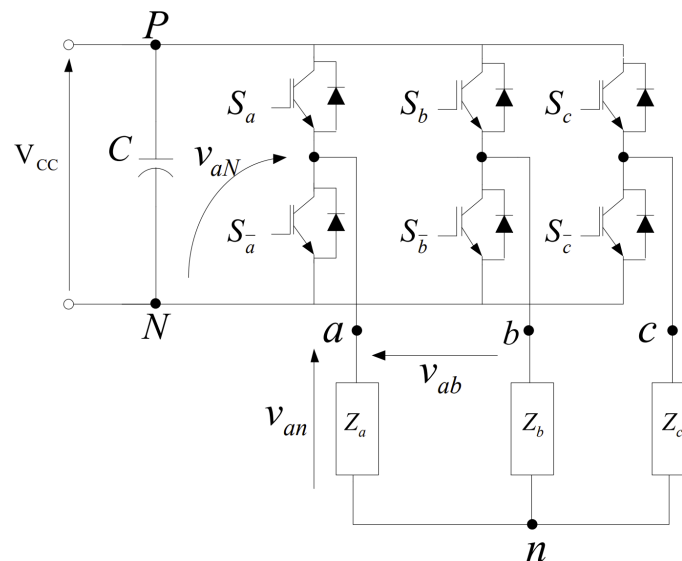


Fonte: Borba, 2009

Para o chaveamento da saída são utilizados semicondutores de potencia denominados IGBTs (Insulated-gate bipolar transistor ou Transistor bipolar de porta isolada). Para o estado de condução do IGBT deve-se aplicar uma tensão denominada de V_{ge} entre o terminal de Gate(G) e o Emissor(E) do transistor.

Para melhor entendimento da comutação de um IGBT são considerados sinais lógicos para acionamento dos transistores, onde o sinal logico 1 = V_{ge} e para o sinal 0 = $0V$. Um circuito inversor trifásico utiliza um conjunto de IGBTs montados em topologia ponte H trifásica representado na Fig. 6.

Figura 6: Representação esquemática de um Inversor trifásico



Fonte: Constantino, 2013

3 Metodologia

Neste trabalho é feito um comparativo entre a manutenção preventiva recomendada por fabricantes de conversores de frequência e a manutenção preventiva com abordagem analítica baseado nos pontos críticos de falhas descritos pelo presente trabalho.

3.1 Recomendações de manutenção preventiva fornecida pelos fabricantes

Os fabricantes de inversores em sua maioria fornecem em seus manuais um plano de manutenção preventiva sistemático, como exemplificado nas Fig. 7 e Fig. 8, essa manutenção informada nos manuais é baseada no MTBF (Mean Time Between Failures ou Tempo Médio Entre Falhas) dos componentes empregados nos drivers, mas não leva em consideração os testes recomendados pelos fabricantes destes componentes eletrônicos ou a condição ambiental em que a máquina opera na planta.

Figura 7: Recomendação da WEG para Manutenção preventiva em inversores da Família CFW11M

Manutenção		Intervalo	Instruções
Troca dos ventiladores		Após 50000 horas de operação. ⁽¹⁾	Procedimento de troca apresentado na figura 6.2.
Troca da bateria da HMI		A cada 10 anos.	Consulte o capítulo 4.
Capacitores eletrolíticos	Se o inversor estiver estocado (sem uso): "Reforming"	A cada ano, contado a partir da data de fabricação informada na etiqueta de identificação do inversor (consulte a seção 2.6).	Alimentar a UP11 (nos pontos +UD e -UD) com tensão entre 250 a 350 Vcc, por 1 hora no mínimo. Após, desenergizar e esperar no mínimo 24 horas antes de utilizar o inversor (reenergizar).
	Inversor em uso: troca	A cada 10 anos.	Contatar a assistência técnica da WEG para obter procedimento.

Fonte: WEG, 2022

Faz-se necessário atenção redobrada principalmente aos semicondutores de potência que operam em correntes na ordem de até 1000A e qualquer perturbação pode causar o mal funcionamento podendo levar até a queima dos semicondutores, acarretado paradas não programadas e custos elevados de manutenção, podendo ocorrer ainda a inviabilidade de reparo, sendo necessária a substituição do inversor.

Figura 8: Recomendação de inspeções periódicas a cada 6 meses em inversores da Família CFW11M

Componente	Anormalidade	Ação Corretiva
Terminais, conectores	Parafusos frouxos	Aperto
	Conectores frouxos	
Ventiladores / Sistema de ventilação	Sujeira nos ventiladores	Limpeza
	Ruído acústico anormal	Substituir ventilador. Consulte a figura 6.2.
	Ventilador parado	Verificar conexões dos ventiladores
	Vibração anormal	
	Poeira nos filtros de ar dos painéis	Limpeza ou substituição
Cartões de circuito impresso	Acúmulo de poeira, óleo, umidade, etc.	Limpeza
	Odor	Substituição
Módulo de potência / Conexões de potência	Acúmulo de poeira, óleo, umidade, etc.	Limpeza
	Parafusos de conexão frouxos	Aperto
Capacitores do barramento CC (Circuito Intermediário)	Descoloração / odor / vazamento de eletrólito	Substituição
	Válvula de segurança expandida ou rompida	
	Dilatação da carcaça	
Resistores de potência	Descoloração	Substituição
	Odor	
Dissipador	Acúmulo de poeira	Limpeza
	Sujeira	

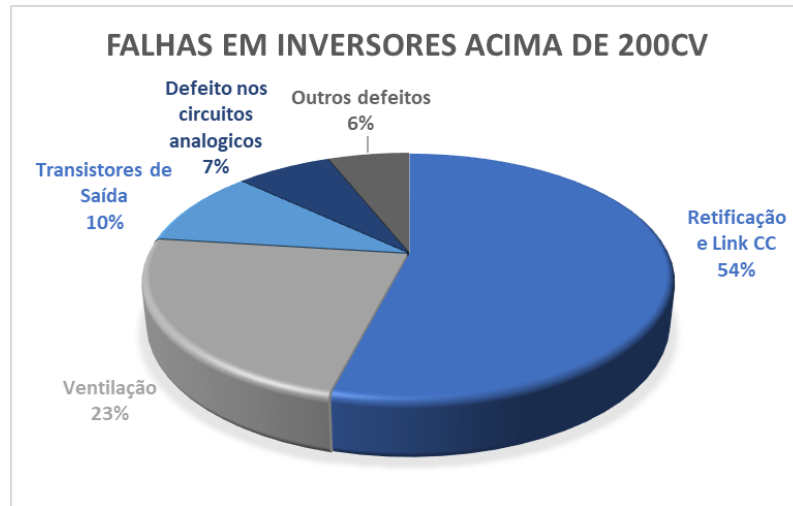
Fonte: WEG, 2022

3.2 Pontos críticos de falha

Analizando a base de dados contendo as ordens de serviços de uma assistência técnica especializada em inversores de frequência, durante um período de outubro de 2021 a outubro de 2022 com uma amostra de 200 ordens de serviço, foi verificado que os pontos com maior ocorrência de falhas em inversores estão relacionadas à etapa de retificação dos drivers, a segunda maior frequência de falhas é no sistema de ventilação e dissipadores de calor e, em terceiro lugar, ficam as falhas no bloco inversor e nos transistores de saída do driver. O gráfico mostrado na Fig. 9 representa a distribuição das falhas na amostra

Levando em consideração esses dados foi elaborado o roteiro de manutenção preventiva focado nos três setores que mais apresentam falhas, os quais sozinhos contam com mais de 85% das ocorrências de manutenções, para que haja uma maior agilidade na execução das intervenções e melhorar a eficiência e confiabilidade na operação da máquina após a manutenção.

Figura 9: Gráfico de Falhas em Inversores de frequência



Fonte: Autor, 2022

3.2.1 Teste da Retificação

Para averiguar se o diodo encontra-se danificado são feitos dois ensaios, o teste de condução direta é realizado com o auxílio de um multímetro devidamente calibrado e certificado, deve-se ajustar para a função teste de diodo, conectar a ponta positiva ao anodo e a negativa no catodo (polarização direta), o multímetro deve acusar condução (Malvino, 2016). Caso não ocorra, o diodo encontra-se aberto e deve ser substituído.

O Teste de tensão de bloqueio deve ser realizado com um Megômetro (Testador de resistência de isolamento) exemplificado pela Fig. 10, ajustando a escala de tensão para um valor menor do que a tensão de isolação do componente conforme indicado no datasheet, a medição é feita conectando a garra positiva ao catodo e a garra negativa ao anodo do diodo (polarização reversa), o equipamento deve exibir uma leitura em MΩ (Megaohms).

Com o valor apresentado é feito o calculo de corrente de fuga I_{DDMEG} e comparado com o valor do limite de corrente I_{DD} apresentado no datasheet do componente. O calculo é feito conforme a Eq. 2 caso $I_{DDMEG} > I_{DD}$ o componente encontra-se danificado e deve ser substituído. Semikron (2020)

$$I_{DDMEG} = \frac{V}{R_{MEG}} \quad (2)$$

Figura 10: Megômetro utilizado nos testes



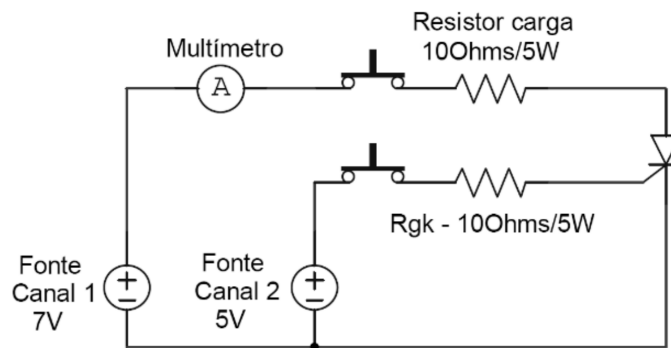
Fonte: Autor, 2022

No caso de SCRs o procedimento para teste de condução é feito da mesma forma apresentada para diodos, porém o multímetro neste caso não deve acusar condução. Se o tiristor conduzir, estará em curto-circuito e deve ser substituído.

O teste de tensão de isolamento em tiristores é o mesmo descrito anteriormente para teste em diodos.

Nos tiristores é necessário também ser feito o teste de integridade do gate de disparo, medindo-se a resistência gate-catodo conectando a ponta positiva no terminal do gate e a ponta negativa no catodo do tiristor, o valor não pode exceder 40Ω (valido para componentes fabricados pela SEMIKRON) e conforme circuito apresentado na Fig. 11 são feitos os testes de ativação pelo sinal de gate. Semikron (2020)

Figura 11: Circuito Sugerido pela SEMIKRON para teste dos Gates em SCRs

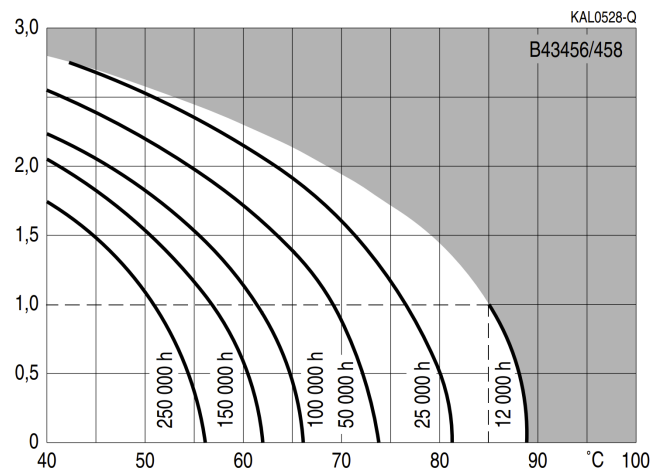


Fonte: Semikron, 2020

3.2.2 Teste do Barramento CC

Um dos componentes mais suscetíveis a falhas no barramento CC é o Capacitor Eletrolítico de Alumínio, devido a sua sensibilidade a temperatura de operação. A vida útil dos capacitores cai drasticamente conforme a temperatura sobe como pode ser visto na Fig. 12. Como exemplo podemos utilizar o capacitor de Referência B43456 da fabricante EPCOS, com uma temperatura de trabalho de 50°C a vida útil é cerca de 250 mil horas e com o acréscimo de apenas 10°C, ou seja, o capacitor trabalhando a uma temperatura de 60°C a vida útil cai cerca de 40%, indo para um valor aproximado de 150 mil horas.

Figura 12: Gráfico da Vida Útil de um Capacitor de Alumínio em Função da Temperatura

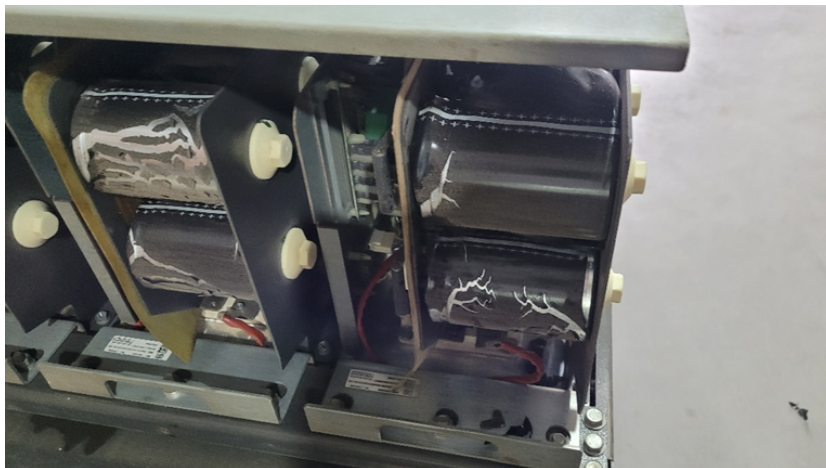


Fonte: EPCOS, 2008

Os testes no banco de capacitores consistem inspeção visual em busca de possíveis pontos de rompimento do encapsulamento ou vazamento do eletrólito e a verificação das válvulas de proteção. Em seguida é realizada a medição da capacitância individual de forma separada para cada capacitor que compõe o banco de capacitores, comparando os valores de referência no datasheet do fabricante dos capacitores como margem de tolerância para a capacitância medida e para a ESR(Equivalent Series Resistance).

Na Figura 13 é demonstrado uma falha devido a operação em temperatura acima do recomendado pelo fabricante dos capacitores

Figura 13: Exemplo de falha em banco de capacitores devido à sobretemperatura



Fonte: Autor, 2022

3.2.3 Teste da ventilação e substituição das interfaces térmicas

O sistema de ventilação é testado com o auxílio de um anemômetro representado na Fig. 14 posicionado nas saídas de ar do inversor, comparando cada saída isoladamente e considerando uma margem de diferença de velocidade do ar de 20% para um saídas em um mesmo equipamento. Caso seja detectada alguma alteração nas saídas de ar, é necessário posicionar um tacômetro no eixo do ventilador para verificação da RPM em cada ventilador e comparar com a rotação nominal indicada na plaqueta do ventilador.

Figura 14: Exemplo de Anemometro

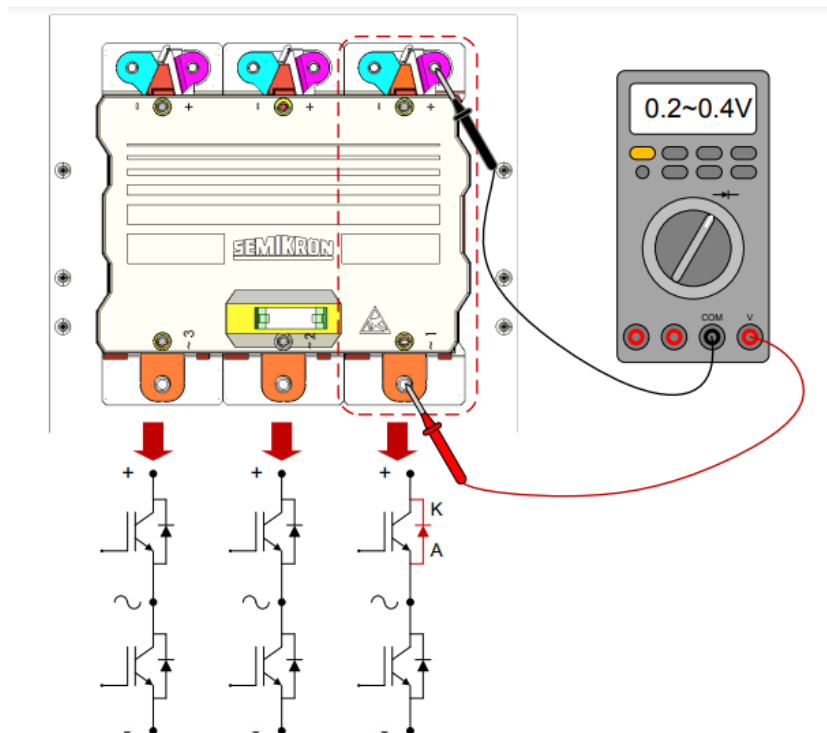


Fonte: Autor, 2022

3.2.4 Teste bloco inversor

Por se tratar de componentes complexos a medição utilizando um multímetro digital se torna inviável, sendo possível apenas a medição dos diodos de roda livre que são implementados em paralelo com os transistores. A queda de tensão no diodo deve estar dentro da faixa entre 200mV e 400mV como pode ser visualizado na Fig. 15.

Figura 15: Teste dos diodos de roda livre nos módulos de potencia



Fonte: Semikron, 2020

Com o auxílio de um osciloscópio é realizado o teste dos sinais de saída do inversor como demonstrado na Fig. 16, é de extrema importância que o osciloscópio seja apropriado para esse tipo de aplicação, onde os canais de medição sejam isolados, afim de evitar uma possível interferência entre os canais ou até um curto-circuito entre as fases.

Figura 16: Demonstração dos sinais de saída do inversor

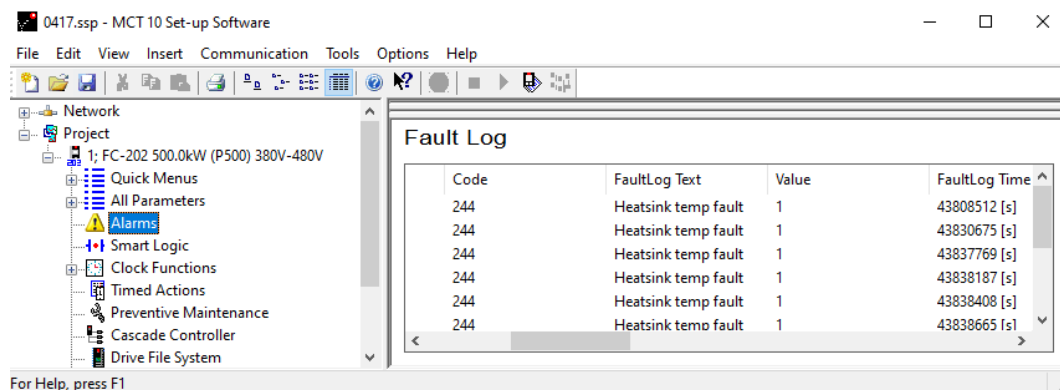


Fonte: Autor, 2022

3.2.5 Verificação do histórico interno de falhas

Utilizando de softwares fornecidos pelos fabricantes, como por exemplo o VLT® Motion Control Tool MCT 10 fornecido de forma gratuita pela Danfoss, demonstrado na Fig. 17, conseguimos visualizar um histórico de falhas salvo na memória do equipamento, com marcação de data e valores de medições internas do inversor. A consulta a esse histórico tem a finalidade de localizar possíveis falhas comuns ao drive em específico e tentar corrigir para que se seja atenuada a ocorrência dessas falhas, diminuindo assim a ocorrência de paradas futuras não programadas

Figura 17: Software de monitoramento fornecido pela Danfoss

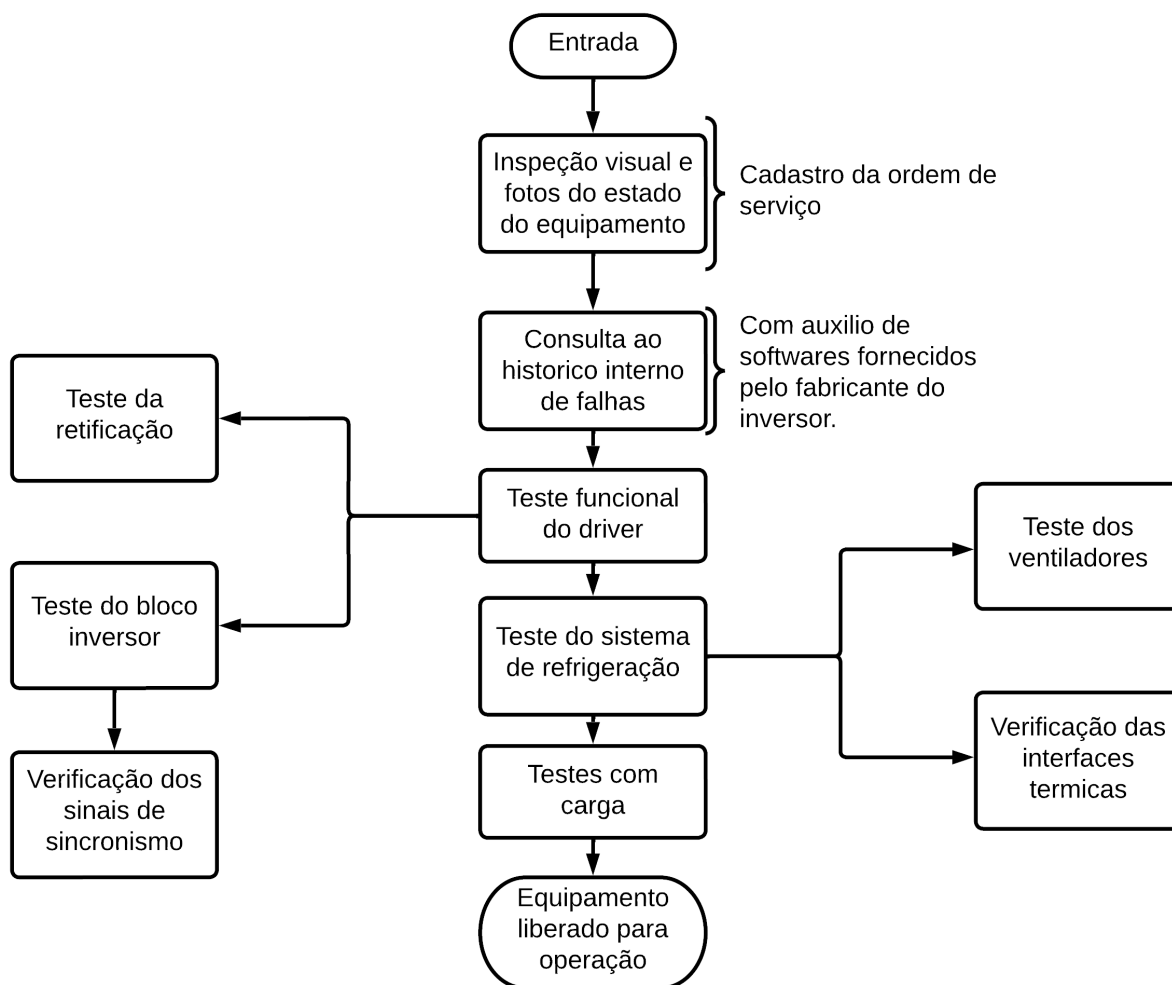


Fonte: Autor, 2022

4 Resultados obtidos

Com os dados coletados e experimentos realizados, foi elaborado o roteiro para manutenções preventivas voltado aos pontos críticos de falhas em inversores de frequência para potências acima de 200CV e demonstrado pelo fluxograma na Fig. 18

Figura 18: Fluxograma para manutenção preventiva



Fonte: Autor, 2022

4.1 Teste em inversor real

Marca: Danfoss

Modelo: VLT AutomationDrive FC 302

Potência do motor: 600CV

Tensão de operação: 440V

Corrente nominal do Motor: 690 A

O equipamento opera um motor acoplado a um compressor de amônia, responsável pela refrigeração de um processo onde há a necessidade de baixíssimas temperaturas para o correto funcionamento da linha, ou seja, é imprescindível que a operação esteja no mais perfeito nível de confiabilidade, pois uma parada não programada resulta no desligamento de cerca de 70% da produção total da indústria.

Com aproximadamente 44 mil horas de operação total, decorridas 4 horas de operação com carga nominal o driver apresentou a Falha 244 (Falha de temperatura no dissipador) e chegando a marcar 85°C. Para contornar a falha, o eletricitista responsável pela máquina reduziu a potência para 85% da potência nominal do motor, mas com isso o rendimento do sistema também foi reduzido, provocando uma diminuição na produção. Todas as manutenções preventivas executadas no conversor de frequência foram as tabeladas pelo fabricante, mas mesmo assim não foi sanado o problema de sobreaquecimento no driver.

Seguindo o roteiro da manutenção proposta por este trabalho, a Fig. 19 demonstra a consulta ao histórico de falhas com auxílio do software VLT® Motion Control Tool MCT 10, e como pode ser verificado existe uma recorrência de falhas com o código 244.

Figura 19: Histórico de Falhas retirado do software MCT10 Fornecido pelo fabricante

Fault Log

Code	FaultLog Text	Value	FaultLog Time
244	Heatsink temp fault	1	43808512 [s]
244	Heatsink temp fault	1	43830675 [s]
244	Heatsink temp fault	1	43837769 [s]
244	Heatsink temp fault	1	43838187 [s]
244	Heatsink temp fault	1	43838408 [s]
244	Heatsink temp fault	1	43838665 [s]

Fonte: Autor, 2022

Durante a intervenção foi detectado que a rotação no eixo do ventilador responsável pela refrigeração do bloco retificador estava com cerca de 70% do RPM nominal,

e com isso, a ventilação não estava sendo suficiente para refrigerar o equipamento em plena carga, foi feita a substituição do ventilador. A manutenção seguiu todas as etapas e nenhuma avaria a mais foi localizada.

Apos finalizada a manutenção, o driver foi colocado em operação novamente para teste em carga nominal por um período de 10 horas continuas com condições ambientais normais. Após decorrido o período de teste foi feito novamente uma consulta ao driver e não foi detectado nenhuma falha durante o intervalo, atestando a assertividade da intervenção e liberando o equipamento para operação normal.

5 Conclusões

No presente trabalho foi elaborado um roteiro para manutenção preventiva em inversores de frequência para trabalho em motores entre 200CV e 600CV afim de melhorar a confiabilidade do sistema e manter o rendimento sempre o maior possível, a partir da análise dos pontos criticos de falhas e seguindo recomendações e manuais dos principais fabricantes de semicondutores.

Após teste em um inversor real foi constatado uma melhoria de aproximadamente 13% na potência nominal do equipamento o que comprova a assertividade da manutenção e exemplifica como a manutenção pode retomar o rendimento da máquina em casos de redução da potência devido a alguma falha nos componentes de potência.

Devido à natureza e complexidade das intervenções é imprescindível que os instrumentos utilizados sejam de alta precisão e de fabricantes especializados em eletrônica industrial para que possa haver confiabilidade nas medições, evitando assim, medições incorretas podendo levar a falsos positivos ou passar despercebido algum componente em falha.

Com um correto planejamento e execução da manutenção preventiva elaborada por este trabalho é constatado uma melhoria na confiabilidade do equipamento, prolongado sua vida útil e mantendo a produção em seus níveis nominais conforme dimensionamento da planta. Há ainda uma economia de energia decorrente da retomada da eficiência energética após a intervenção, diminuindo perdas por aquecimento no conversor de frequência.

Levando em consideração as observações sobre rendimento pontuadas, ainda é possível, a partir de um estudo stricto sensu futuro, determinar cientificamente melhorias no método de análise a partir das curvas de desempenho e rendimento.

REFERENCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462: Confiabilidade e manutenibilidade**. Rio de Janeiro, 1994.
- BORBA, J. L. **Sistema de Transmissão Elétrica**. 2009. 242 p. Programa de especialização profissional (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Ferroviária) – Pontifícia Universidade Católica, Minas Gerais, 2009.
- BROCKVELD JUNIOR, Luis. **Embasamento teórico para o projeto de um inversor de frequência**. 2015. 111 f. Dissertação (trabalho de conclusão de curso) – Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2015.
- CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de máquina elétricas**. 5 ed. AMGH Ltda, 2013.
- CONSTANTINO, J.D.S. **Construção De Um Variador De Frequência**. Porto: Instituto Superior de Engenharia do Porto, Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores; 2013.
- D. Grahame Holmes; Thomas A. Lipo, **Pulse Width Modulation for Power Converters: Principles and Practice**. IEEE, 2003.
- DANFOSS. **O que é um conversor de frequência**, c[s.d.]. Sobre a Danfoss. Disponível em: <<https://www.danfoss.com/pt-br/about-danfoss/our-businesses/drives/what-is-an-ac-drive/>>. Acesso em: 20, nov. de 2022.
- EPCOS, **Aluminum Electrolytic Capacitors B43456/58 - Datasheet**. EPCOS AG, 2008
- FRANCHI, Claiton Moro. **Inversores de frequência: teoria e aplicações**. Saraiva Educação SA, 2009.
- Hart, Daniel W. **Eletrônica de potência: análise e projetos de circuitos**. McGraw Hill Brasil, 2012.
- MALVINO, Albert P., and David J. Bates. **Eletrônica-Vol. 1-8ª Edição**. McGraw Hill Brasil, 2016.
- MARTINS, D. C., BARBI, I. **Eletrônica de potência: introdução ao estudo dos conversores CC-CA**. Florianópolis: Ed. dos Autores, 2005. 394p.
- PONHE, Luiz Henrique **Inversor de Frequência: O Uso em Motores Elétricos**. 2019. Dissertação (trabalho de conclusão de curso) Uniderp - Anhanguera, Campo Grande, 2019
- SEMIKRON, **Application Note - Teste de Diodos e Tiristores**. Semikron, 2020
- SEMIKRON, **Application Note - Field-Testing of Power Semiconductor Modules**. Semikron, 2020

SEMIKRON, **SKDH116/16-L75 - Datasheet**. Semikron, 2004

UMANS, Stephen D. **Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley-7**. AMGH Editora, 2014.

WEG. **Guia de aplicação de inversores de frequência**. Jaraguá do Sul: WEG, 2005.

WEG, **Manual do inversor de frequência - CFW11M**. Jaraguá do Sul: WEG, 2022.

WEG. **Motores de indução alimentados por inversores de frequência PWM**. Jaraguá do Sul: WEG, 2016.