

ANÁLISE DE CARGAS SENSÍVEIS A AFUNDAMENTOS MOMENTÂNEOS DE TENSÃO EM PLANTAS INDUSTRIAIS

Tadeu Luiz Xavier Veiga – tadeu_1991@hotmail.com

Ms. Edison Massao Motoki (Orientador) – edison.motoki@mackenzie.com.br

RESUMO

Os Afundamentos Momentâneos de Tensão (AMTs) são distúrbios intrínsecos à operação do sistema elétrico de potência, sendo um dos principais fatores que ocasionam problemas de Qualidade de Energia Elétrica (QEE) principalmente nos sistemas de distribuição. Sua ocorrência pode resultar em aplicação de penalidades financeiras por órgão regulador às concessionárias, perdas financeiras e diversos transtornos principalmente aos consumidores industriais, bem como na diminuição da confiabilidade e eficiência do sistema elétrico. No presente trabalho foram selecionados para análise dois equipamentos considerados como cargas de maior utilização nos processos de controle e automação industriais e de maior sensibilidade aos AMTs: o contator eletromagnético de Corrente Alternada (CA) e o inversor de frequência, do termo inglês “*Adjustable Speed Drive (ASD)*”. Ambos os equipamentos foram submetidos a AMT através de simulação em bancada, sendo posteriormente realizado o levantamento das suas curvas de sensibilidade considerando-se a magnitude e duração do AMT e então realizada a análise dos efeitos provocados em cada uma das cargas. Os resultados atestam os dados teóricos anteriormente consultados na revisão da literatura, confirmando alto nível de sensibilidade do contator CA e do inversor de frequência.

Palavras-chave: Afundamento momentâneo de tensão. Cargas sensíveis. Qualidade de energia.

ANALYSIS OF LOADS SENSITIVE TO VOLTAGE SAGS IN INDUSTRIAL PLANTS

ABSTRACT

Voltage sags are disturbances intrinsic to the operation of the power electrical system, being one of the main factors that cause Power Quality (PQ) problems mainly in distribution systems. Their occurrence may result in the application of financial penalties by a regulatory agency to the utilities, financial losses and several inconveniences mainly to industrial consumers, as well as a decrease in the reliability and efficiency of the electrical system. In the present work, two pieces of equipment were selected for analysis, considered to be the most widely used loads in industrial control and automation processes and to be the most sensitive to voltage sags: the alternating current (AC) electromagnetic contactor and the frequency inverter, of the English term "Adjustable Speed Drive (ASD)". Both equipment were been submitted to the voltage sags through benchtop simulation,

being later carried out the survey of their sensitivity curves considering the magnitude and duration of the voltage sags and then the analysis of the effects caused on each load. The results attest the theoretical data previously consulted in the literature review, confirming the high level of sensitivity of the AC contactor and the frequency inverter.

Keywords: Voltage Sag. Sensitive loads. Power Quality.

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Saes (2010), a energia elétrica tornou-se insumo imprescindível e indispensável para o novo modelo da atividade industrial, tornando-se o principal indicador do nível de desenvolvimento tecnológico, econômico, social e político de cada país.

De acordo com Bollen (2000), o desenvolvimento tecnológico fez com que os equipamentos se tornassem cargas sensíveis a determinados distúrbios comuns à configuração e operação do sistema elétrico, como por exemplo, os inversores de frequência para controle de velocidade de motores e os sistemas de controle à base de microprocessadores como o controlador lógico programável (CLP).

Ainda de acordo com Bollen (2000), em decorrência de eventos elétricos provocados por curtos-circuitos no sistema de distribuição de energia, principalmente as Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD) e dentre as quais mais especificamente o AMT, esses equipamentos sofrem interrupções e falhas em seu funcionamento e conseqüentemente desligamentos inesperados dos circuitos conectados a eles, podendo citar ainda o contator CA eletromagnético, que é tão importante e de relevante impacto aos circuitos elétricos industriais quanto os equipamentos anteriormente citados, e igualmente sensível a esses distúrbios.

Portanto, este trabalho foi desenvolvido tendo como premissa, a VTCD especificamente o AMT, cuja duração da variação é superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos, e cuja amplitude da tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência seja superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u, conforme definido e regulamentado pelo módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST, 2020).

A sua realização tem ainda como justificativa a grande relevância do tema no âmbito nacional e internacional, bem como dos efeitos resultantes desse distúrbio ao sistema elétrico, tendo maior impacto nos consumidores industriais, no entanto, afetando toda a sociedade direta ou indiretamente pelos diversos fatores, conforme aborda Carvalho Filho (2000), que os AMTs são responsáveis por uma alta frequência de ocorrências de interrupções parciais ou até totais em plantas fabris, sendo fator de grandes prejuízos financeiros e abrangendo diversos setores industriais.

Neste mesmo sentido, para Watanabe (2010), descumprimento de prazos, perdas de matéria prima, manutenções desnecessárias e interrupção de cadeias produtivas, são alguns dos efeitos diretos dessas paradas decorrentes de AMT nos circuitos elétricos industriais, devido à sensibilidade de cargas a esse distúrbio, e ainda prossegue: “Dentre os fenômenos envolvendo a QEE, os afundamentos momentâneos de tensão (AMT) são os fenômenos mais relevantes a serem investigados e os que provocam maiores prejuízos aos consumidores” (WATANABE, 2010, p.12).

Outra consequência de cargas sensíveis causando interrupções parciais ou totais por AMT segundo Motoki (2007) é o aumento da relação consumo/toneladas, tendo em vista a quebra produtiva com o reinício de processos e máquinas, demandando maiores recursos do que seria necessário, impactando no aumento dos custos operacionais, perda de lucratividade das empresas e consequentemente o aumento do preço dos produtos aos consumidores finais.

Os objetivos do presente trabalho se deram na realização do levantamento da literatura técnica, elaboração da base teórica sobre sensibilidade de equipamentos industriais, submetendo a AMT por meio de simulação em bancada e o levantamento da curva de sensibilidade de duas cargas de alta relevância na automação e controle industriais, a saber, o contator CA eletromagnético e o inversor de frequência, com posterior análise dos efeitos causados a eles pelo distúrbio estudado.

Com dados coletados em simulação em bancada e o levantamento das curvas de sensibilidade dos referidos equipamentos, espera-se uma contribuição técnica de relevância, com a possibilidade de análises mais precisas quanto a comprovação da sensibilidade de determinados equipamentos industriais devido AMT e ainda na contribuição para a melhoria dos conceitos teóricos anteriormente vistos em sala de aula, preenchendo assim, a lacuna entre o aprendizado teórico com a prática que foi encontrada no ambiente industrial real.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Os AMTs são distúrbios provenientes de faltas provocadas em sua maioria segundo Bollen (2006) e Dugan (2004), por descargas atmosféricas, partida de motores de grande porte, energização de transformadores e ocorrências de faltas (curtos-circuitos) na rede elétrica de transmissão ou distribuição, sendo também conhecidos pelas expressões do inglês “*voltage sag*” e “*voltage dip*”.

São definidos pelo “*Institute of Electric and Electronics Engineers (IEEE)*” pela norma 1159 (1995), como sendo “[...] redução do valor RMS da tensão para um valor entre 0,1 e 0,9 p.u., durante um período de tempo compreendido entre ½ ciclo e 60 segundos.” (*IEEE 1159, 1995*) e pelo “*International Electrotechnical Commission (IEC)*” como sendo “[...] uma queda do valor RMS da tensão entre 0,10 e 0,99 p.u., durante um período de tempo compreendido entre 1/2 ciclo e alguns segundos.” (*IEC 61000-4-30, 2011*).

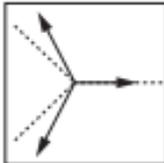
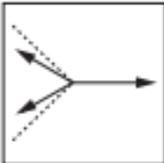
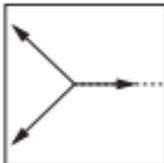
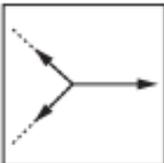
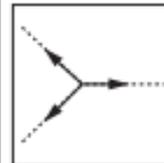
Na década de 90 concluiu-se que “Este distúrbio é o que possui maior incidência em instalações industriais, chegando a 68% do total dos distúrbios registrados e é o principal causador de perda de produção” (SARMIENTO; ESTRADA, 1996, p.17) e já no início dos anos 2000, segundo (BRUMSICKLE, 2001) os AMTs e interrupções momentâneas somavam 92% dos problemas relacionados à QEE às quais os consumidores industriais eram submetidos, demonstrando o avanço tecnológico na indústria em um período de dez anos e o que esse avanço demandou dos novos equipamentos.

Carvalho Filho (2009) descreve que o sistema elétrico, tanto de transmissão quanto de distribuição, é alvo de diversos distúrbios causado por inúmeros eventos, como quedas de raios, queimadas, contato em árvores ou falhas em equipamentos que resultam na diminuição do grau de QEE e conseqüentemente possíveis transtornos aos usuários conectados à rede.

A exemplo de números dessas faltas, afirma Gomes que: “Em países tropicais, como o Brasil, as causas de falhas são devidas principalmente às descargas atmosféricas 21%, contato com árvores e arbustos 16%, contato com animais 15%, falhas na rede 13%, ações humanas 6%, ventos 5% e causas desconhecidas 24%” (GOMES, 2019, p.28).

E de acordo com Bollen (2000), a sensibilidade ao AMT é particular de cada equipamento e diretamente ligada ao tipo de carga e sua configuração de controle, tendo como características comumente consideradas na avaliação de sua sensibilidade a magnitude e a duração do afundamento, e menos comumente, mudança angular e desequilíbrio de uma ou mais fases (Quadro 1) e ainda o ponto da onda onde inicia e termina o afundamento.

Quadro 1 – Tipos de queda de tensão por tipos de falhas e conexões do transformador.

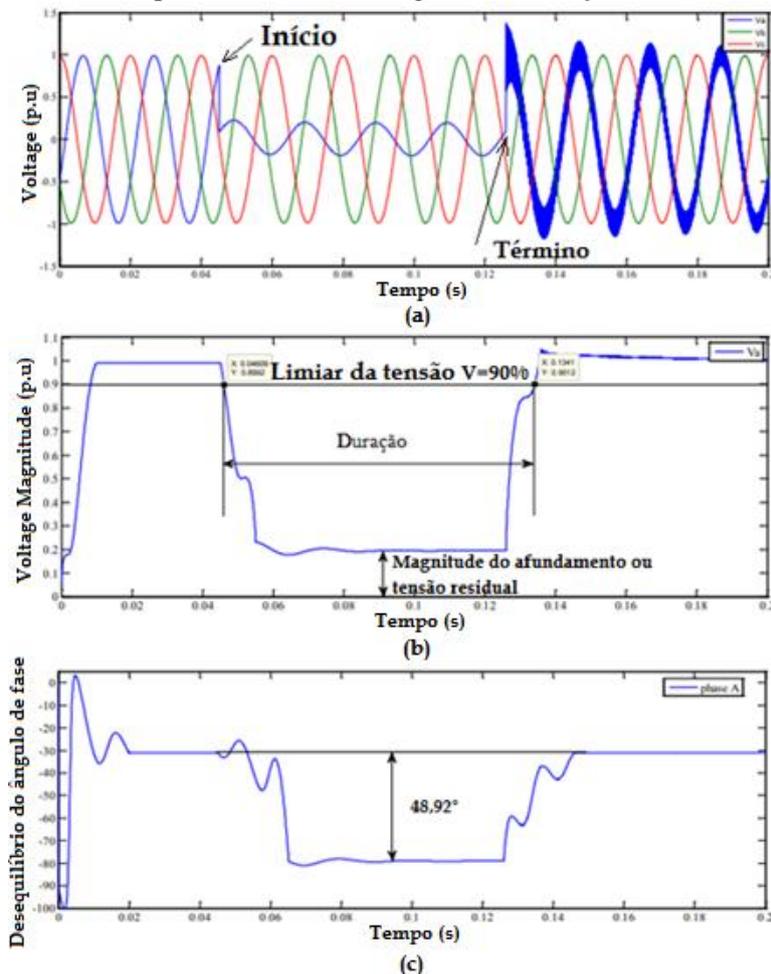
Phase Shift	Number of Phases		
	1	2	3
Angle	 <p>Sag Type D One-phase sag, phase shift</p>	 <p>Sag Type C Two-phase sag, phase shift</p>	<p>Note: Three-phase sags should lead to relatively balanced conditions; therefore, sag type A is a sufficient characterization for all three-phase sags.</p>
None	 <p>Sag Type B One-phase sag, no phase shift</p>	 <p>Sag Type E Two-phase sag, no phase shift</p>	 <p>Sag Type A Three-phase sag</p>

Fonte: Adaptada de Electric Power System (2000, p.53).

O ponto na onda (Figura 1(a)) é onde ocorre a queda na onda senoidal, representado pelo ângulo, com duração e magnitude do evento conforme mostrado na Figura 1 (b). O desequilíbrio de fase está relacionado ao tipo de falta que gerou a queda de tensão, classificadas em falta: fase - terra

(FT), fase - fase - terra (FFT) e trifásica (3F). A mudança de fase é uma mudança repentina no ângulo de tensão (Figura 1(c)).

Figura 1 – Falta fase-terra, ponto na onda (a), magnitude e duração (b) e mudança de ângulo (c).



Fonte: Adaptada de Journal of Power and Energy Engineering (2014, p. 5).

Os diversos distúrbios no sistema elétrico com todas as suas variáveis culminaram em pesquisas cada vez mais detalhadas e por fim no desenvolvimento da área de QEE, sendo que “O termo ‘qualidade de energia’ começou a ser empregado principalmente no início dos anos 80, quando se iniciou a abordagem nos vários tipos de distúrbios elétricos existentes no sistema elétrico” (MOTOKI, 2007, p.21).

Assim, “A Qualidade de Energia Elétrica (QEE) pode ser definida como uma condição do sinal elétrico de tensão e corrente capaz de atender a operação adequada de dispositivos, equipamentos, processos, instalações e redes elétricas, sem prejuízo de desempenho e vida útil” (LEÃO, 2014, p.36).

Consequentemente, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) ([2020]), por meio do Módulo 8 do PRODIST, define QEE e estabelece procedimentos e parâmetros de índices coletivos e individuais de continuidade de fornecimento de energia, subdivididos em qualidade do serviço e em qualidade do produto, de forma a garantir a qualidade da tensão, em termos de valor eficaz da onda, e qualidade do atendimento ao consumidor, estabelecendo assim um padrão dos parâmetros

elétricos às concessionárias de energia elétrica do país. O Quadro 2 apresenta a classificação e a denominação das VTCD.

Quadro 2 – Classificação das Variações de Tensão de Curta Duração – PRODIST.

Classificação	Denominação	Duração da Variação	Amplitude da tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão	Inferior ou igual a três segundos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Momentâneo de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Momentânea de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior a 1,1 p.u
Variação Temporária de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Temporário de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior a 1,1 p.u

Fonte: Módulo 8 do PRODIST (BRASIL, 2020, p.20).

Com uma abordagem bastante detalhada, Oliveira (2015) realizou em sua pesquisa, monitoração de ocorrências de AMT num período de 36 meses (abril/2011 a março/2014) através de um sistema instalado no campus Pampulha da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), situado na Subestação (SE) Maracanã, malha de distribuição centro da Companhia Elétrica de Minas Gerais (CEMIG), malha que atendia àquela época, quase dois milhões de consumidores, dos quais 44% eram consumidores industriais. Sua monitoração registrou 297 eventos, com maior incidência de eventos ocorridos em períodos de precipitação de chuva na referida região, e foram classificados em afundamentos monofásicos, bifásicos e trifásicos, representando respectivamente 53%, 26% e 21% dos ventos.

A partir do padrão *IEEE* 1346 (1998) e dos resultados registrados nos três anos de monitoramento, o autor mostra a distribuição dos distúrbios no período de monitoramento, posteriormente uma tabela de distribuição acumulada de distúrbios e uma tabela de distribuição acumulada médias de distúrbios por ano.

Por fim, através de interpolação linear, o autor plota a curva de contorno para o desempenho do sistema em estudo, correlacionando a essa curva, o número estimado de desligamentos anuais causados a equipamentos como o CLP, ASD, computador pessoal, e Relés eletromecânicos, resultando respectivamente em 5, 35, 15 e 25 desligamentos, demonstrando o alto nível de sensibilidade do ASD quando comparado aos outros equipamentos.

Dando continuidade à monitoração de afundamentos no mesmo local realizado por Oliveira (2015) e agregando os resultados dele aos seus, Carletto (2017) monitorou a ocorrência de AMT no

período de 16 meses (setembro/2015 a dezembro/2016), somando um total de 52 meses de monitoração.

A partir dos resultados coletados de ambos os períodos, realizou uma análise comparativa anual dos eventos, comparando o número de eventos com o índice de precipitação mensal, com o horário de ocorrência, com a duração, com a magnitude, com os tipos de falta (FT, FFT, 3F), com distribuição por fase e com o desbalanceamento de cada tipo de afundamento, apresentando posteriormente às análises de cada variável citada, propostas de mitigação do número de eventos no sistema estudado.

O estudo realizado por Santiago *et al.* (2019) analisou a sensibilidade de um transmissor de TV digital frente a AMT, no laboratório de TV Digital da Escola de Engenharia Mackenzie, utilizando uma fonte trifásica Ametek programável, modelo 2253iX de 4kVA, um computador com software da fonte dedicado para simular afundamentos e uma TV Sony modelo KDL-22EX425 para indicar que a imagem saia da transmissão, comprovando o desligamento desse equipamento.

Pelos resultados apresentados, a autora verifica que para todos os limites de tensão com AMT maior que 90%, o sinal de rádio frequência é interrompido e ocorre o desligamento total do transmissor em 50ms.

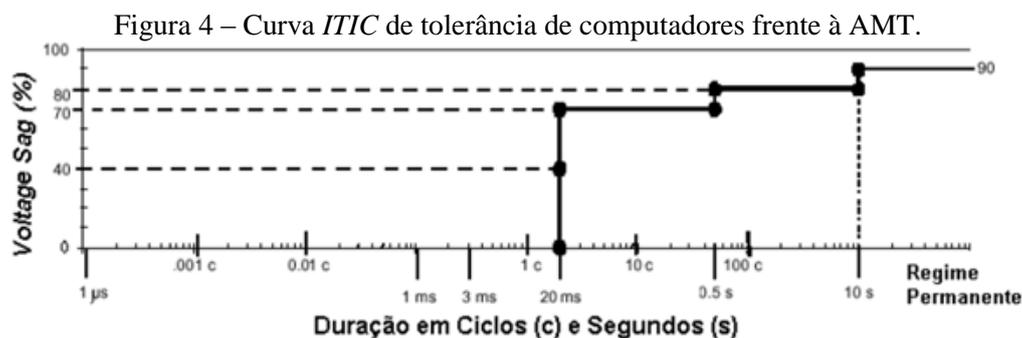
A autora conclui que os AMTs e as interrupções de curta duração foram prejudiciais à operação do transmissor digital, o que sugere que o equipamento deva ser suprido por um sistema de backup de energia auxiliar, para mantê-lo com confiabilidade operacional contínua, dentro dos limites de sensibilidade da condição mais severa, para $AMT > 90\%$ ou 0,1 pu e tempo de duração maior que 50ms.

O conceito de curva de tolerância de tensão para equipamentos eletrônicos sensíveis, que inicialmente se aplicava exclusivamente para computadores de instalações militares, foi introduzido, conforme Bollen (2000), em 1978 por Thomas Key.

Mais tarde, a curva de tolerância de tensão resultante de seus testes tornou-se conhecida como curva CBEMA e que ela se popularizou quando a associação “*Computer Business Equipment Manufacturer’s Association (CBEMA)*” começou a utilizá-la como uma recomendação a seus membros.

Posteriormente, ela foi utilizada na elaboração da norma *IEEE Standard 446-1995 (Orange Book)*, tornando-se uma referência para tolerância de equipamentos frente a variações de tensão, bem como para severidade de AMT.

Recentemente, a curva *CBEMA* revisada foi adotada pelo “*Information Technology Industry Council (ITIC)*”, sucessor da *CBEMA*, e é agora denominada como curva *ITIC* e foi escolhida neste trabalho para análise da sensibilidade dos equipamentos propostos. Um exemplo representativo da curva é reproduzido na Figura 4.



Fonte: Cunha e Silva (2003, p.62).

Na curva de exemplo (Figura 4), observa-se que os afundamentos de tensão para 80% da tensão nominal têm uma duração típica de 10s, ao passo que afundamentos para 70% não permanecem por mais do que 0,5s. Por conseguinte, as interrupções momentâneas de tensão (0% a 10% da tensão nominal) não duram mais do que 20ms, representando pouco mais de um ciclo em 60Hz.

Abordando acerca do contator CA (Figura 5), Mohamad (2016) enfatiza que ele é um dispositivo eletromecânico, de fácil instalação e muito eficiente, que no decorrer dos anos se tornou amplamente utilizados em processos industriais.

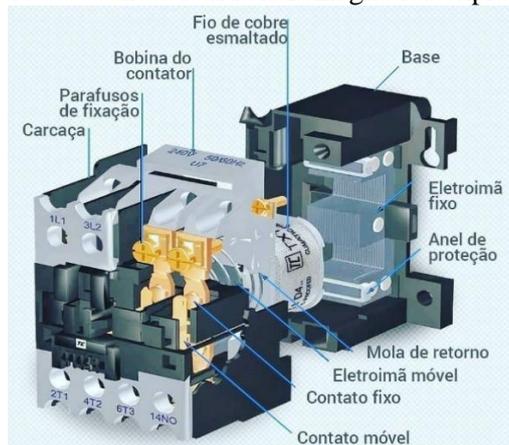
Suas principais funções são o acionamento, controle e manobra de diversos tipos de cargas elétricas. Apesar de sua grande utilização, quando submetidos à AMT pode ocasionar um descontrole ou desligamento das cargas de processos fabris, podendo resultar em grandes perdas financeiras, e por isso foi identificado como um dos principais dispositivos afetados por esse evento.

O seu padrão de funcionamento, se dá da seguinte maneira: quando a bobina eletromagnética é energizada, forma-se um campo magnético que se concentra na parte fixa do dispositivo e atrai o núcleo móvel, onde estão localizados os contatos móveis, que, por consequência, também são deslocados.

O comando da bobina é feito por meio de uma botoeira com duas posições, que tem seus elementos ligados à bobina. A velocidade de fechamento dos contatos é uma junção da força proveniente da bobina e da força mecânica das molas de separação que atuam em sentido contrário. As molas de compressão são também as responsáveis pela velocidade de abertura do circuito, quando a alimentação da bobina cessa.

Os contatos principais têm como função estabelecer e interromper correntes elétricas principalmente de motores e chavear cargas resistivas ou capacitivas. Nos contatos são utilizadas placas de prata. Enquanto isso, os contatos auxiliares são utilizados para comutar circuitos auxiliares de comando, sinalização e intertravamento elétrico. Esses contatos podem ser normalmente abertos (NA) ou normalmente fechados (NF).

Figura 5 – Contator CA eletromagnético explodido.



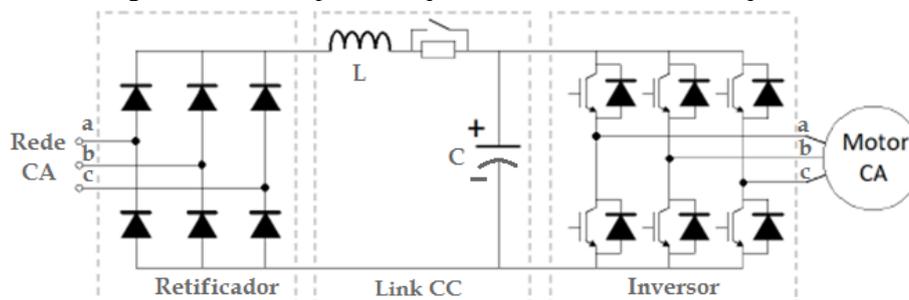
Fonte: Adaptado de <https://www.famcocorp.com/>

O próximo equipamento de análise é o inversor de frequência, comumente conhecido como *drive* de velocidade, e que também é denominado pela sigla do inglês *ASD*, e conforme a definição de Djokic (2003) é um equipamento eletrônico de potência de circuito sofisticado e não linear, construído com tal arquitetura que possibilita o controle da velocidade de motores de indução ou síncronos, convertendo frequência fixa e tensão de alimentação CA de magnitude fixa, para uma tensão de frequência e magnitude variáveis nos terminais do motor que será controlado.

O *ASD* tornou mais simples, seguro e robusto o controle de processos, promovendo economia de energia em inúmeras aplicações com cargas de torque variável e velocidades reduzidas do motor CA, assim como a redução de tensões mecânicas e térmicas por meio de "*soft start*", aceleração e desaceleração, comunicação e controle remotamente, manutenção simples e diagnóstico automatizado.

Basicamente, sua estrutura eletrônica é composta por um conversor de modulação por largura de pulso, mais comumente conhecido pela sigla do inglês "*Pulse Width Modulation (PWM)*", que compreende um retificador, um barramento de Corrente Contínua (CC) ou *link CC* e um inversor controlado conforme ilustrado na Figura 12.

Figura 12 – Exemplo de arquitetura do inversor de frequência.



Fonte: Adaptado do acervo pessoal de Motoki (2019).

Ainda de acordo com Djokic (2003), todos esses circuitos respondem a vários distúrbios de qualidade de energia, tanto individualmente quanto por sua configuração de montagem, levando a padrões elevados e complexos de sensibilidade. Considerando que o *ASD* é normalmente apenas uma parte de algum sistema no qual outros componentes elétricos estão conectados, um único

evento desse distúrbio que for grave o suficiente para causar desconexão de pelo menos um dos componentes críticos do sistema, fará com que todo o processo seja interrompido.

A resposta dos *ASD* diante de *AMT* pode afetar significativamente os processos industriais que os utilizam e conforme Orcajo e Cano (2005), que durante um *AMT* essa resposta dependerá do layout do hardware, do software interno de controle e o tempo de resposta do sistema de controle, sendo que o *AMT* provoca uma diminuição da tensão no barramento CC, o que durante afundamentos bastante curtos, pode ser compensado fornecendo a energia do capacitor ao barramento CC.

No entanto, para afundamentos com maior duração, a tensão do barramento CC sofrerá um decréscimo maior, sendo que, caso diminua o bastante para ficar abaixo da tensão de disparo do barramento CC, ocasionará um desarme imediatamente do *ASD*.

Assim, o desarme e conseqüente desconexão do *ASD* durante o *AMT* também podem ser, de acordo com Djokic (2003), resultantes de operações internas, por exemplo, quando algum dos sistemas de proteção da unidade comanda desconexão, ou ainda externa, quando algum outro componente, por exemplo, motor ou controlador, comanda o desarme do processo e subseqüente desconexão da unidade.

As redes brasileiras de distribuição são majoritariamente aéreas, ficando expostas a diversos eventos externos, como por exemplo e de maior ocorrência, descargas atmosféricas e contato em galhos de árvores, resultando em faltas transitórias no circuito. Assim, um importante dispositivo amplamente utilizado pelas concessionárias de energia elétrica nas redes de média tensão (MT) é o religador automático, que substitui os fusíveis em pontos chave do circuito, diminuindo custos de substituição, custos operacionais e de deslocamento, bem como diminuindo o tempo de provável desconexão do consumidor final.

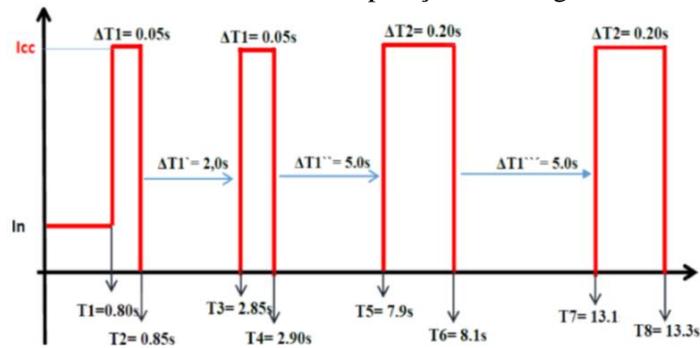
O religador é um dispositivo de proteção utilizado principalmente na distribuição de energia, capaz de interromper a corrente de falta e religar automaticamente, e é definido por Short como “Um dispositivo autocontrolado para automaticamente interromper e religar um circuito de corrente alternada, com uma seqüência predeterminada de abertura e religamento, seguido de reinicialização, manter fechamento, ou bloqueio” (SHORT, 2004, p. 400).

De acordo com Dugan (2014, p.87), sua operação de proteção à rede ocorre da seguinte maneira: desconecta o circuito em falta e faz até 3 tentativas de religamento, podendo ser configurado com vários esquemas de seccionalização, rápida e lenta, de forma a limpar as faltas mais recorrentes do circuito em questão, sendo que, caso a falta seja transitória, geralmente o circuito volta a ser energizado na primeira tentativa, o que normalmente ocorre segundo Short (2004, p. 443) em 83,25% dos casos, e caso a falta seja permanente, após a terceira tentativa, o religador desconecta o circuito permanentemente.

Por realizar manobras com o circuito em carga, Short (2004, p.401) apresenta os tipos de isolamento das câmaras de extinção do arco voltaico: a óleo, vácuo, dielétrico ou gás.

A Figura 2 mostra a curva característica do religador, sendo I_n a corrente nominal, I_{cc} a corrente de curto circuito, T1 a T8 os tempos programados para chaveamento do religador em caso de falta na rede e $\Delta T1$ e $\Delta T2$ os tempos para curvas rápida e lenta respectivamente, conforme Cardamoni (2016).

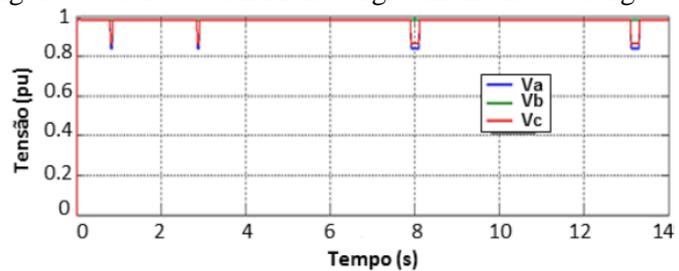
Figura 2 – Curva característica de operação do Religador Automático.



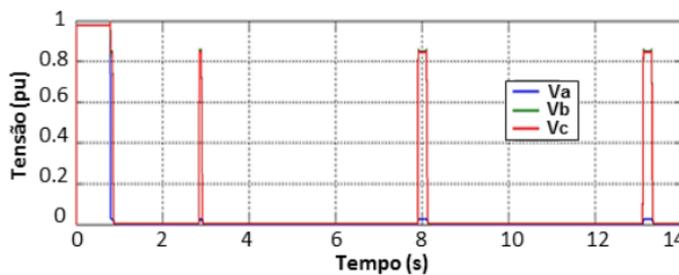
Fonte: Santiago *et al.* (2019, sem paginação).

No entanto, os testes demonstraram que estes chaveamentos geram AMT aos consumidores que estão à montante do religador (Figura 3(a)) e os que estão à jusante experimentam interrupções de curta duração (Figura 3(b)), confirmando Cardamoni (2016), Carvalho (2010) e Gers e Holmes (2005).

Figura 3 – Curva de AMT na carga a montante do religador.



(a)



(b)

Fonte: Adaptada de Cardamoni (2016).

3 METODOLOGIA

Este trabalho utilizou-se da metodologia de pesquisa exploratória através de consulta bibliográfica para determinar o grau de complexidade e estudos existentes sobre contadores CA e inversores de frequência.

Conceituação de AMT, curvas de sensibilidade e das partes que compõem a bancada de testes para emular o AMT; Realização de testes AMT no ASD e nos contadores CA eletromagnéticos, para levantamento das suas respectivas curvas de sensibilidade; Análise dos resultados e conclusão, com recomendações futuras.

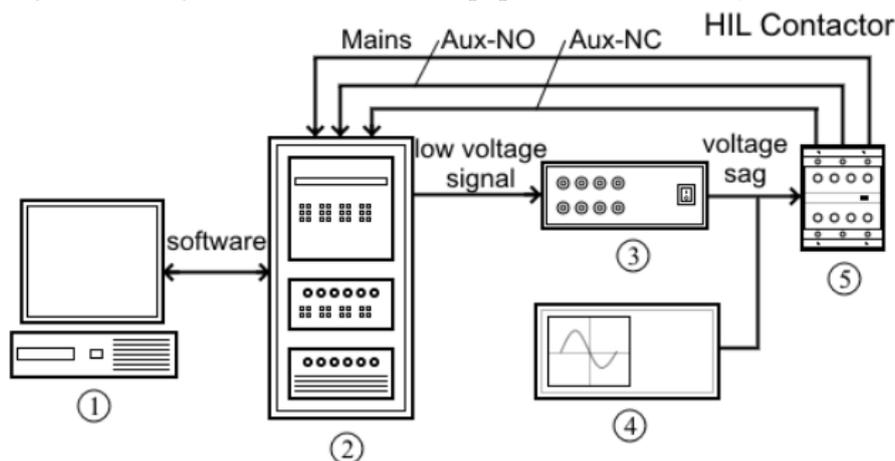
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Através de modelos de circuitos, foram realizadas simulações de AMT em bancada e os testes individuais do contator CA e do ASD, possibilitando assim a coleta dos dados necessários para obtenção das suas respectivas curvas de sensibilidade para posterior análise dos efeitos sofridos por esses equipamentos.

Conforme mencionado, essas cargas foram escolhidas dadas sua relevância nos circuitos industriais, bem como dos impactos resultantes do seu mau funcionamento ou de seu desligamento inesperado, e tiveram suas curvas caracterizadas pela magnitude e duração dos afundamentos e a do contator CA em específico, foi também considerado o ponto na onda (ângulo) de início do afundamento.

Os contadores CA foram submetidos aos testes de afundamento de tensão com os equipamentos utilizados conectados com arranjo tal como na Figura 6, descritos a seguir: Computador desktop (1), Rack RTDS (RSCAD) (2); Amplificador Omicron CMS 156: tensão trifásica e corrente do amplificador (3 x 250 V, 1 x 500 V; 3 x 25 A, 1 x 75 A) (3); Analisador de qualidade de energia, 256 amostras por ciclo para monitoramento de tensão e corrente (4); Contator CA, trifásico, 220V (tensão nominal) e 60 Hz (frequência nominal) (5).

Figura 6 – Diagrama de conexão dos equipamentos de simulação de AMT.



Fonte: Passos *et al.* (2020, p.4).

A Figura 7 mostra o laboratório de qualidade da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), e os equipamentos utilizados no teste: módulo RTDS, fonte de tensão do amplificador, medidor de qualidade de energia e os contadores CA usados para os testes. O computador é conectado via rede para RTDS.

Figura 7 – Bancada de simulação de afundamento e testes dos contatores CA.



Fonte: Passos *et al.* (2020, p.5).

Os contatores CA testados são especificados na Tabela 1, e são principalmente equipamentos novos e foram mantidos na posição vertical, uma vez que se espera que funcionem instalados em painéis. Nenhuma carga foi aplicada aos contatos principais, pois eles foram monitorados usando entradas binárias.

Tabela 1 – Modelos dos contatores CA testados.

Modelo	Potência Nominal (cv)	Contatos	Acoplamento aux.
A	5,0	3 Princ, 2 NA, 2 NF	Frontal removível
B	11,5	3 Princ, 2 NA, 2 NF	Lateral embutido
C	3,0	3 Princ, 1 NA, 1 NF	Embutido

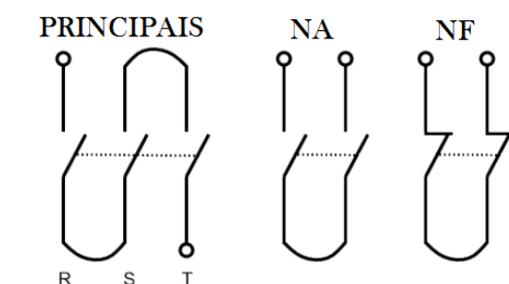
Fonte: Adaptado de Motoki (2017, não paginado).

De acordo com a norma *IEEE* 1668 (2014), existem três respostas possíveis para o teste: operação de recuperação completa, auto recuperação ou recuperação assistida, no entanto, como o contator não tem uma resposta de falha de recuperação assistida, seu comportamento será resumido a uma reação de aprovação ou reprovação.

Foi adotado que qualquer mudança lógica em qualquer um dos contatos durante o teste de afundamento de tensão caracterizaria uma resposta de falha. E para minimizar o poder computacional, os principais contatos foram conectados em série, conforme ilustrado na Figura 8.

Os contatos auxiliares foram conectados em série ou não, de acordo com o contator sendo testado, uma vez que alguns modelos têm um par de contatos NA e NF, e outros têm apenas dois.

Figura 8 – Conexão em série para monitoramento de mudança lógica de contatos via RTDS.



Fonte: Adaptado de Passos *et al.* (2020, p.6).

Os parâmetros utilizados no teste são os seguintes: magnitude máxima: 85% do nominal; magnitude mínima: 0% do nominal; duração máxima: 120 ciclos (2 s); duração mínima: 1 ciclo (0,02 s); intervalo de magnitude: 5% do nominal (18 passos); cronograma de duração: 1 ciclo (0,02 s), 2 ciclos (0,03 s), 3 ciclos (0,05 s), 4 ciclos (0,67 s), 6 ciclos (0,1 s), 12 ciclos (0,2 s), 30 ciclos (0,5 s), 60 ciclos (1 s) e 120 ciclos (2 s) (nove loops). Os ciclos 2 e 4 tem durações adicionais incluídas para o plano de teste, a fim de obter melhor resolução para curva de teste do contator.

Os resultados foram obtidos após a execução de um script dentro do ambiente de simulação RSCAD, e posteriormente convertidos em representação gráfica. Os 3 modelos de contator foram testados em 4 pontos de início do afundamento na onda, sendo 0°, 45°, 90° e 135°, resultando em 12 testes, exibidos nas Figuras 9 a 11.

Os gráficos mostram uma área sem desligamentos (branca) representada por zeros (0), tendo ainda a área de desligamento (vermelho) com 4 a 5 desligamentos e uma área vermelha clara (testes ignorados), onde o equipamento também pode falhar.

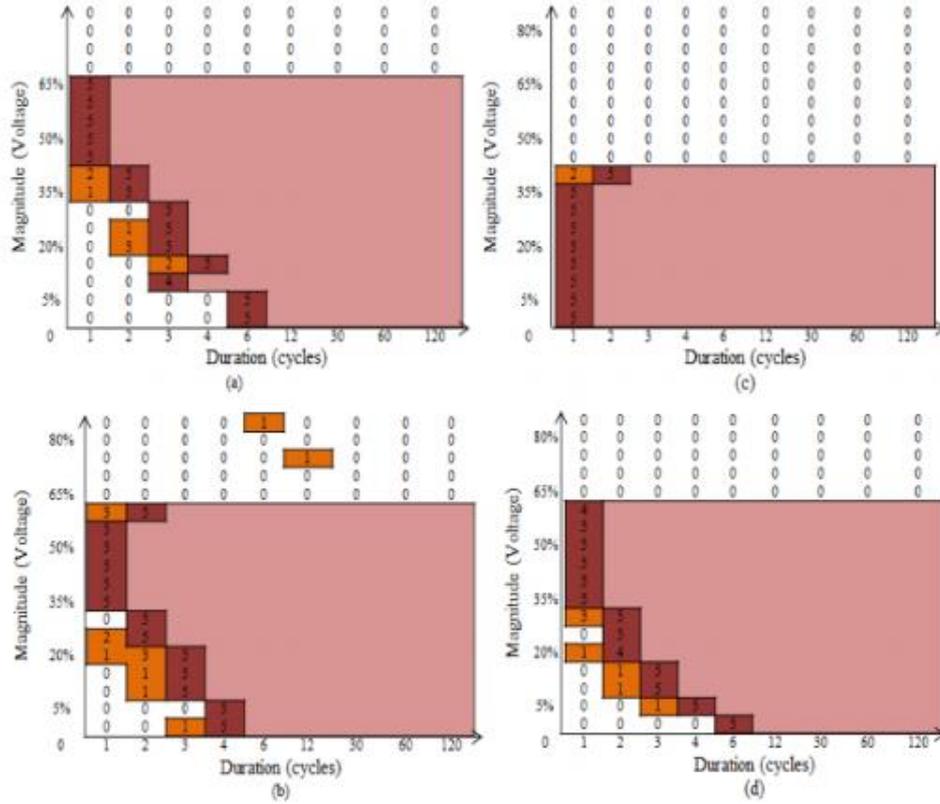
A área de incerteza (laranja) é representada por 1 a 3 falhas e é encontrado principalmente perto da área de desligamento. A influência do ponto-na-onda ou "*Point On Wave (POW)*" do início do afundamento da tensão é validada. Para contadores CA, conforme declarado em Hardi (2013), o *POW* 90° é o mais restritivo para afundamentos mais curtos, enquanto o *POW* 0° é para afundamentos mais longos.

Os resultados não mostraram uma simetria de quarto de ciclo, mas sim uma simetria de meio ciclo, como o *POW* 45° e 135° foram ligeiramente diferentes, embora semelhantes em forma. A região de incerteza mostra que as curvas de sensibilidade não são feitas de pontos absolutos de aprovação ou reprovação, onde há esses pontos pode ou não fazer com que o equipamento desarme.

Para curva do *POW* 90°, a região de incerteza é muito pequena ou inexistente, mas para curvas de outras *POW*, deve ser considerados. Como visto na Figura 11 (a), algumas áreas de incerteza podem ser vistas mesmo acima de toda linha de magnitude sem falhas. O afundamento de 65% de magnitude mostrou pelo menos uma falha em quase todos os testes, exceto para 3 ciclos de duração.

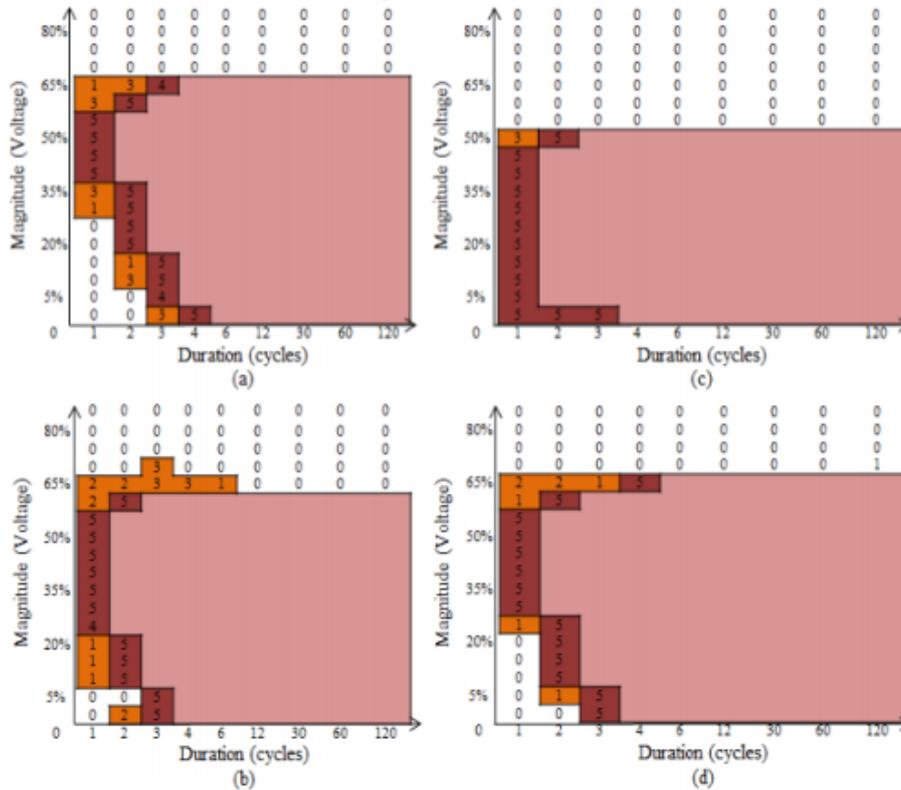
O teste para esta curva foi repetido a fim de verificar sua ocorrência, com similares resultados obtidos. Alguns outros pontos de incerteza longe da zona de falha, espalhados sobre o gráfico, podem ser vistos nas Figuras 9, 10 e 11.

Figura 9 – Curvas de sensibilidade para o modelo A: (a) 0°, (b) 45°, (c) 90° e (d) 135°.



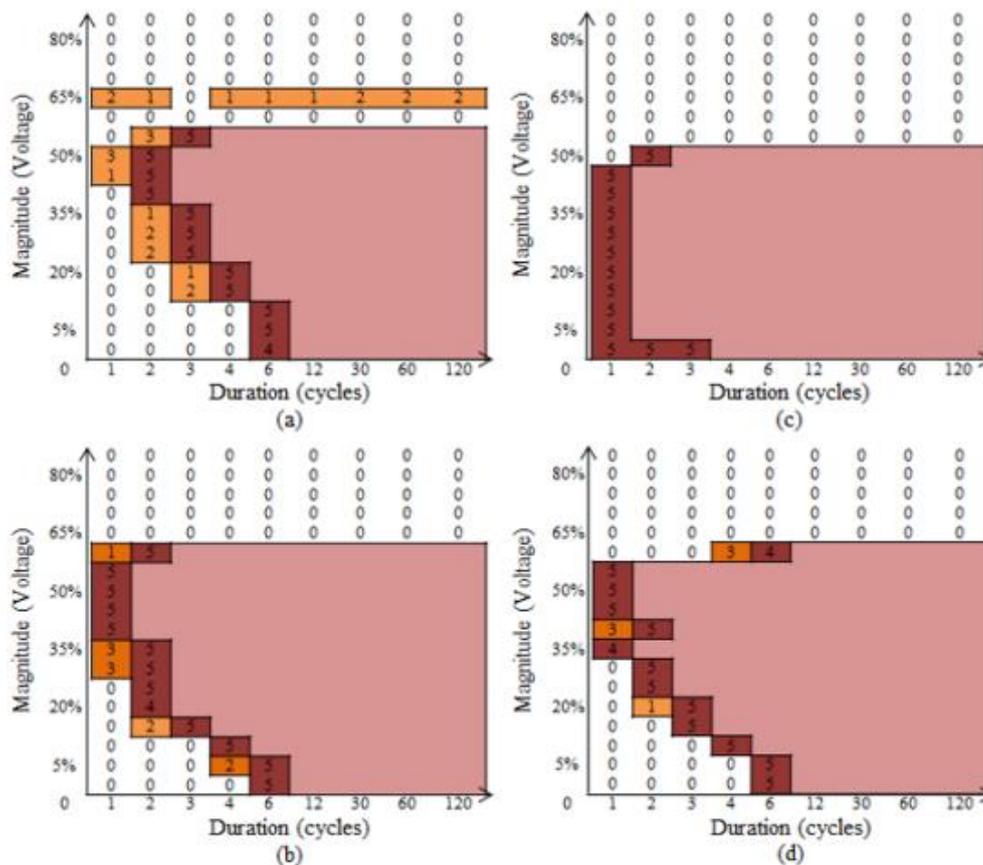
Fonte: Motoki (2017, não paginado).

Figura 10 – Curvas de sensibilidade para o modelo B: (a) 0°, (b) 45°, (c) 90° e (d) 135°.



Fonte: Motoki (2017, não paginado).

Figura 11 – Curvas de sensibilidade para o modelo C: (a) 0°, (b) 45°, (c) 90° e (d) 135°.



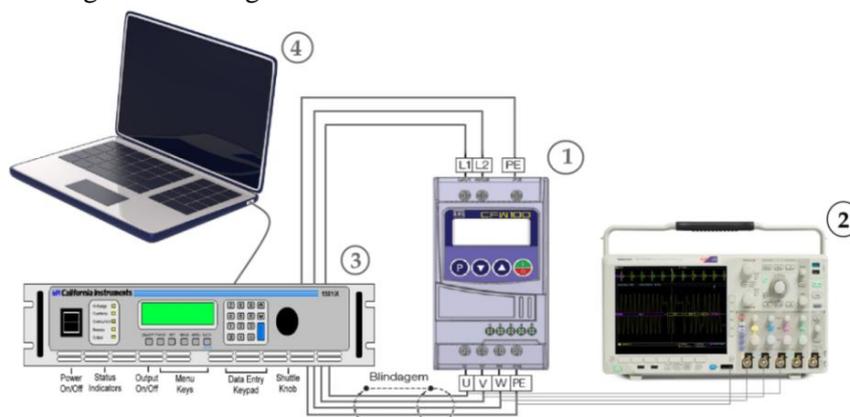
Fonte: Motoki (2017, não paginado).

Conclui-se, portanto, a partir das curvas de sensibilidades obtidas (Figuras 9 a 11), que o AMT implica ao contator CA eletromagnético um alto número de falhas, sendo influenciado pela magnitude e duração do evento e com maior intensidade de resposta à variação do ponto da onda de início do afundamento.

Assim, deve-se considerar em projetos de circuitos elétricos industriais, a utilização de contatores CA com menor sensibilidade a esse distúrbio, bem como de equipamentos específicos que atenuem a sua ocorrência.

Como proposta final de testes, foi realizado em bancada com o ASD sem carga e montado um circuito composto conforme ilustrado na Figura 13, pelos seguintes equipamentos: um inversor de frequência Weg (1), um osciloscópio modelo DPO 4034B do fabricante Tektronix (2), utilizado para monitorar as ondas senoidais em valores eficazes (V_{rms}) dada a ocorrência do afundamento; uma fonte trifásica programável (3), modelo 2253iX de 4kVA do fabricante Ametek, utilizada para a reprodução dos eventos; um computador (4) para manusear o aplicativo da fonte trifásica, seu software Compact iX GUI V2.5 foi utilizado para controlar a fonte e programar as sequências dos testes de afundamentos conforme o Quadro 3.

Figura 13 – Diagrama de conexão da bancada de testes do ASD.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Quadro 3 – Sequência utilizada no teste de AMT.

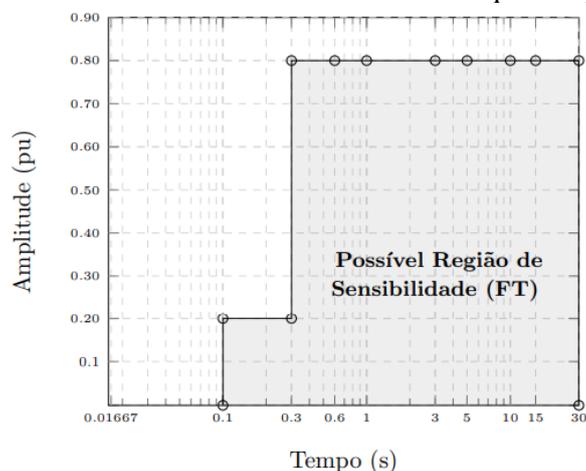
No.	Tipo	Tempo (s)	Tensão (Vrms)	Forma de Onda
1	V Srg/Sag	1,000	127	Senoidal
2	V Srg/Sag	0,600	63,5	Senoidal
3	V Srg/Sag	1,000	127	Senoidal

Fonte: Adaptada de Motoki (2018, sem paginação).

A sensibilidade dos ASD ao afundamento é geralmente expressa como uma curva de tolerância de tensão, em termos de apenas um par de valores de magnitude e duração de queda. Esses dois valores são denotados como os valores de limite, e se a queda de tensão for maior que o limite de duração específico e mais profundo do que o específico limite de magnitude de tensão, o ASD funcionará mal ou desarmará. Para ASD, os valores limites relatados variam de 50-60% a 80-90% da tensão nominal para magnitude, e de um ciclo (ou até menos) até 5 ou 6 ciclos para a duração.

O afundamento em uma única fase (FT) conforme visto na Figura 14, mostra a curva de sensibilidade obtida a partir das faltas FT. Observa-se nesta figura que a partir de 100ms com 80% e 90% de AMT e a partir de 300ms com 20% a 70% de AMT respectivamente, o ASD desligará ou apresentará mal funcionamento.

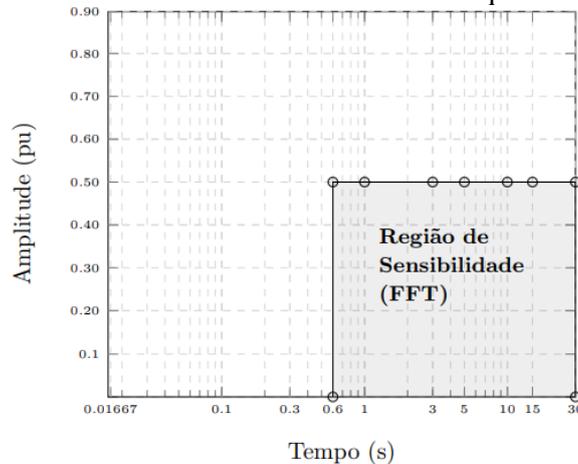
Figura 14 – Curva de sensibilidade do inversor de frequência para falta FT.



Fonte: Acervo pessoal Motoki (2019).

Já o afundamento em duas fases (FFT), conforme demonstrado na Figura 15, observa-se a curva de sensibilidade obtida a partir das faltas FFT. Observa-se nesta figura que a partir de 50% de AMT com tempos de afundamento iguais a 300ms, haverá desligamento ou falha do ASD.

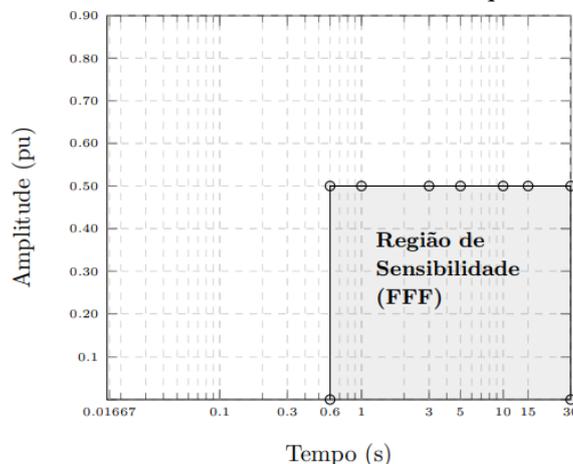
Figura 15 – Curva de sensibilidade do inversor de frequência para falta FFT.



Fonte: Acervo pessoal Motoki (2019).

E por fim, o afundamento em três fases (3F) conforme visto na Figura 16, mostra a curva de sensibilidade obtida a partir das faltas 3F. Observa-se nesta figura que a partir de 50% de AMT com duração de 300ms o ASD desligará ou apresentará mal funcionamento, sendo o mesmo comportamento observado em faltas FFT.

Figura 16 – Curva de sensibilidade do inversor de frequência para falta 3F.



Fonte: Acervo pessoal Motoki (2019).

Diante das curvas de sensibilidade observadas nas Figuras 14 a 16, conclui-se que ASD analisado demonstrou uma boa tolerância para AMT de duração inferior a 6 ciclos de 60 Hz em qualquer um dos tipos de falta (FT, FFT, 3F) e para AMT a partir de 50% em falta FFT e 3F de duração inferior a 600ms. A menor tolerância observada foi em faltas FT, onde AMT a partir de 20% e 80% com duração de 300ms e 100ms respectivamente, resultarão em má operação ou desligamento do ASD. Vale ressaltar que os testes foram realizados sem carga, e esse comportamento poderá sofrer variações consideráveis a depender da carga e sua própria configuração eletrônica.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os testes de bancada realizados no contator CA e no inversor de frequência, cujos dispositivos são amplamente utilizados nas indústrias, mostraram os níveis de comportamentos de sensibilidade de cada um deles.

Fica notório que estas sensibilidades acarretam paradas parciais ou totais de processos industriais, gerando prejuízos às unidades consumidoras (UCs) conectadas nas redes elétricas de distribuição das concessionárias, amplamente percorridos na revisão da literatura, bem como permite concluir da sua importância perante a comunidade científica e consumidores industriais a continuidade dos estudos destes tipos de dispositivos.

Há disponível no mercado um grande número de equipamentos capazes de mitigar ou solucionar em determinados casos os efeitos dos AMTs em diversas cargas sensíveis. O que ainda dificulta a utilização desses equipamentos em maior escala é seu alto custo.

No entanto, para os equipamentos apresentados neste trabalho, poderia como sugestão de mitigação, utilizar como apresentado por Gomes (2019, p.31), o Compensador série de tensão (CST) também conhecido no meio científico como Series Voltage Compensators (SVC) ou Dynamic Voltage Restorers (DVR), que se tornou uma solução eficaz para mitigação dos AMTs.

Conforme Gomes (2019, p.38), existem várias topologias de DVR: com ou sem capacitores no barramento CC, para alta ou baixa potência, com ou sem transformador série; possibilitando assim seu uso em inúmeros tipos de equipamentos sensíveis a AMT.

Para cargas de menor potência, porém de importância ao circuito, como por exemplo o CLP e computadores, pode-se ainda utilizar um *UPS (Uninterruptible Power System) on-line*, considerando sua baixa complexidade e preço razoável, suprindo surtos e afundamentos de menor magnitude.

Para melhores resultados com ASDs, há a possibilidade de escolha de determinados modelos com maior robustez e tolerância ao AMT, conforme verificado por Motoki (2012, p.76), o qual em seu trabalho realizou testes com a linha Siemens Simovert em uma indústria têxtil e obteve resultados muito satisfatórios em comparação ao ASD anteriormente utilizado pela planta industrial em questão.

Poder-se-ia, na disponibilidade de recursos, realizar um teste comparativo de outros equipamentos sensíveis, similares a esses testados, para análise de diferentes fabricantes e da particularidade da configuração eletrônica entre eles.

Futuras pesquisas poderão analisar quais variáveis não foram ou ainda não são observadas e que possam influenciar na sensibilidade dos equipamentos mencionados neste trabalho, resultando em uma proposta mais objetiva de mitigação tanto do AMT quanto à sensibilidade dos equipamentos.

REFERÊNCIAS

- BOLLEN, M.H.J. **Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags And Interruptions**. New York: IEEE Press on Power Engineering, 2000.
- BOLLEN, M.H.J. **Voltage sags in three-phase systems**. New York: IEEE Power Engineering Review, v. 21, n. 9, p. 8–15, 2001.
- BOLLEN, M.H.J.; GU, I.Y.H. **Signal processing of power quality disturbances**. New York: IEEE Press Series on Power Engineering, 2006.
- BOLLEN, M.H.J.; SABIN, D.D. **International Coordination for Voltage Sag Indices**. *In*: IEEE Power Engineering Society General Meeting, New York, 2005. IEEE, p. 437–442, 2006.
- BURKE, J.; LAWRE, D. **Characteristics of fault currents on distribution systems**. New York: IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. PAS-103, n. 1, p. 1–6, 1984.
- BRUMSICKLE, W.E.; R. S. Schneider; G. A. Luckji; D. M. Divan; M. F. McGranaghan. **Dynamic sag correctors: Cost-effective industrial power line conditioning**. New York: IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 37, no. 1, january/february 2001.
- CARLETTO, PATRÍCIA de S. **Monitoramento de afundamentos momentâneos de tensão e classificação por tipo, duração e magnitude**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.
- CARVALHO FILHO, J. M. **Uma Contribuição à Avaliação do Atendimento a Consumidores com Cargas Sensíveis - Proposta de Novos Indicadores**. 2000. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2000.
- CARDAMONI, D.V.; MOTOKI, E. M.; PEDRO, H. O.; PAULO, F. R.; PAULO, M. S. **Use of computational systems for analysis and comparison of voltage sags and harmonics in a HVDC system**. 2016. Trabalho apresentado ao 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Belo Horizonte, 2016.
- DJOKIĆ, S. Ž.; MILANOVIĆ, J. V.; KIRSCHEN, D. S. **Sensitivity of ac coil contactors to voltage sags, short interruptions and undervoltage transients**. New York: IEEE Transmission Power Delivery, 2004, v.19, p. 1299–1307.
- DUGAN, R.C. et al. **Electrical power systems quality**. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 2002.
- ESCRIBANO, A. H.; GARCIA, A. M.; LAZERO, E. G.; FUENTES, J. A. **Influence of voltage dips on industrial equipment: Analysis and assessment**. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Albacete, v. 41, n. 1, p. 87–95, 2012.
- GERS, J. M.; HOLMES, E. J. **Protection of Electricity Distribution Networks**. New York: IEEE Power And Energy Series, vol. 47, 2nd edition, 2005.
- GOMES, MARCOS PAULO BRITO. **Compensador série de tensão em onda quadrada com retificador controlado por seleção de taps do transformador shunt**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

HARDI, S.; IDRIS, M. H.; M. ISA; R. ISMAIL. **Equipment performance due to voltage sags – test results for contactor and induction motor**. GSTF Journal of Engineering Technology, 2, 12, Malaysia, 2013.

IEEE. **Prática recomendada para afundamentos de tensão e interrupção momentânea por meio de testes para equipamentos elétricos de uso final com classificação inferior a 1000 v**. New York: IEEE Std 1668-2017 (Revisão de IEEE Std 1668-2014), pág. 1-85, nov. 2017.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS IEEE. Std 1100-2005 (IEEE Emerald Book): **IEEE Recommended Practice For Powering and Grounding Electronic Equipment**. New York, 2005.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS IEEE. Std 1564-2014: **IEEE Guide for Voltage Sag Indices**. New York, 2014.

J. G. CARVALHO. **Influência da Proteção na Qualidade de Energia Elétrica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, 2010.

JOURNAL OF POWER AND ENERGY ENGINEERING, 2014, 2, **Voltage Sag Characterization in a Distribution Systems: A Case Study**, 546-553 Published Online April 2014 in SciRes. [http://www.scirp.org/journal/jpee.](http://www.scirp.org/journal/jpee;); <http://dx.doi.org/10.4236/jpee.2014.24074>

MCGRANAGHAN, M. F.; MUELLER, D. R.; SAMOTYJ, M. J. **Voltage sags in industrial systems**. New York: IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 29, no. 2, pp 397-403, march/april 1993.

MCGRANAGHAN, M. F.; ROETTGER, B. **Economic Evaluation of Power Quality**. New York: IEEE Power Engineering Review, February 2002.

MOTOKI, E. M. **Procedimentos para mitigação do impacto de qualidade de energia na indústria têxtil**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

MOTOKI, E. M.; FILHO, JOSE M. DE C.; GUERRERO, CARLOS V.; SILVEIRA, PAULO M.; GUIRELLI, C. R.; SANTOS, R. V.; PAZZINI, L. H. A.; SANTIAGO, N. S. E AKAMINE, CRISTIANO. **Estudo de Sensibilidade de um Transmissor de TV Digital e seus Impactos de Operação Frente a Variações de Tensão de Curta Duração**. 2018. Universidade Presbiteriana Mackenzie, Grupo de Estudos da Qualidade da Energia Eletrica – GQEE, São Paulo, 2018.

MOTOKI, E. M.; SILVEIRA, P. M. da.; CARVALHO FILHO, J. M. de. **Custos de Paradas de Processos Industriais devido a Variação de Tensão de Curta Duração através da Pesquisa de Campo**. – CBQEE2019-0207 — UNIFEI, Itajubá, MG. PAULO VITOR GRILLO DE SOUZA – UFLA, Lavras, MG. JULES RENATO VIANA CARNEIRO, NATANAEL BARBOSA PEREIRA – EDP ENERGIAS DE PORTUGAL, Espírito Santo e São Paulo, 2019.

NUNES JÚNIOR, MARCO ANTÔNIO SILVA. **Análise de sensibilidade das variáveis de influência em afundamentos de tensão utilizando projeto e análise de experimentos**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2012.

OLIVEIRA, FILIPE D. **Monitoramento e análise de afundamentos momentâneos de tensão**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

PASSOS, FREDERICO O.; JUNG, F. L. L.; JOSÉ M. DE C. FILHO.; MOTOKI, E. M. **New Left-Right Characterization Method used for Contactor Sensitivity Curves**. UNIFEI – Itajubá, MG. NATANAEL PEREIRA – EDP ENERGIAS DE PORTUGAL. Trabalho apresentado ao Congresso Brasileiro de Qualidade de Energia – CBQEE2019-0045/CBQEE2019-0145. São Paulo, 2019.

PASSOS, FREDERICO O.; JUNG, F. L. L.; FILHO, JOSÉ M. de C.; MOTOKI, E. M.; PEREIRA, NATANAEL. **Sensibilidade de Fontes em Corrente Contínua alimentando contadores frente a Afundamentos de Tensão**. Trabalho apresentado no Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica (SENDI), 2020, Vitória.

PASSOS, FREDERICO O.; MOTOKI, E. M.; FERNANDO L. L. JUNG; JOSÉ M. DE C. FILHO, NATANAEL PEREIRA. **New Left-Right Characterization Method used for Contactor Sensitivity Curves**. 2017. Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI. Grupo de Estudos da Qualidade da Energia Elétrica – GQEE, Itajubá, 2017.

SAES, ALEXANDRE. **Conflitos do capital**. Bauru: Edusc, 2010.

SANTIAGO, N. S.; MOTOKI, E. M.; CARVALHO FILHO, J. M. de.; GUERRERO, C. V.; SILVEIRA, P. M. DA.; GUIRELLI, C. R.; SANTOS, R. V. DOS.; PAZZINI, L. H. A.; AKAMINE, CRISTIANO. **Estudo de Sensibilidade de um Transmissor de TV Digital e seus Impactos de Operação Frente a Variações de Tensão de Curta Duração**, Trabalho apresentado ao Congresso Brasileiro de Qualidade de Energia – CBQEE2019-0045. São Paulo, 2019.

SHAREEFH, H. et al. **Experimental investigation of ac contactor ride through capability during voltage sag**. 2010. In: 9th International Conference on Environment and Electrical Engineering. New York, p. 325–328, 2010.

SHORT, T.A. **Electric power distribution**. London: Handbook CRC Press LLC, 2004.

WATANABE, G.T. **Uma contribuição à análise de perdas ocasionadas por afundamentos momentâneos de tensão**. 2010. Dissertação (Mestrado em Ciência em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece à coordenação da Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie, na pessoa do prof. Dr. Rodrigo Vieira dos Santos, por autorizar os resultados das simulações de pesquisas correlatas a essa, realizadas antes da pandemia do COVID-19, na disciplina de Qualidade de Energia, tendo em conta a impossibilidade de acesso ao laboratório de eletrônica para repetição das mesmas.

Igualmente, agradece ao prof. Ms. Edison Massao Motoki, por disponibilizar para enriquecimento desse trabalho os resultados de simulações de pesquisa pessoal de sua graduação de doutorado, realizados no laboratório de Qualidade de Energia da Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI (MG).