

Análise de Falhas de Motores de Indução Trifásicos Durante Acionamentos por Soft-Starters em Barramentos com Bancos de Capacitores

Gustavo Rodrigues dos Santos
GSI - Engenharia e Consultoria LTDA
Taubaté, Brasil
gustavo.santos@gsiconsultoria.com.br

Nelson Clodoaldo de Jesus
GSI - Engenharia e Consultoria LTDA
Taubaté, Brasil
nelson@gsiconsultoria.com.br

Jethero Mendes Machado
GSI - Engenharia e Consultoria LTDA
Taubaté, Brasil
jethero@gsiconsultoria.com.br

João Roberto Cogo
GSI - Engenharia e Consultoria LTDA
Taubaté, Brasil
gsi@gsiconsultoria.com.br

Ahmad Muhammad Laurentino
GSI - Engenharia e Consultoria LTDA
Taubaté, Brasil
ahmad.laurentino@gsiconsultoria.com.br

Thiago Pereira Franco
GSI - Engenharia e Consultoria LTDA
Taubaté, Brasil
thiago.franco@gsiconsultoria.com.br

Resumo— Na análise de perturbações em sistemas elétricos, desligamentos, falhas e interrupções de processos ocorrem com mais frequência durante manobras de equipamentos, seja em energizações ou desligamentos, uma vez que os fenômenos transitórios costumam ser mais agressivos à estabilidade de um sistema do que em regime normal de operação. Este trabalho tem como objetivo investigar falhas ocorridas durante a partida de motores de indução trifásicos de 6,6 kV acionados por soft-starters em uma unidade industrial de captação de água com tensões de operação de 138/6,6 kV. Será investigada a relação entre essas falhas e a presença de bancos de capacitores para correção do fator de potência conectados ao mesmo barramento dos motores. Foram observados fenômenos de ressonância elétrica que resultaram em sobrecargas, curtos-circuitos e falhas de componentes. A análise incluiu registros de oscilografias dos relés de proteção, relatórios de análise dos fabricantes dos motores e dos soft-starters e simulações no software ATPDraw para identificar a causa raiz dos problemas.

Palavras-chave— Motores de indução trifásicos. Soft-Starter. Ressonância. Bancos de capacitores, Oscilografias, ATPDraw.

I. INTRODUÇÃO

Por suas características, preço e robustez, os Motores de Indução Trifásicos (MIT) são os motores mais largamente empregados na indústria [1]. Em aplicações gerais, em que não haja necessidade de variar a velocidade, é quase exclusivo o emprego desse tipo de motor.

Os motores assíncronos (ou de indução) são dispositivos de corrente alternada que, ao serem conectados à rede, não atingem imediatamente o regime nominal de operação, passando antes por um período transitório de partida, no qual seus parâmetros elétricos e mecânicos variam com a aceleração do rotor [2]. A depender da potência do motor e das características da sua carga, durante a partida podem ser exigidas altas correntes iniciais para vencer a inércia do eixo, geralmente ocasionando quedas de tensão na rede e estresses mecânicos [3].

Na prática, muitas vezes deseja-se limitar a corrente da linha de alimentação, a fim de evitar distúrbios na rede e o aumento da demanda de energia elétrica. Assim, tem-se como foco evitar transitórios que podem levar a quedas de tensão em outros pontos da rede ou mesmo sua interrupção [1]. Dessa forma, torna-se necessário utilizar de métodos alternativos à

partida direta, como a utilização de soft-starters ou inversores de frequência. Entretanto, a utilização de métodos eletrônicos de acionamento pode afetar diretamente a qualidade da energia em sistemas elétricos, através da injeção de correntes harmônicas no sistema, como verificado neste trabalho. Especialmente em sistemas onde há a presença de bancos de capacitores para correção de fator de potência, os efeitos das injeções de harmônicas por equipamentos eletrônicos podem ser amplificados através de ressonâncias indesejadas, gerando correntes harmônicas ainda maiores que causam sobreaquecimento, reduzem a vida útil de equipamentos sensíveis e desenvolvem esforços torcionais na parte estrutural de motores.

Neste trabalho, foram analisados relatórios de fabricantes (motor e soft-starter), oscilografias de falhas e partidas de motores, e, com base em hipóteses sobre os eventos observados, simularam-se casos no ATPDraw para verificar a resposta do sistema elétrico às condições de ressonância entre banco de capacitores e soft-starters.

II. SOFT-STARTERS UTILIZADAS NA PARTIDA DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

Um soft-starter é um dispositivo eletrônico utilizado para controlar a partida de motores elétricos, proporcionando uma inicialização suave e reduzindo impactos mecânicos e elétricos. Esse dispositivo funciona limitando a corrente de partida e ajustando a tensão aplicada ao motor durante o processo de aceleração e é composto tipicamente por pares de tiristores (SCR) ou combinações de tiristores com diodos, posicionados em cada terminal de potência do motor.

Essa aplicação é caracterizada por manter a frequência de acionamento constante e variar-se a tensão de alimentação do motor eletronicamente. Assim, mantendo-se a frequência constante, a velocidade do campo girante é constante.

O fluxo interno da máquina passa a ser dependente somente da tensão, pois é proporcional à relação V/f . Ao se abaixar a tensão, o fluxo é reduzido, o torque máximo diminui ao quadrado e o torque do motor também fica menor: se não conseguir arrastar a carga, o rotor fica para trás e a velocidade é reduzida. Se isso for dominado, tem-se um controle de velocidade [5].

O ângulo de disparo de cada par de tiristores é controlado de forma eletrônica, permitindo a aplicação de uma tensão progressivamente variável nos terminais do motor durante o processo de aceleração. No término do intervalo de partida, a tensão atinge seu valor total de maneira gradual, por meio de uma rampa ascendente, evitando alterações bruscas ou saltos na tensão.

Na Fig. 1 é apresentada uma curva típica de acionamento para soft-starter, sendo U_p a tensão de partida definida para um motor e U_n a sua tensão nominal de operação.

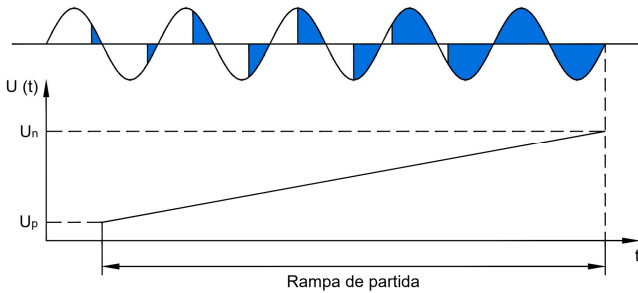


Fig 1 Curva típica de acionamento por soft-starter.

Ao limitar o valor da tensão nos terminais do motor, é possível manter a corrente de partida (na linha) próxima do valor nominal, com variações suaves.

Entretanto, os acionamentos por soft-starter, sendo componentes eletrônicos, estão sujeitos a problemas além da frequência fundamental, especialmente devido aos harmônicos e suas interações com outras cargas no sistema de distribuição.

III. BANCO DE CAPACITORES PARA CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA E RESSONÂNCIA

A correção do fator de potência consiste em introduzir elementos reativos, geralmente capacitivos, para aproximar o fator de potência da unidade ou de um valor de referência. O método mais comum utilizado em sistemas elétricos industriais é a instalação de bancos de capacitores em paralelo com a carga nos barramentos onde se deseja aumentar o fator de potência.

Em condições em que as formas de onda de tensão e corrente são puramente senoidais e o sistema elétrico opera de forma equilibrada, adicionar bancos de capacitores em paralelo com as cargas indutivas de um sistema basta para resolver o problema do fator de potência. Entretanto, quando essa inclusão altera não só o valor de potência, como também a frequência fundamental do sistema.

Com o aumento de consumidores com cargas não lineares ligados nas redes de energia elétrica, têm-se tornado cada vez mais necessário levar em consideração a presença de harmônicos de corrente e tensão no planejamento e operação das redes [6].

Isso se dá principalmente pela utilização em larga escala de acionamentos de velocidade variável para motores, fontes chaveadas, fornos a arco, retificadores, sistemas de iluminação, bem como outras cargas não lineares que apresentam considerável influência na qualidade da energia nos sistemas elétricos. Vale ressaltar que essas cargas (ou o conjunto delas) devem apresentar uma elevada distorção de corrente aliada a uma potência significativa em relação à potência de curto-circuito do sistema para que de fato existam

distorções que possam prejudicar os índices de qualidade e a operação do sistema em estudo.

A ressonância ocorre quando a frequência natural de um sistema elétrico coincide com a frequência de uma fonte de excitação (como a frequência da rede ou harmônicos gerados por dispositivos eletrônicos). Isso pode resultar em correntes ou tensões excessivas, causando problemas operacionais.

IV. ESTUDO DE CASO: FALHAS DURANTE PARTIDAS DE MITs

Neste capítulo, o sistema elétrico em estudo será descrito, bem como os problemas observados pela equipe técnica e de manutenção de uma determinada planta industrial durante partidas de motores em média tensão utilizados para acionamento de bombas.

Através de uma falha crítica em uma das bombas, foram descobertas fragilidades em outro motor desse mesmo sistema, expondo fragilidades no processo contínuo.

A. Descrição do Sistema Elétrico

O sistema elétrico em estudo, apresentado na Fig. 2, faz parte do sistema de captação de água de uma unidade industrial. O suprimento de energia elétrica desse sistema é realizado por dois transformadores de interface com o concessionário em 138/6,6 kV.

A partir do secundário dos transformadores, são alimentadas as barras B2A e B2B que, por sua vez, alimentam três motores de indução trifásicos idênticos acionados por soft-starter e três bancos de capacitores para compensação reativa. Cada motor desse sistema é responsável pelo acionamento de uma bomba.

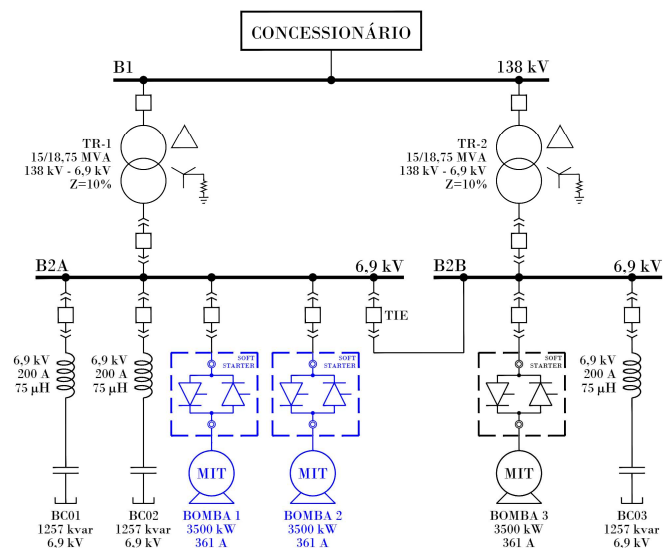


Fig 2 Diagrama unifilar simplificado do sistema elétrico em análise.

Os dados característicos dos motores em análise são apresentados na TABELA I.

TABELA I - DADOS CARACTERÍSTICOS DOS MOTORES EM ANÁLISE

Parâmetro	Valor	Unidade
Tensão nominal	6600	V
Potência nominal	3500	kW
Corrente nominal	361	A
Frequência	60	Hz
Ip/In	5,00	-
Fator de potência	0,88	-
Rendimento	96,3	%
Velocidade assíncrona	1791	rpm
Momento de Inércia do rotor	106	kgm ²
Momento de Inércia da carga	200	kgm ²

Durante o acionamento da Bomba 1, foi relatada a ocorrência de curto-circuito ocorrido na partida, levando a danos severos no motor e, após a inspeção do motor pelo fabricante, foi verificada a ruptura dos pinos de fixação do estator, que caiu sobre o rotor durante o evento.

Ao investigar as possíveis causas dessa falha, foram encontrados indícios de desgaste nessa mesma região do estator também no motor referente à Bomba 2.

A seguir, serão caracterizados os eventos que levaram à falha crítica do motor da Bomba 1 e os danos observados no motor da Bomba 2.

B. Caracterização das ocorrências

Em 21/02/23 foi registrada uma ocorrência relacionada à Bomba 1, na qual os registros indicaram possível falha durante a partida do motor, através de picos sucessivos de corrente nas três fases, correntes com valores medidos superiores a 4 kA, conforme apresentado na Fig. 3, e diversos pick-ups da função ANSI 46 (desbalanço de corrente) registrados, seguido de atuação final do relé proteção por função de sobrecorrente instantânea de neutro (ANSI 50N).

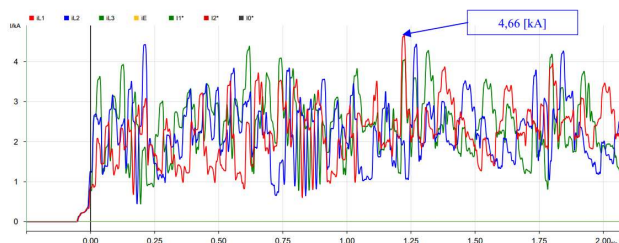


Fig. 3 Oscilografia do evento de 21/02/2023 - Valor eficaz (RMS) das correntes de linha medidas pelo relé.

A Oscilografia do relé de proteção do motor apresentada na Fig. 3 apresenta características geralmente observadas na ocorrência de curtos-circuitos.

Após averiguação do motor pelo fabricante, constatou-se a queda do estator sobre o rotor durante o evento.

O motor foi enviado para análise na oficina da assistência técnica do fabricante e foi observada a quebra dos pinos de trava do estator à carcaça, indicando que esforços fora do comum foram exercidos pelo conjunto. A Fig. 4 mostra os danos resultantes da ocorrência.



Fig. 4 Sistema de fixação do estator e carcaça danificado.

Analisando o contexto da falha, foram informados pela equipe técnica da planta outros três pontos interessantes:

- Antes do evento o motor operava em condições satisfatórias de corrente, tensão e vibração e parou somente devido a necessidade do processo;
- Foi verificado que o conjunto acionado motor-bomba não se encontrava travado, possibilitando giro para desacoplar o motor.
- Os dispositivos semicondutores (SCR) do soft-starter responsável pelo acionamento do motor estavam danificados.

Considerando as características da falha apresentada, a causa raiz da movimentação do pacote magnético poderia estar relacionado a curto-circuito que superou os níveis de força estática do invólucro da carcaça ou fragilidades na fixação dos pinos guias do estator (pino mal inserido na guia da carcaça ou folgado no alojamento - flanges de travamento do pacote).

Durante a desmontagem do motor da Bomba 1 para manutenção e reparo, houve uma oportunidade de parada da Bomba 2, que foi utilizada para realizar uma inspeção interna neste motor (através das janelas de inspeção). Nesta inspeção, foram constatados sinais claros da existência de deslocamento do estator também neste equipamento. Visto os riscos associados à perda de produção da fábrica, que só pode ser suprida com duas bombas em operação, foi realizado um reforço paliativo nas fixações do estator, aplicando cordões de solda nestes pontos.

Nesta oportunidade também foi inspecionado o motor da Bomba 03, e neste, não foram encontrados sinais de desgaste, tampouco registros ou relatos de desarmes do sistema durante suas partidas.

Através de um levantamento de dados históricos nos relés de proteção, foram identificados outros dois eventos similares, relacionados dessa vez ao motor da Bomba 2: um evento em 07/01/2022 e outro em 30/08/2022, ambos relacionados a tentativas de partida que apresentaram um comportamento bem semelhante ao evento que antecedeu a falha do motor da Bomba 1, mas que culminaram em desligamento à montante, após o trip dos relés da subestação pela função ANSI 46. A Fig. 5 mostra a oscilografia obtida durante o evento da Bomba 2. Observa-se uma magnitude de corrente também na ordem de 4 kA, semelhante ao evento de 2023.

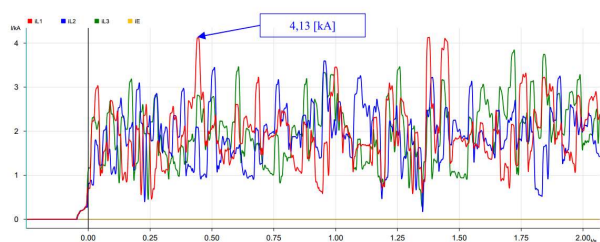


Fig. 5 Oscilografia do evento de 07/01/22 - Valor eficaz (RMS) das correntes de linha medidas pelo relé.

Uma linha do tempo apresentando os eventos avaliados é mostrada na Fig. 6.



Fig. 6 Linha do tempo com os eventos relacionados aos motores das Bombas 1 e 2.

Em ambos os motores (Bomba 1 e Bomba 2) houve constatação de deslocamento do estator na carcaça, sendo que no caso da Bomba 1, o deslocamento avançou até ocorrer o desprendimento total e queda do mesmo sobre o rotor.

C. Pontos levantados durante as análises preliminares

O grupo de trabalho composto pelos fornecedores dos sistemas (motor, bomba e acionamento soft-start) não identificou irregularidades nos componentes mecânicos ou distúrbios de processo que pudessem ter contribuído para ocasionar a falha na fixação do conjunto estator. A maior evidência que poderia ser considerada na análise seriam os registros de falhas em partidas anteriores, nos dois motores. A Bomba 03 não teve indícios de deslocamento do estator e também não houve registros de tais distúrbios neste acionamento.

A suspeita principal, segue na linha de que estes distúrbios possam ter gerado um efeito de “batimento” sobre o motor, porém, sem gerar o campo/fluxo magnético necessário para movimentar o conjunto girante.

Outro fato relevante constatado foi de que o controle dos bancos de capacitores feito pela eletrônica das soft-starters não estava operando adequadamente (eles não estão sendo ligados), fator este já confirmado pelo fabricante do soft-starter que só pode ser corrigido com uma atualização de software do equipamento. Neste quesito, criou-se uma suspeita de que em algum momento, o controle do acionamento tenha ligado um dos bancos de capacitores, mas não o tenha desligado quando necessário, podendo ser a causa dos distúrbios registrados durante as partidas.

Para o fabricante dos motores, foram encaminhados os dados de oscilografia das máquinas, trend de operação (antes e no momento do evento) e datasheet do conjunto motor-bomba para avaliação. Para o fabricante do acionamento do motor (soft-starter), foram encaminhados os ajustes das proteções que estão habilitadas no equipamento para a condição de partida do motor como status e setups dos respectivos parâmetros.

V. ANÁLISE DOS DADOS DISPONIBILIZADOS

Os principais pontos dos relatórios de análise realizados pelos fabricantes dos equipamentos envolvidos nas falhas, bem como as oscilografias referentes aos relés de proteção dos motores avaliados, serão apresentados a seguir

A. Relatório de Análise do fabricante do motor

O fabricante do motor, em suas análises, destacou que milhares de motores idênticos ao analisado foram fabricados e vendidos, sem quaisquer evidências de pinos de travamento do estator rachados ou núcleos soltos. Dessa forma, não se tem registro de falhas semelhantes aos eventos observados em outras localidades em que motores dessa mesma série operam.

No segundo evento na Bomba 1, com o estator já posicionado sobre o rotor, um comando de partida resultou no desarme do relé de proteção. Segundo a equipe técnica da planta industrial, o soft-starter apresentou falhas nos dispositivos semicondutores.

O fabricante do motor verificou que as proteções de sobrecorrente, desbalanço de corrente, falha à terra, arco elétrico e sobretemperatura estavam desabilitadas, aumentando a vulnerabilidade do motor a falhas.

B. Relatório de Análise do fabricante do soft-starter

O relatório do fabricante do soft-starter menciona que a provável causa da falha dos semicondutores controlados (SCR) está relacionada à corrente de curto-circuito, porém não apresenta análises que comprovem essa hipótese.

Uma medição de corrente de partida por meio da Soft Starter, foi apresentada pelo fabricante, ressaltando que os sinais de corrente fornecidos pela oscilografia não representam as correntes reais, independentemente do sucesso ou não das partidas, devido à aplicação de filtros no sinal de medição.

Nas Figs 7 e 8 são apresentadas imagens das leituras das correntes de partida de uma soft-starter, onde estão presentes predominantemente componentes nas 3ª e 5ª frequências harmônicas.

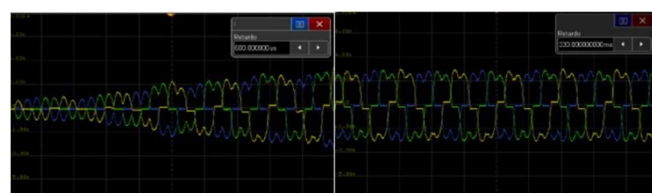


Fig. 7 Medição por osciloscópio da corrente de partida de um soft-starter.

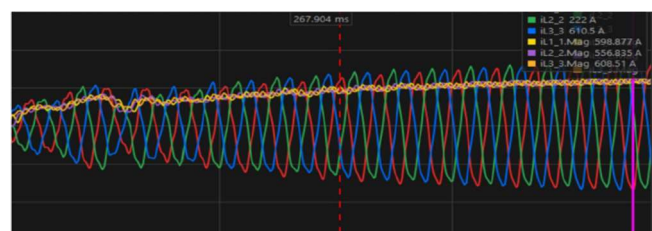
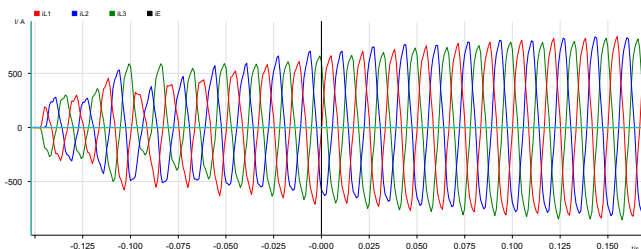


Fig. 8 Medição por oscilografia de relé de proteção e filtro correspondente da corrente de partida de um soft-starter.

Além disso, o fabricante do soft-starter aponta que um curto-circuito entre fases da Soft-Starter resultaria na circulação de corrente interna no equipamento.

Durante uma partida de rotina para a Bomba 2, foram capturadas algumas oscilografias para fins de análise, conforme Fig. 9.

Durante a partida, observa-se a presença predominante de harmônicos de segunda e quinta ordens. Além de menores contribuições de harmônicos de 3ª, 4ª, 6ª e 7ª ordens.



Os harmônicos de corrente predominantes estão mostrados na TABELA II.

Sinal medido	iI1 [A]	I12 [A]	I13 [A]
I RMS	561,2	557,6	559,6
h = 0 (DC)	1,25	10,14	10,49
h = 2	13,77	13,32	15,21
h = 3	1,70	1,31	2,31
h = 4	4,33	3,19	5,01
h = 5	32,13	28,98	27,71
h = 6	2,00	0,50	1,70
h = 7	4,29	4,01	5,10

No sistema em análise existem três bancos de capacitores que operam no barramento de 6,9 [kV]. Estes bancos de capacitores durante determinadas condições operacionais podem permitir a ocorrência de ressonâncias série e/ou paralela que resultam por um curto espaço de tempo a circulação de correntes elevadas.

Estas correntes ocorrem quando é realizada a partida de um determinado motor através de soft-starter com o banco de capacitores já energizados.

O sistema elétrico em análise foi modelado conforme ilustrado na Fig. 10.

A reatância equivalente de Thévenin na frequência fundamental (XTH1), vista da barra de 138 kV, foi determinada com base nas correntes de curto-circuito trifásicas de 11,41 kA, conforme relatórios da planta industrial, resultando em 6,9829 Ω .

As reatâncias equivalentes dos transformadores TR-1 e TR-2 foram calculadas a partir dos dados disponíveis.

Já as reatâncias equivalentes na frequência fundamental dos motores de indução trifásicos, vistas das barras de 6,9 kV, foram determinadas com base nos diagramas de impedância apresentados em suas folhas de dados.

Da mesma forma, as reatâncias dos bancos de capacitores e seus respectivos reatores série foram estabelecidas conforme os seguintes valores:

$$X_{MIT1}=X_{MIT2}= 2,5747 \text{ } [\Omega]$$

$$X_{R1} = X_{R2} = X_{R3} = 0,0283 \text{ } [\Omega]$$

$$XBC1 = XBC2 = XBC3 = 37,8702 \text{ } [\Omega]$$

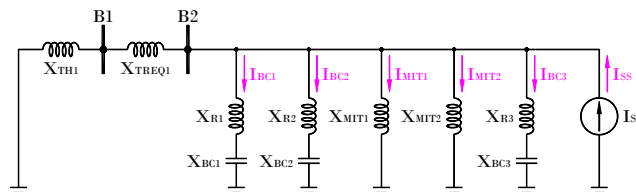


Fig. 10 - Diagrama de impedâncias para análise dos efeitos dos harmônicos de corrente

O Motor 3 foi substituído por uma fonte de corrente correspondente a injeção dos harmônicos durante a partida do mesmo com soft starter.

Foram realizadas simulações para determinar o comportamento do sistema em função da frequência e os resultados nas diversas combinações serão apresentados a seguir. Foi considerado que o harmônico de corrente em cada frequência é de 1 [A] (valor eficaz) para se verificar se existe ou não amplificação destes harmônicos. Os casos de referência são apresentados a seguir.

CASO 1 - Um MIT e um banco de capacitores operando e um motor partindo: amplificação da corrente foi de 3,5 vezes e ocorreu na frequência de 842 [Hz].

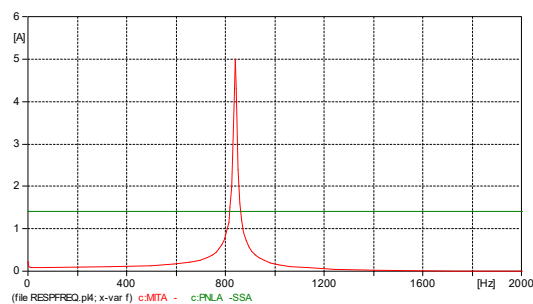


Fig. 11 Amplificação da corrente no MIT em 3,5 vezes para injeção de 1 [A] (842 [Hz]).

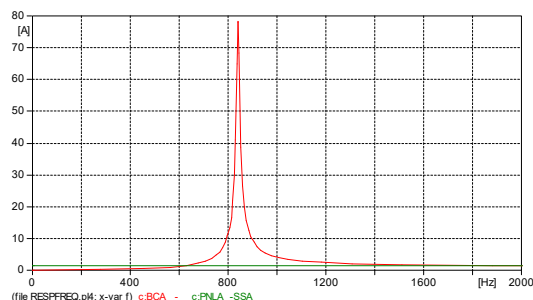


Fig. 12 Amplificação da corrente no banco de capacitores em 55,1 vezes para injeção de 1 [A] (842 [Hz]).

CASO 2 - Um MIT e dois bancos de capacitores operando e um motor partindo: amplificação da corrente foi de 4,3 vezes e ocorreu na frequência de 618 [Hz]

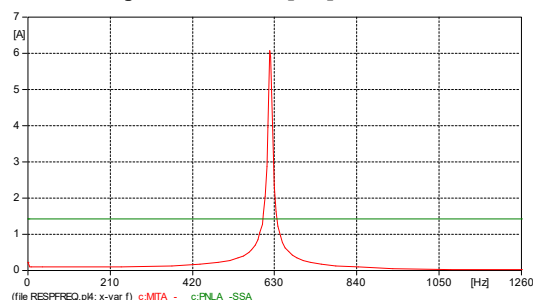


Fig. 13 Amplificação da corrente no MIT em 4,3 vezes para injeção de 1 [A] (618 [Hz]).

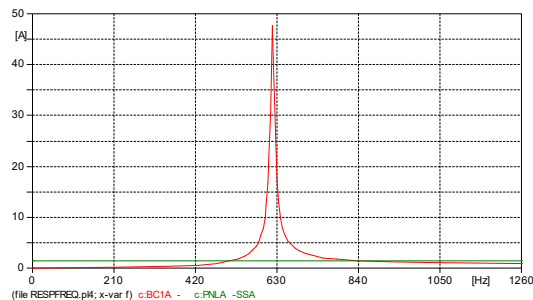


Fig. 14 Amplificação da corrente no banco de capacitores em 33,7 vezes para injeção de 1 [A] (618 [Hz]).

CASO 3 - Um MIT e três bancos de capacitores operando e um motor partindo: amplificação da corrente foi de 4,7 vezes e ocorreu na frequência de 511 [Hz].

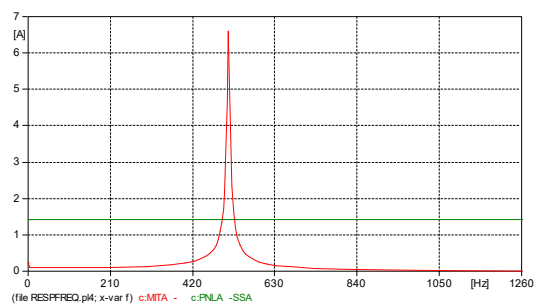


Fig. 15 Amplificação da corrente no MIT em 4,7 vezes para injeção de 1 [A] (511 [Hz]).

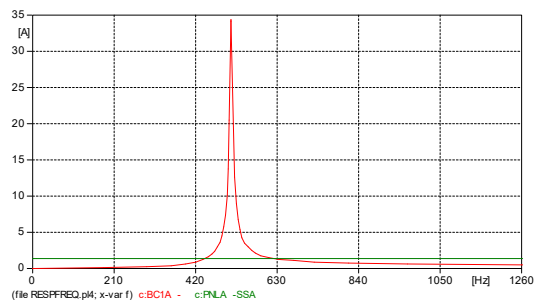


Fig. 16 Amplificação da corrente no banco de capacitores em 24,3 vezes para injeção de 1 [A] (511 [Hz]).

CASO 4 - Dois MIT e um banco de capacitores operando e um motor partindo: amplificação da corrente foi de 3,5 vezes e ocorreu na frequência de 864 [Hz]

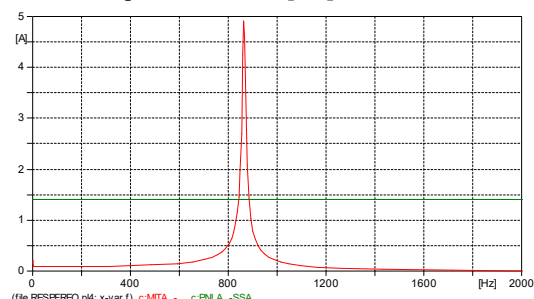


Fig. 17 Amplificação da corrente no MIT em 3,5 vezes para injeção de 1 [A] (864 [Hz]).

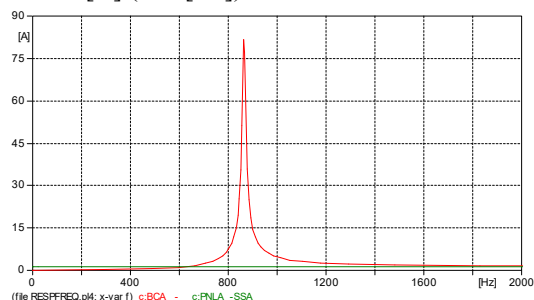


Fig. 18 Amplificação da corrente no banco de capacitores em 57,8 vezes para injeção de 1 [a] (864 [Hz]).

CASO 5 - Dois MIT e dois bancos de capacitores operando e um motor partindo: amplificação da corrente foi de 4,2 vezes e ocorreu na frequência de 636 [Hz]

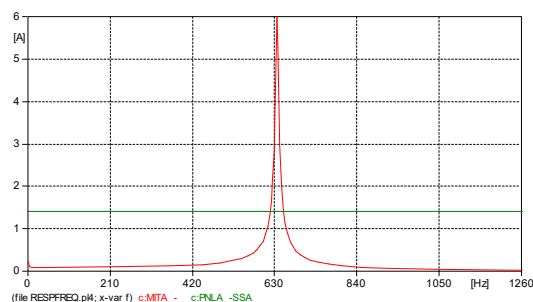


Fig. 19 - Amplificação da corrente no MIT em 4,2 vezes para injeção de 1 [A] (636 [Hz])

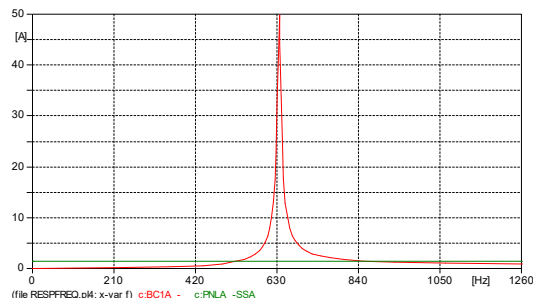


Fig. 20 Amplificação da corrente no banco de capacitores em 35,2 vezes para injeção de 1 [A] (636 [Hz])

CASO 6 - Dois MIT e três bancos de capacitores operando e um motor partindo: amplificação da corrente foi de 4,6 vezes e ocorreu na frequência de 527 [Hz];

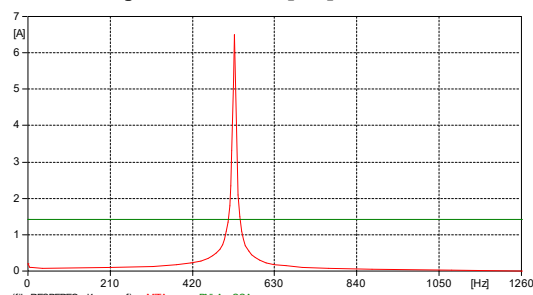


Fig. 21 Amplificação da corrente no MIT em 4,6 vezes para injeção de 1 [a] (527 [Hz]).

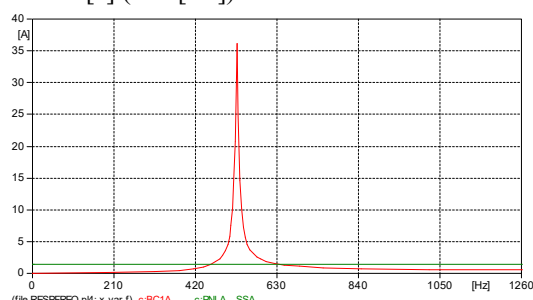


Fig. 22 - Amplificação da corrente no banco de capacitores em 25,5 vezes para injeção de 1 [a] (527 [Hz]).

A TABELA III apresenta os harmônicos injetados pelo soft starter durante a partida do motor. Como a ressonância ocorre em múltiplo não inteiro de 60 [Hz] (inter-harmônicos) pode-se determinar a intensidade dos harmônicos antes e depois do ponto de ressonância. Nesse caso se verifica que os harmônicos de corrente variam de praticamente 4 a 16 [A] cuja amplificação correspondem a correntes que podem atingir algo da ordem de 75 [A], inferior a corrente nominal do motor.

Embora de baixa intensidade, estas correntes podem causar esforços torcionais que ao longo do tempo podem causar ruptura nos parafusos de fixação dos enrolamentos na carcaça do motor.

TABELA III - HARMÔNICOS PRÓXIMOS AOS PONTOS DE RESSONANCIA

CASO	F [Hz]	ORDEM HARM ANTES	ORDEM HARM DEPOIS	IH [A] ANTES	IH [A] DEPOIS
1	842	14	15	14,52	11,41
2	618	10	11	3,88	5,8
3	511	8	9	5,8	3,88
4	864	14	15	14,52	11,41
5	636	10	11	3,88	5,8
6	527	8	9	5,8	3,88

Assim, os harmônicos de corrente produzidos durante a partida através do soft-starter de um dos motores que circulam pelo estator do motor que está partindo são amplificados nos motores que já estão em operação devido a uma ressonância paralela entre os bancos de capacitores, os reatores limitadores de corrente e os enrolamentos do estator do motor.

VII. CONCLUSÕES

A principal dificuldade na mitigação de falhas em uma aplicação industrial reside no fato de que cada uma das considerações exige conhecimento específico de especialistas de diferentes áreas. Esse cenário cria um desafio significativo na identificação, análise e solução eficaz de problemas, pois a interdependência entre os fatores envolvidos exige uma abordagem multidisciplinar e coordenada.

O fabricante do equipamento de acionamento e o projetista do motor precisam garantir que as condições intrínsecas do sistema estejam adequadas para sua aplicação específica. A seleção inadequada de motores e acionamentos pode resultar em ineficiências energéticas, superaquecimento e falhas operacionais, como as descritas nesse trabalho. A integração entre os diferentes componentes deve ser cuidadosamente projetada para evitar incompatibilidades que possam comprometer a confiabilidade do sistema.

A partir da análise realizada, foi constatado que a quebra dos parafusos de fixação dos enrolamentos do estator na carcaça do motor ocorreu devido aos esforços eletromecânicos resultantes da amplificação de componentes harmônicos não previstos pelos fabricantes, principalmente durante o processo de partida, utilizando soft-starter na presença de bancos de capacitores de grande porte. A interação entre esses dispositivos podem gerar ressonâncias que intensificam correntes harmônicas, causando impactos mecânicos ao longo do tempo.

Diante disso, recomendou-se como principais ações mitigatórias: evitar alterações abruptas de carga no motor, monitorar continuamente vibrações e distúrbios na operação e inspecionar sinais de movimentação do estator em caso de paradas dos motores.

Como medida corretiva definitiva, sugeriu-se a garantia de desativação por meio de intertravamento dos bancos de capacitores durante a partida dos respectivos motores instalados no sistema elétrico em análise.

VIII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - Lobosco, Orlando Silvio; Dias, José Luiz Pereira da Costa: Seleção e aplicação de motores elétricos, Volume 1, Editora McGraw-Hill, São Paulo, 1988;
- [2] - CAZACU, Emil; IONIȚĂ, Valentin; PETRESCU, Lucian. Transient state characterization of asynchronous motors in modern low-voltage electric installations. University POLITEHNICA of Bucharest, Romania, Faculty of Electrical Engineering.
- [3] - Silva, L. L. G., de Lima, P. J. C., Ferreira, V. L. do N., & de Sena, D. S. (2021). Modelagem de dispositivos de partida eletrônica para análise de emissão de harmônicos / Modeling of electronic starting devices for analysis of the emission of harmonics. Brazilian Journal of Development, 7(12), 120284–120291.
- [4] SILVA, W. G.; FREITAS, M. A. A. DE; KOPCAK, I. Correntes harmônicas causadas pelo motor de indução alimentado por inversor de frequência no contexto das recomendações da norma iec standard 519-92. p. 1–5, 2013.
- [5] - Junior, Nery de Oliveira: Acionamentos de velocidade variável, 1ª edição, Artliber Editora Ltda, São Paulo, 2019;
- [6] - COGO, João Roberto; SOQUEIRA FILHO, José Batista. Capacitores de potência e filtros de harmônicos. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna, 2018.