

A Influência da Variação de Tensão no Acionamento de Cargas por Motores de Indução: Um Estudo de Caso

Bruna Alves Alvarenga
SM&A Sistemas Elétricos
Belo Horizonte, Brasil
bruna.alvarenga@sma-eng.com.br

Henrique Tassara Calenzani¹
Universidade Federal de Minas Gerais
Belo Horizonte, Brasil
tassarash@hotmail.com

Daniel Maciel de Almeida
SM&A Sistemas Elétricos
Belo Horizonte, Brasil
daniel.almeida@sma-eng.com.br

Igor Araújo Camargos
SM&A Sistemas Elétricos
Belo Horizonte, Brasil
igor.camargos@sma-eng.com.br

Henrique Fantoni Primo¹
Universidade Federal de Minas Gerais
Belo Horizonte, Brasil
henrique.fantoni@sma-eng.com.br

Paulo Porto Cenachi
SM&A Sistemas Elétricos
Belo Horizonte, Brasil
paulo.porto@sma-eng.com.br

Resumo — O objetivo deste artigo é estudar a influência da variação de tensão de um sistema elétrico no acionamento de motores de indução, analisando principalmente os valores de tensão nos terminais do motor, o conjugado do conjunto motor-carga e os tempos de aceleração envolvidos. O caso em questão trata-se de um sistema elétrico industrial de 6,6 kV, no qual um motor de 4000 HP apresentou problemas de sobre aquecimento e ruídos anormais durante a tentativa de acionamento de uma carga. Simulações foram conduzidas, com o auxílio de um programa computacional, de modo a entender o problema e buscar soluções de melhora da qualidade de energia do sistema elétrico, bem como da melhor forma de acionamento. Os resultados obtidos foram validados por meio de realização de medições das grandezas elétricas, após a aplicação da solução recomendada, demonstrando sua eficácia.

Palavras-chave — Qualidade da energia; acionamento de motores; desequilíbrios de tensão; conjugado de partida; tempo de aceleração

I. INTRODUÇÃO

A qualidade da energia elétrica é um tema muito comentado e estudado em todas as áreas que envolvem a engenharia elétrica, seja no sistema elétrico de potência com tensões elevadas em sistemas de transmissão e distribuição, em indústrias diversas ou até mesmo em laboratórios ou sistemas eletrônicos.

Tantos estudos decorrem devido à importância deste tema no que se refere ao bom funcionamento dos sistemas elétricos. Um sistema com boa qualidade de energia elétrica apresenta alta confiabilidade, menor ocorrência de defeitos e, principalmente, o correto acionamento e funcionamento de cargas elétricas.

Para uma análise completa da qualidade da energia elétrica de um sistema são necessárias análises de diversas grandezas elétricas. Para os estudos de acionamento de motores de indução, os pontos mais importantes de análise envolvem os níveis de tensão do sistema, seja no regime transitório de partida ou durante seu regime permanente, bem como o seu tempo de aceleração, que também contempla os limites térmicos da própria máquina de indução.

O motor de indução é projetado de forma que, em um sistema com condições normais de tensão, este tenha um conjugado suficientemente capaz de partir uma carga qualquer. Ou seja, seu conjugado deve ser maior que o conjugado requisitado pela carga. Porém este valor de conjugado é diretamente proporcional ao quadrado da tensão. Em sistemas que oferecem níveis de tensão abaixo dos seus valores nominais, os motores de indução podem ter problemas no acionamento das cargas.

Outro ponto que deve ser analisado é o limite térmico do motor, principalmente em relação ao seu ponto de rotor bloqueado. Com um valor de tensão abaixo da tensão na qual o motor de indução foi projetado, este motor irá aumentar o seu tempo de aceleração, sobre aquecendo o mesmo, podendo superar seu limite térmico e, caso a proteção deste equipamento não esteja ajustada corretamente, pode ocorrer a queima do motor de indução.

Para a análise específica deste trabalho, considerou-se um sistema elétrico industrial de 6,6 kV, avaliando os níveis de tensão e tempo de aceleração de um motor de indução de 4000 HP, apresentado na Figura 1.



Fig. 1. Grupo motor-carga em estudo.

É importante ressaltar que, para qualquer motor de indução, é essencial a análise destes pontos, uma vez que durante a sua partida, há uma alta demanda de potência reativa pelo motor

(baixo fator de potência), o que por si só já acarreta em uma queda de tensão transitória no sistema elétrico. Este item é ainda mais importante quanto maior seja a potência do motor de indução estudado.

Na primeira tentativa de partida do soprador, este equipamento apresentou problemas de sobre aquecimento e ruídos anormais, sendo desligado pelo dispositivo de proteção. Em uma primeira investigação, observou-se um erro em seu projeto, especificamente na variação do damper, tornando o conjugado da carga diferente do previsto para a realização da sua partida.

Foram realizadas simulações computacionais, a partir do software SKM Power Tools [1], de modo a analisar os resultados obtidos e propor soluções de melhoria para a correta partida do motor de indução.

A partir dos resultados das simulações e da solução proposta, esta foi implantada em campo, resolvendo o problema relatado da partida do motor de indução. Neste momento foram realizadas medições de grandezas elétricas, comparando com os resultados simulados anteriormente, comprovando os estudos teóricos realizados e a eficácia da solução apresentada.

II. A INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA TENSÃO NA PARTIDA DE MOTORES DE INDUÇÃO

Conforme descrito anteriormente, a variação de tensão, mais precisamente a queda de tensão do sistema, reduz o conjugado do motor, podendo inviabilizar a partida da carga ou até mesmo causar grandes danos ao motor de indução. Além disso, a queda de tensão deverá ser tal forma que não cause perturbações nas cargas adjacentes.

A ABNT NBR 17094-1 [2] estabelece que os motores de indução devem partir, sem causar problemas para o acionamento de suas cargas, com até 10% de queda de tensão. Porém é importante ressaltar que na prática verificamos que alguns sistemas suportam uma queda de tensão um pouco maior, dependendo da suportabilidade dos equipamentos conectados ao mesmo. As curvas de conjugado e corrente do motor, para diferentes tensões, são apresentadas na Figura 2.

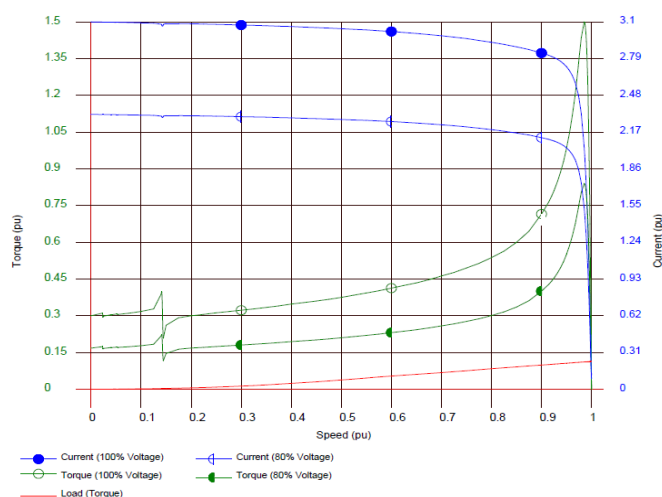


Fig. 2. Características de Desempenho do Motor de Indução Trifásico.

Durante a fase de projeto da construção do motor, é possível que este equipamento seja preparado para suportar uma queda de tensão superior, reduzindo os riscos de problemas durante a partida ou regime permanente.

Outro parâmetro a ser verificado é o tempo de aceleração do conjunto motor-carga, que pode ser calculado a partir da curva de conjugado do motor e da carga resistente. A redução do conjugado do motor devido à queda de tensão da partida não deve prolongar o tempo de aceleração do conjunto acima do limite térmico de rotor travado do motor.

Assim, o tempo de aceleração do conjunto motor-carga deverá ser obrigatoriamente inferior ao limite térmico de rotor travado do respectivo motor, de forma a não causar danos no equipamento.

Os dados principais do motor em estudo são apresentados na Tabela 1.

TABELA I. DADOS DE PLACA DO MOTOR DE INDUÇÃO.

POTÊNCIA NOMINAL	4000	HP		
TENSÃO NOMINAL	6600	V		
TORQUE NOMINAL COM	100%	TENSÃO	8006	N.m
TORQUE NOMINAL COM	87%	TENSÃO	6102	N.m
TORQUE PARTIDA	118%		9447	N.m
TORQUE MÁXIMO	268%		21456	N.m
MOMENTO DE INÉRICA	($GD^2 = 4 \times WK^2$)		154,74	kg.m ²
VELOCIDADE (ROTAÇÃO) NOMINAL MOTOR	3600	rpm		
FREQUÊNCIA	60	Hz		
NÚMERO DE POLOS	2			
FATOR DE POTÊNCIA	0,944	i		
RENDIMENTO	95,85	%		
FATOR DE SERVIÇO	1,15			
CORRENTE NOMINAL	288	A		
CORRENTE PARTIDA	(I_p/I_n)	6,31		
CORRENTE À VAZIO	-	A		
CORRENTE ROTOR TRAVADO	(I_{rt}/I_n)	6,31		
TEMPO DE ROTOR TRAVADO À QUENTE	7,2	s		
TEMPO DE ROTOR TRAVADO À FRIO	8,5	s		

Desta forma, o estudo foi realizado de forma que o tempo de aceleração do motor seja inferior ao seu tempo de rotor bloqueado, que conforme informado na placa, é de 7,2 segundos, para a referência de tensão nominal.

De forma inversa ao torque, sabe-se que o tempo de rotor bloqueado é alterado com a alteração da tensão. Porém, neste caso, utilizou-se como referência o valor para a tensão nominal.

III. MODELAGEM DO SISTEMA

O sistema elétrico em estudo faz parte de uma planta industrial, alimentado a partir de um transformador abaixador de 20 MVA 33-6,9 kV, que alimenta três motores idênticos (Sopradores 1, 2 e 3 em estudo), sendo que um é apenas reserva, bem como alimenta outras cargas diversas. O sistema elétrico, de forma simplificada, pode ser visto na Figura 3.

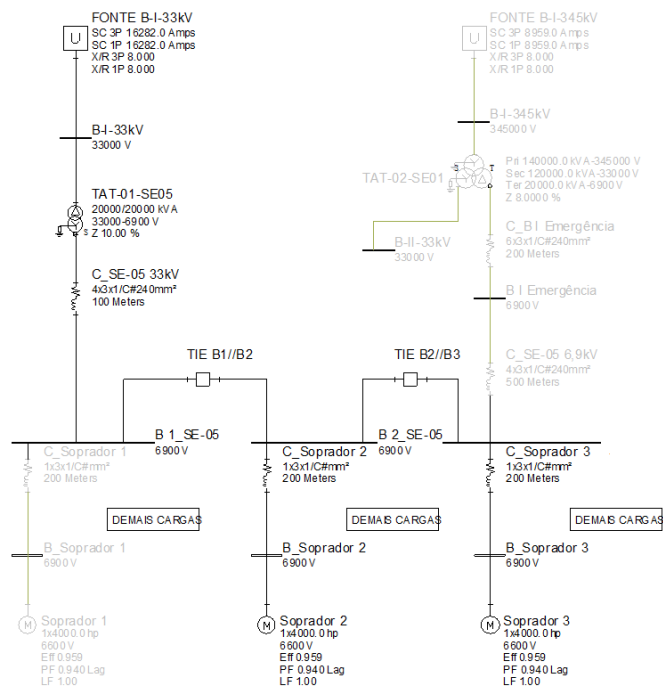


Fig. 3. Diagrama Unifilar do Sistema Elétrico em Estudo.

Basicamente o sistema contempla três painéis de 6,9 kV, interligados a partir de dois disjuntores de interligação. Estes painéis alimentam circuitos de diversas cargas, bem como os sopradores em estudo.

Além da alimentação normal, este sistema ainda pode ser alimentado pelo terciário de outro transformador, sendo esta uma entrada apenas para emergência, em caso de contingências. O cenário utilizando a alimentação de emergência também foi analisado.

A modelagem foi realizada no programa SKM Power Tools, versão 7.0.2.4, utilizando-se os módulos DAPPER e LOAD FLOW. O módulo específico de partida de motores, Transient Motor Starting (TMS), não foi utilizado, em uma análise inicial, devido a necessidade de urgência da indústria.

De maneira geral, a modelagem dos componentes foi realizada com foco na análise da partida destes motores, seguindo as diretrizes e recomendações da norma IEEE Std 141 [3]. Os modelos utilizados e as ferramentas de cálculo, para cada um dos elementos modelados, seguem detalhados nos próximos itens.

• Fontes do sistema

Modelou-se as alimentações do sistema como uma fonte de tensão trifásica, utilizando a impedância equivalente do circuito superior, com dados conforme Table II.

TABELA II. DADOS DAS FONTES.

Fontes do Sistema		
Grandeza	Fonte normal	Fonte Emergência
Tensão	33 kV	345 kV
Frequência	60 Hz	60 Hz
Contribuição	16,282 kA	8,959 kA

• Transformadores

Os transformadores foram modelados conforme seus dados de placa, com os dados básicos conforme Table III.

TABELA III. DADOS DOS TRANSFORMADORES.

Transformadores		
Grandeza	TAT-01-SE05	TAT-02-SE01
Potência	20 MVA	20 MVA (terciário)
Impedância	10 %	8 %
Relação de Tensão	33-6,9 kV	345-6,9 kV

• Cabos

Os cabos foram modelados conforme suas reatâncias indutivas e resistências, de acordo com suas bitolas, quantidades de cabos por fase e comprimentos.

• Cargas Diversas

As demais cargas alimentadas pelo sistema em estudo foram modeladas como cargas não-motóricas equivalentes, em sua demanda máxima de forma a elevar o carregamento dos transformadores e apresentar um caso mais crítico em relação às quedas de tensão do sistema elétrico.

• Motores de Indução

Os motores de indução em estudo foram modelados de acordo com os dados obtidos nas placas e folhas de dados fornecidas pelo fabricante. Os dados principais são apresentados na Table IV.

TABELA IV. DADOS DOS MOTORES DE INDUÇÃO EM ESTUDO.

Tag	Potência Nominal	Vn (kV)	Ip/In	Fator de Potência de Partida
Sopradores 1/2/3	4000 HP	6,6	6,31	0,21

IV. ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES

Considerou-se nas simulações dois cenários para análises das quedas de tensão nos barramentos principais durante a partida do motor:

- Alimentação normal do sistema, com demanda máxima das cargas diversas, um soprador operando e o segundo partindo.
- Alimentação em emergência do sistema, com demanda máxima das cargas diversas, um soprador operando e o segundo partindo.

Analisando o primeiro cenário, foi obtida uma queda de tensão de 19,02%, conforme apresentado na Figura 4.

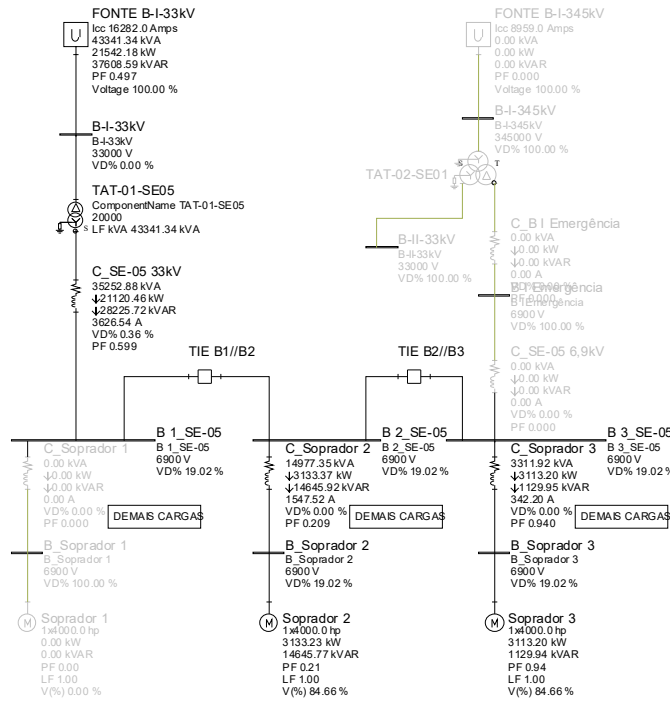


Fig. 4. Resultados durante a partida do Soprador 2 – Cenário 1.

Podemos observar que o valor de queda de tensão foi bastante elevado e muito acima do valor de 10% tomado como referência, exemplificando o motivo dos problemas relatados anteriormente durante a partida do motor.

Com este valor de queda de tensão, analisou-se o tempo de aceleração deste motor, conforme cálculo apresentado na Table V.

TABELA V. TEMPO DE ACELERAÇÃO DO MOTOR – CENÁRIO 1.

RPM	Varição	Varição	Conjugado Motor	Conjugado	Conjugado Carga	Conjugado	Conjugado Aceleração	TEMPO
(pu)	RPM	RPM	(lb.pé)	Médio Motor	(lb.pé)	Médio Carga	(lb.pé)	(s)
0		0	4639,68		0			0
0,1	0,1	360	4561,04	4600,36	112,79	56,4	4543,96	0,45
0,2	0,1	360	4600,36	4580,7	338,37	225,58	4355,12	0,46
0,3	0,1	360	4639,68	4620,02	563,95	451,16	4168,86	0,49
0,4	0,1	360	4679	4659,34	1127,91	845,93	3813,41	0,53
0,5	0,1	360	4796,96	4737,98	1973,83	1550,87	3187,11	0,64
0,6	0,1	360	5032,87	4914,91	2481,39	2227,61	2687,3	0,75
0,7	0,1	360	5504,7	5268,79	3383,72	2932,55	2336,23	0,87
0,8	0,1	360	6920,2	6212,45	4286,04	3834,88	2377,57	0,85
0,9	0,1	360	9751,19	8335,7	5639,53	4962,78	3372,91	0,6
0,91	0,01	36	9908,47	9829,83	5752,32	5695,92	4133,91	0,05
0,92	0,01	36	10144,38	10026,43	5865,11	5808,71	4217,71	0,05
0,93	0,01	36	10419,62	10282	5977,9	5921,5	4360,5	0,05
0,94	0,01	36	10537,58	10478,6	6090,69	6034,29	4444,3	0,05
0,95	0,01	36	10419,62	10478,6	6203,48	6147,09	4331,51	0,05
0,96	0,01	36	9987,11	10203,36	6316,27	6259,88	3943,49	0,05
0,99	0,01	36	5504,7	7745,91	6654,64	6485,46	1260,45	0,16
1	0,01	36	0	0	6767,43	6711,04	0	0
TOTAL								6,08 s

Observa-se que com este nível de queda de tensão, calculou-se um tempo de 6,08 segundos de aceleração, tempo este muito próximo ao tempo de rotor bloqueado do motor (7,2 segundos), o que pode ter levado ao sobre aquecimento relatado.

Simulando o segundo cenário, foram obtidos os seguintes resultados apresentados na Figura 5.

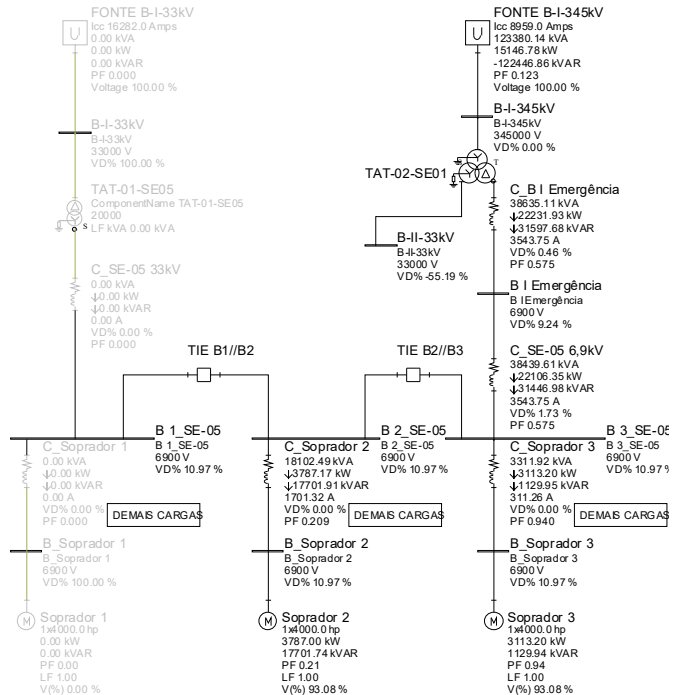


Fig. 5. Resultados durante a partida do Soprador 2 – Cenário 2.

Podemos observar que apenas alterando a fonte de alimentação do sistema (uma fonte mais forte), a queda de tensão do sistema reduziu significativamente, chegando a um valor em torno de 11%.

Recalculando o tempo de aceleração previsto do motor, o resultado é apresentado conforme Table VI.

TABELA IV. TEMPO DE ACELERAÇÃO DO MOTOR – CENÁRIO 2.

RPM	Varição	Varição	Conjugado Motor	Conjugado	Conjugado Carga	Conjugado	Conjugado Aceleração	TEMPO
(pu)	RPM	RPM	(lb.pé)	Médio Motor	(lb.pé)	Médio Carga	(lb.pé)	(s)
0		0	5519,35		0			0
0,1	0,1	360	5425,8	5472,57	112,79	56,4	5416,18	0,37
0,2	0,1	360	5472,57	5449,19	338,37	225,58	5223,6	0,39
0,3	0,1	360	5519,35	5495,96	563,95	451,16	5044,8	0,4
0,4	0,1	360	5566,12	5542,73	1127,91	845,93	4696,8	0,43
0,5	0,1	360	5706,44	5636,28	1973,83	1550,87	4085,41	0,5
0,6	0,1	360	5987,09	5846,77	2481,39	2227,61	3619,15	0,56
0,7	0,1	360	6548,38	6267,73	3383,72	2932,55	3335,18	0,61
0,8	0,1	360	8232,25	7390,31	4286,04	3834,88	3555,43	0,57
0,9	0,1	360	11599,98	9916,11	5639,53	4962,78	4953,33	0,41
0,91	0,01	36	11787,08	11693,53	5752,32	5695,92	5997,61	0,03
0,92	0,01	36	12067,72	11927,4	5865,11	5808,71	6118,69	0,03
0,93	0,01	36	12395,14	12231,43	5977,9	5921,5	6309,93	0,03
0,94	0,01	36	12535,47	12465,3	6090,69	6034,29	6431,01	0,03
0,95	0,01	36	12395,14	12465,3	6203,48	6147,09	6318,22	0,03
0,96	0,01	36	11880,63	12137,89	6316,27	6259,88	5878,01	0,03
0,99	0,01	36	6548,38	9214,5	6654,64	6485,46	2729,05	0,07
1	0,01	36	0	0	6767,43	6711,04	0	0
TOTAL								4,5 s

Com este valor de queda de tensão, o tempo de aceleração foi reduzido para 4,5 segundos, estando, com uma margem de

segurança, abaixo do limite térmico de rotor bloqueado do motor.

Analisando ainda as curvas de conjugado do motor em estudo, observa-se que com este nível de tensão, o motor consegue superar o conjugado da carga e operar corretamente. As curvas para os níveis de tensão estudados em relação à curva da carga são apresentadas na Figura 6.

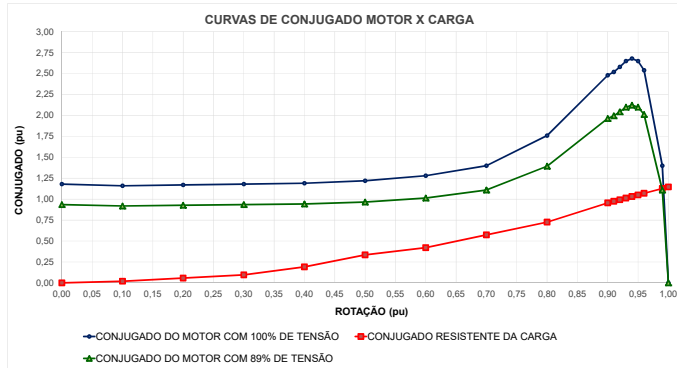


Fig. 6. Curvas de Conjugado em Diferentes Níveis de Tensão.

V. MEDIÇÕES

Mediante os resultados obtidos a partir das simulações realizadas, a configuração obtida no cenário 2 foi implantada em campo e foram realizadas medições das grandezas elétricas de forma a validar as respostas.

A Figura 7 apresenta a queda de tensão ocorrida durante a partida do motor, demonstrando a tensão fase-terra (kV) por tempo (s).



Fig. 7. Medição da Queda de Tensão Obtida Durante a Partida do Motor

Observa-se que o valor obtido na medição de 12,43% foi muito próximo ao resultado das simulações de 11%.

O valor superior da medição ocorreu apenas pela variação de tensão da fonte do sistema no momento da partida do motor, porém sem causar problemas adicionais.

Além da tensão, também foi realizada a medição da corrente e o tempo de aceleração, de forma a comparar com as simulações.

A Figura 8 apresenta a corrente de linha (kA) pelo tempo (s).

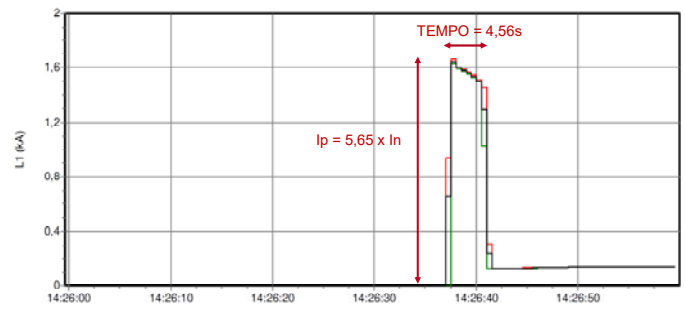


Fig. 8. Medição da Corrente e Tempo de Aceleração Obtidos Durante a Partida do Motor

Observa-se que o tempo de aceleração ficou praticamente igual ao calculado a partir das simulações e a corrente de partida ficou próxima ao informado nos dados de placa do motor, tornando possível que a partida ocorra sem problemas.

Desta forma, o problema de partida do motor em estudo foi resolvido de forma apenas sistêmica, analisando apenas outra fonte disponível para o sistema elétrico, sem a necessidade da troca do motor ou da implantação de outros métodos de partida, como a utilização de inversores de frequência, gerando custos adicionais elevados.

A Table VII apresenta um resumo de todos os resultados obtidos nas simulações juntamente com as medições realizadas em campo.

TABELA VII. COMPARAÇÃO RESULTADOS SIMULADOS COM MEDIDOS.

Resultados Simulados x Resultados Medidos		
Alternativas	Queda de Tensão	Tempo de aceleração
Simulação – Cenário 1	19,02 %	6,08 s
Simulação – Cenário 2	10,99 %	4,50 s
Medição	12,43%	4,56 s

VI. CONCLUSÃO

Mediante os resultados obtidos a partir das simulações e medições realizadas, foi possível observar a influência da queda de tensão na partida de motores de indução, principalmente em relação ao conjugado e tempo de aceleração, podendo causar problemas no acionamento de cargas.

É importante ressaltar que a solução proposta neste estudo foi apenas paliativa, uma vez que diminuiu a confiabilidade do sistema utilizando a alimentação de emergência como alimentação principal.

Outra solução no caso de problemas durante a partida de motores é a utilização de métodos de suavizar o esforço deste equipamento, como softstarters, reostatos, chaveamentos ou, principalmente, a utilização de inversores de frequência. Entretanto devem ser analisados os custos destes equipamentos, que envolvem também projetos, estudos, obras e outros tipos de adequações.

Devem ser realizadas outros tipos de análises ao recomendar diferentes tipos de partida, uma vez que muitas vezes a tensão é reduzida na partida, reduzindo também o conjugado (torque) de partida e dificultando o acionamento das cargas.

Observou-se, neste caso, juntamente com os problemas descritos, um erro de projeto do motor, que foi um grande fator que levou às falhas de partida.

Estes tipos de estudos e análises devem ser realizados principalmente no caso de motores de grande porte, como o equipamento deste trabalho. Sistemas com elevados níveis de queda de tensão causados por sistemas com potências de curto-circuito reduzidas e, portanto, elevadas impedâncias (fonte fraca), alto carregamento ou fator de potência deficiente também são casos extremos que devem ser analisados com cautela.

Pode-se concluir que é essencial que a qualidade da energia de um sistema elétrico seja elevada, de forma a não causar interrupções indevidas, danos aos equipamentos elétricos ou até mesmo acidentes com os operadores.

VII. REFERÊNCIAS

- [1] SKM POWER TOOLS FOR WINDOWS (PTW). VERSÃO 7.0.2.4. SKM SYSTEMS ANALYSIS, 1995.
- [2] ABNT NBR 17094-1 – 2018, “MÁQUINAS ELÉTRICAS GIRANTES - MOTORES DE INDUÇÃO – PARTE 1: TRIFÁSICOS”.
- [3] IEEE Std 141 – 1993, “IEEE RECOMMENDED PRACTICE FOR ELECTRIC POWER DISTRIBUTION FOR INDUSTRIAL PLANTS”.