



ANÁLISE COMPUTACIONAL DOS EFEITOS EM PLANTAS INDUSTRIAIS DA PARTIDA DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

Fillipe Hilário Oliveira¹, Thales Lima Oliveira^{1 2}

¹FEELT – Universidade Federal de Uberlândia

Resumo - O presente artigo descreve uma pesquisa de afundamentos de tensões, ocasionada por partidas de motores em plantas industriais e os possíveis problemas ocasionados na rede que por sua vez podem impactar na qualidade da energia e até mesmo no bom funcionamento de diversos aparelhos conectados a aquela rede, além de que pode gerar até mesmo falhas e desligamentos em virtude da magnitude da queda de tensão.

Palavras-Chave – Motor; Gerador; Tensão; Partida; Oscilações; Qualidade.

COMPUTATIONAL ANALYSIS OF THE EFFECTS ON INDUSTRIAL PLANTS OF STARTING THREE-PHASE INDUCTION MOTORS

Abstract - This paper describes a study in the voltage drop caused by engine starting in industrial plants and the possible problems caused in the grid, that can impact the power quality and the proper functioning of other devices that are connected to that grid. In addition, it can generate failures and shutdowns due to the magnitude of the voltage drop

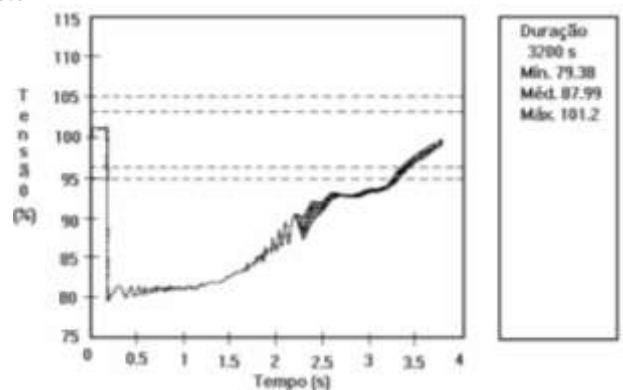
Keywords – Engine; Generator; Voltage; Starting; Oscillations; Quality.

I. INTRODUÇÃO

Atualmente as principais máquinas utilizadas em grandes plantas industriais são os Motores de Indução Trifásicos (MIT), máquina essa que é capaz de transformar energia elétrica em energia mecânica, sendo esse motor alimentado por um sistema trifásico com tensões defasadas em 120°.

Entretanto, durante o momento de partida dos motores com partida direta, é solicitado da rede por essa máquina uma corrente de partida que pode ser da magnitude de 6 a 10 vezes, o valor em que foi projetado para operar continuamente, assim como se pode ver no gráfico da Figura 1. Dado esse aumento expressivo de corrente, ocorre uma queda de tensão demonstrada pela Figura 1, sendo essa queda de tensão com um valor muito superior às condições nominais durante certo período de tempo.

Figura 1: Afundamento temporário de tensão devido a partida de motor



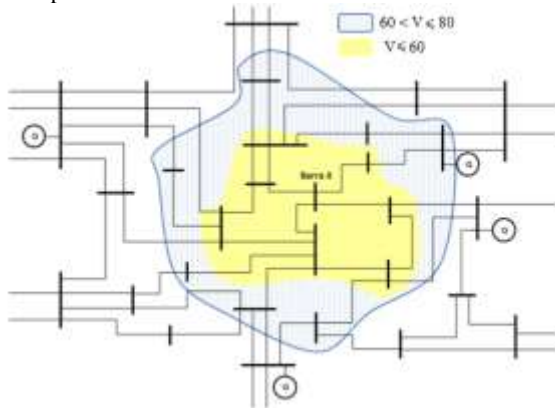
Fonte: Aula 06 - Profs. Heverton Augusto Pereira³

Tendo em vista essa situação, no presente artigo será feita uma análise que leva em consideração uma situação atípica de uma planta industrial, onde está sendo considerado uma falha ou algum outro fator que impossibilite a utilização de algum método de suavização de partida, situação essa que pode ocorrer a qualquer instante, sem um estudo prévio se torna impossível definir os impactos da partida de um motor de grande magnitude.

Dessa maneira, será considerado o pior dos casos de partida que é a partida direta, sendo ela a responsável pelos maiores aumentos de corrente e, conseqüentemente, por uma queda de tensão muito superior às condições nominais durante certo período.

Durante as análises serão determinados os afundamentos de tensões e quais os possíveis problemas que poderiam prejudicar quanto à operação das cargas e componentes da instalação. Diante dessa conjuntura, é possível definir a área de vulnerabilidade da indústria, sendo delineado, a exemplo da Figura 2, onde se encontram as áreas que cada carga fica sujeita a determinados afundamentos de tensão com determinada magnitude.

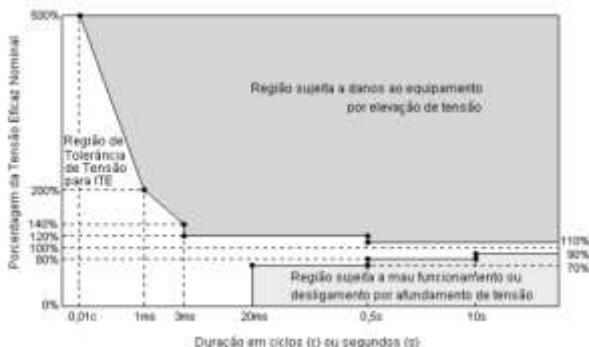
Figura 2: Análise dos barramentos afetados pela queda de tensão durante a partida do motor



Fonte: Trabalho de conclusão de curso para obtenção de mestrado, Jules Renato, Figura 2.22⁴

De posse de todos esses resultados, deve ser realizada a análise de suportabilidade de equipamentos eletrônicos, com base na norma CBEMA/ITIC ou simplesmente ITIC (*Information Technology Industry Council*), representado pela Figura 3, curva essa que foi desenvolvida para ser aplicada a equipamentos eletrônicos e computadores relacionados à tecnologia da informação (TI). Essa curva passou a ser uma referência para verificação do nível de vulnerabilidade de equipamentos.

Figura 3: Curva ITIC para duração de sub e sobretensões. Envelope de tolerância de tensão típico



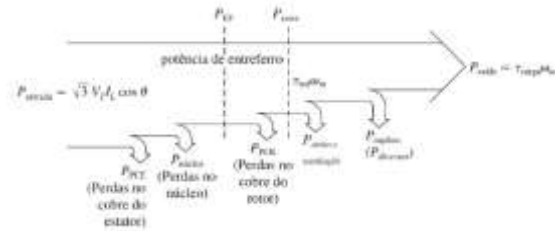
Fonte: 1DSE 9 – FEEC - UNICAMP, Figura 7.4.b⁵

A partir de todos os dados de cada elemento da rede será parametrizado a rede para gerar um modelo para simulações no programa de código aberto PSP-UFU (Plataforma de Sistemas de Potência da Universidade Federal de Uberlândia)

II. PARAMETRIZAÇÃO DA REDE

Para parametrizar uma indústria cujos motores utilizados são motores de indução trifásico, e ser possível determinar a corrente solicitada da rede durante a partida, deve se levar em consideração a corrente conforme Figura 4, sendo que a partir dos dados de carga será possível determinar os valores de potência de saída do motor e conseqüentemente chegar aos valores de potência de entrada. Que são os valores que de fato serão importantes para a simulação.

Figura 4: Diagrama do fluxo de potência do motor



Fonte: CHAPMAN, Figura 6.13⁶

A. Análise teórica do motor

Para se determinar a corrente de partida de motores em operação em plantas industriais, deve-se primeiramente o valor de potência de saída, que é o valor solicitado pela carga. Com esse valor é necessário consultar no modelo de fabricante⁷ as informações básicas dos motores para se fazer possível analisar os dados e chegar nos valores de corrente de partida conforme equação (1):

$$P_{in} = \frac{P_{out}}{fp \times \eta} \quad (1)$$

Onde:

- P_{in} - Potência de entrada
- P_{out} - Potência de saída
- fp - Fator de potência
- η - Rendimento

Com o valor de potência de entrada determinado se faz possível encontrar os valores de corrente nominal do motor, com mais uma consulta a tabela do fabricante do motor é possível determinar os outros parâmetros equação (2), apresentada a seguir, e de fato determinar a corrente nominal do motor:

$$P_{in} = \sqrt{3} \times V_t \times I_n \times \cos \varphi \quad (2)$$

Onde:

- V_t - Tensão de alimentação
- I_n - Corrente nominal

Definido o valor da corrente nominal é realizada a consulta do valor definido em catálogo como I_p/I_n e assim definido o valor de corrente de partida como se pode ver na fórmula a seguir:

$$I_p = I_n \times \left(\frac{I_p}{I_n} \right) \quad (3)$$

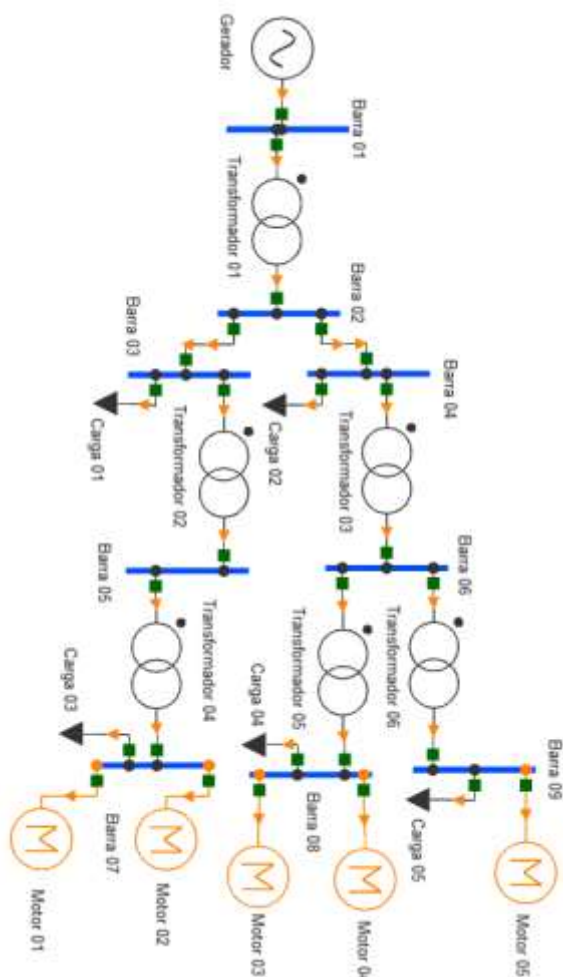
Onde:

- I_p - Corrente de partida
- I_p/I_n - Constante encontrada nos dados de fabricante

B. Modelagem dos elementos computacionais

Para simular todos os dados, foi parametrizado cada um dos elementos do diagrama da Figura 5, onde cada detalhe de cada um dos elementos de rede foi definido nos tópicos a seguir.

Figura 5: Modelo de rede utilizado para as simulações



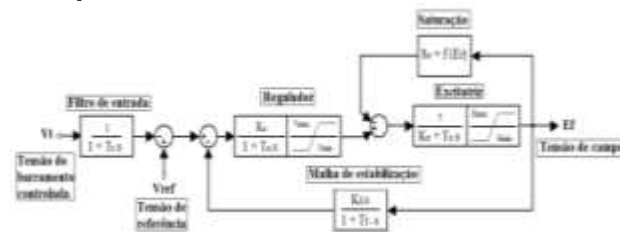
Motor	1	2	3	4	5
Potência (MVA)	4,32	13,05	10,04	13,05	0,97
Potência (MW)	3,5173	9,9150	5,5095	9,9222	0,6547
Inércia (s)	0,86	0,45	1,71	0,45	3,50
r1 (PU)	0,0062	0,0081	0,0049	0,0081	0,0120
x1 (PU)	0,166	0,171	0,114	0,171	0,120
Xm (PU)	3,79	2,13	3,57	2,13	4,90
r2 (PU)	0,106	0,102	0,08	0,12	0,08
x2 (PU)	0,1660	0,1860	0,0818	0,1860	0,1200

Fonte: Embasado na Tabela 5, Dissertação Thyago Fazan¹⁰

2) Gerador

Para o modelo do gerador se manter operando dentro de um determinado ponto, foi inserido um controle de excitação sendo ele um regulador automático de tensão, do inglês *Automatic Voltage Regulator – AVR*, assim ele controla a saída da excitatriz para que a potência reativa seja alterada da forma desejada, para minimizar as oscilações de tensões durante os períodos transitórios no intuito de melhorar a estabilidade global do sistema, conforme se pode ver na Figura 7.

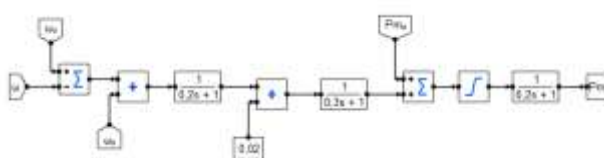
Figura 7: Modelo de AVR utilizado no gerador para realizar a simulação



Fonte: Dissertação de mestrado, Larissa Peres, Figura 3.5⁹

Para se ter um controle maior do gerador, também foi utilizado outro regulador de velocidade, que engloba outros valores além da tensão e da malha de controle da máquina, sendo inserido e monitorado os valores de rotação do gerador e também a malha de controle primária de velocidade, conforme Figura 8.

Figura 8: Regulador de tensão utilizado na simulação



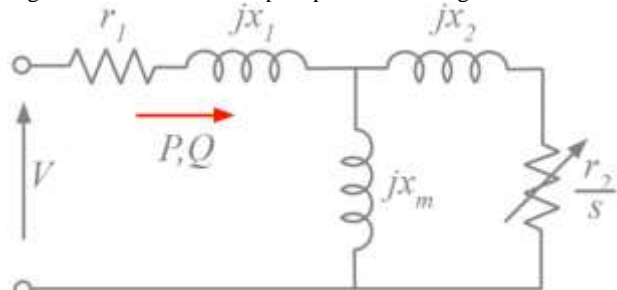
Com todos os controles definidos foi utilizado um gerador de 128 MVA, 3600 RPM e 2,3516 segundos de inércia. Além desses dados os outros parâmetros utilizados para realizar a simulação são os encontrados na Tabela 2.

Tabela 2: Dados utilizados na simulação

1) Motores

No software, os motores contemplam estudos de fluxo de carga e de estabilidade, sendo o modelo estático expresso pela Figura 6, modelo esse o utilizado para a entrada de dados e todos os parâmetros de cada motor sendo expressos na Tabela 1. Esses parâmetros serão os responsáveis por definir as oscilações do período transitório e sub transitório do motor, que são o alvo de análise do artigo.

Figura 6: Modelo utilizado para parametrizar o gerador.



Fonte: Manual do usuário PSP⁸

Tabela 1: Dados motores

X'd (PU)	X'q (PU)	Xd (PU)	Xq (PU)	T'd0 (PU)	T'q0 (PU)
0,1813	0,2500	1,3125	1,2578	5,8900	0,6000

Fonte: Dissertação Thyago Fazan¹⁰

3) Outros dados

Os Dados utilizados para linhas de transmissão e cargas são respectivamente a Tabela 3 e 4

Tabela 3: Dados de linha de transmissão utilizados na simulação

Barra Inicial	Barra Final	Resistência Série (PU)	Reatância Série (PU)	Susceptância Shunt (PU)
1	2	-	0,0576	-
2	3	0,010	0,0850	0,088
2	4	0,017	0,0920	0,079
3	5	-	0,0500	-
4	6	-	0,0500	-
5	7	-	0,0500	-
6	8	-	0,0500	-
6	9	-	0,0500	-

Fonte: Dissertação Thyago Fazan¹⁰

Tabela 4: Dados de Cargas utilizados na simulação

Carga	Potência (MW)	Potência (MVar)
1	40,00	15,0
2	35,00	7,5
3	15,00	8,0
4	18,00	10,0
5	0,85	0,3

Fonte: Dissertação Thyago Fazan¹⁰

III. RESULTADOS DE SIMULAÇÕES

Para compreender de fato o impacto das partidas dos motores será analisado duas situações diferentes, a primeira consiste na partida simultânea dos motores da barra 07 e após os motores da barra 08 e 09 e para uma segunda situação um caso mais crítico onde todos os motores partirão simultaneamente, e em cada uma das situações será analisado os efeitos para a rede.

A. 1ª situação

A partir da situação descrita, foi inserido um chaveamento para os motores da barra 07 no tempo de 1 segundo, após 10 segundos foi inserido um chaveamento para os motores das barras 08 e 09 sendo obtido os seguintes resultados de tensão em pu para a barra 2, sendo a Figura 9 apresentado os efeitos de partida dos motores da barra 07 e a Figura 10 os efeitos da partida dos motores das barras 08 e 09.

Figura 9: Efeitos na barra 02 – Partida de motores barra 7.

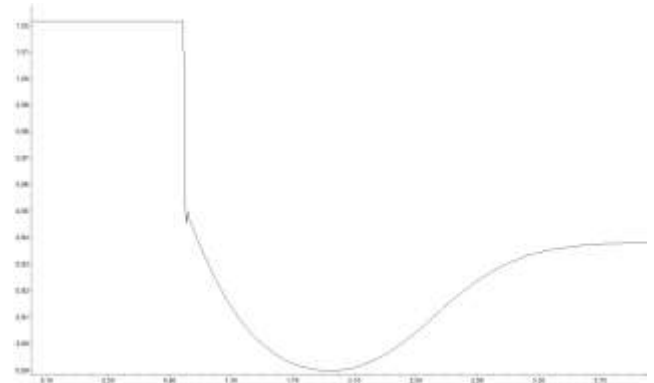
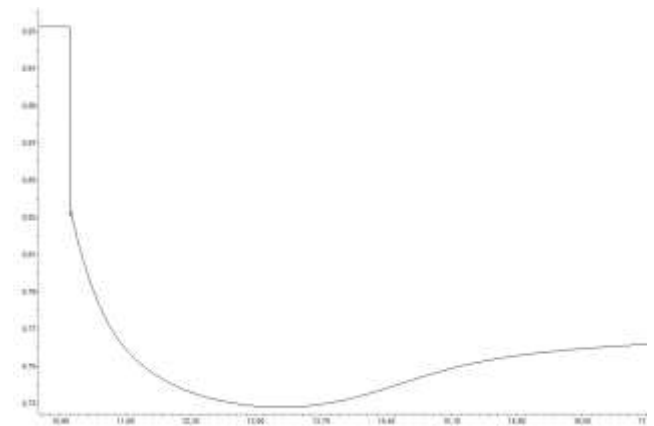


Figura 10: Efeitos na barra 02 - Partida de motores barras 8 e 9.



Para a tensão na barra 02, tem-se uma queda de tensão muito expressiva durante a partida dos conjuntos de motores, sendo o momento de queda de tensão mais expressiva nessa barra o instante em que ocorre o acionamento dos motores da barra 08 e 09 com o motor da barra 07 já ligado.

Sendo verificado valores de tensões abaixo de 0,77 pu na Figura 9, comparando esse valor com a Figura 3, nota-se que esse valor de tensão apresentará mal funcionamento dos equipamentos eletrônicos associados ao sistema, pois perdura por mais de 20ms.

Com relação ao regime permanente de tensão do sistema foi constatado valores inferiores aos consideráveis aceitáveis pelo PRODIST se fazendo necessário acrescentar capacitores a planta para reajustar a tensão.

Analisando agora diretamente as barras que estavam ligadas aos motores é possível perceber que essas barras sofreram um impacto muito maior, chegando a registrar resultados de cerca de 0,63 pu que como descrito em [1], essa magnitude apresenta outras consequências aos motores indução, pois os motores operando a plena carga ou em sobrecarga deixariam de operar. Com isso temos duas zonas diferentes, a primeira Figura 13 apresentando o efeito da primeira partida e a Figura 12 apresentando o efeito da segunda.

Figura 11: Efeitos da partida dos motores da barra 7

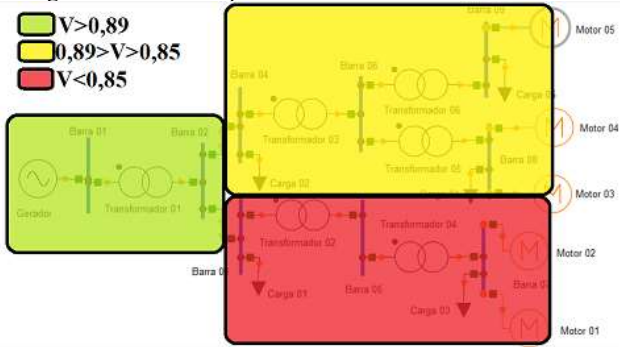
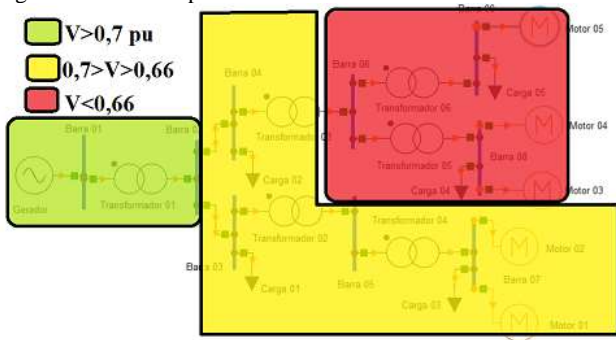


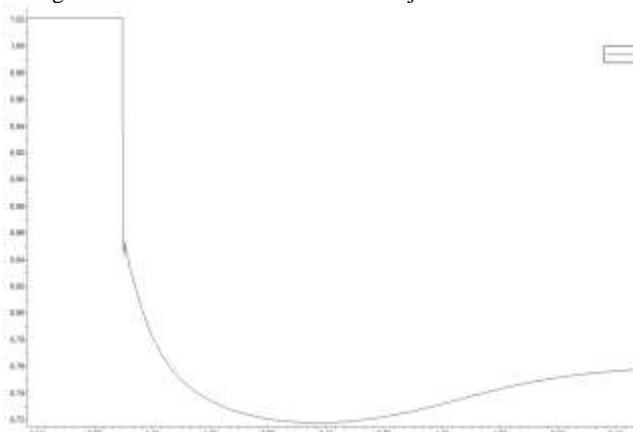
Figura 12: Efeito da partida dos motores das barras 8 e 9



B. 2ª situação

Para a segunda situação foi analisado uma situação mais crítica onde todos os motores estão partindo ao mesmo tempo e assim, analisado o efeito na barra 02, como é visto na Figura 13.

Figura 13: Partida de todos os motores juntos



Para essa análise notou-se um problema a mais para a operação da planta, pois durante a partida de todos os motores ao mesmo tempo, ocorreram registros de valores de aproximadamente 0,72 pu, sendo esses valores muito críticos para os motores de indução pois conforme [1], quando a tensão atinge níveis de 0,76 pu os motores que estão em 115% da sua potência nominal deixam de operar, além de que esses valores estão muito próximos do marco de 0,71 pu onde os motores a plena carga deixam de operar.

Considerando ainda a duração superior a 20ms desse evento temos ainda que conforme a Figura 3, outro agravante,

pois as cargas eletrônicas também apresentariam mal funcionamento ou desligariam.

IV. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Analisando os resultados nas duas situações foram encontrados problemas como a tensão muito baixa após o acionamento dos motores em análise se enquadrando em tensões críticas segundo o Módulo 08 do PRODIST [11] como também tensões críticas durante o próprio acionamento dos motores, tensões essas que como já analisado pode ocasionar desde mal funcionamento a desligamento de certas cargas, sendo esse um ponto muito crítico para uma planta industrial dado o crescente desenvolvimento da eletrônica de potência.

A. Inserção de banco de capacitores

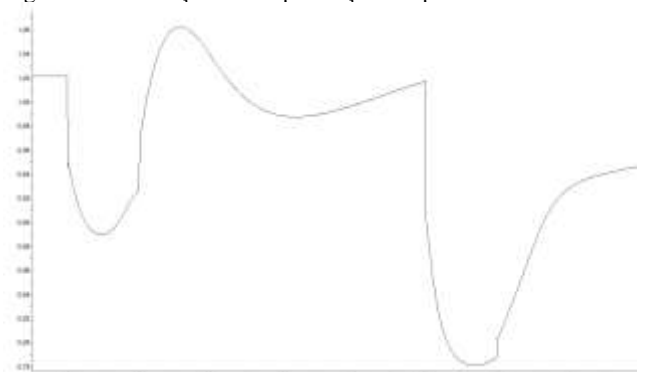
Conforme citado anteriormente esse planta industrial se fez necessário inserir 3 bancos de capacitores com base nos valores de potência reativa demonstrado pelo software de simulação, sendo esses dados os responsáveis por determinar os capacitores inseridos em cada barra, dessa maneira ficou definido os seguintes capacitores instalados em paralelo com cada barra, um de 6 Mvar na barra 09, um de 10 Mvar na barra 8 e um de 30 Mvar na barra 7, sendo todos eles chaveados dois segundos após a partida dos respectivos motores de cada barra

Essa atualização se fez necessária pois analisando as tensões notou-se valores muito inferiores aos valores adequados segundo o módulo 08 do PRODIST.

B. Medidas em casos de partida direta

A partir dessa série de simulações nota-se a necessidade de se definir um protocolo de operação para uma planta durante uma situação de urgência, pois conforme Figura 14 onde se tem a 1ª situação com a inserção dos capacitores, ficou evidenciado que mesmo em condições de tensão aceitável, existe um grande afundamento de tensão em virtude da partida direta, pois é notado valores de tensão de 0,89 pu para a primeira sequência de partida e de 0,78 pu para a segunda sequência de partida, valores esse que dado o tempo do evento podem ocasionar desligamento e mal funcionamento de equipamentos eletrônicos conforme Figura 3.

Figura 14: 1ª situação com a presença de capacitores



Esse protocolo de partida se faz necessário, pois em situações de motores de grande magnitude, pode ser

necessário desligar certas cargas para que não sofram efeitos dos afundamentos de tensão devido a corrente de partida, além do mais se faz necessário analisar os dispositivos de eletrônica de potência mais sensíveis, para que não haja perdas financeiras ou acidentes devido à má operação desses dispositivos.

Sendo necessário assim analisar e definir como os exemplos de mapas de calores desse artigo, os mapas de calores para as plantas industriais, onde em situações de urgência o engenheiro responsável tenha informação suficiente para tomar a decisão mais assertiva com base nas informações disponíveis

V. CONCLUSÕES

Com todos esses dados descritos, fica evidente a necessidade de se possuir um detalhamento prévio de uma planta industrial, para definir um procedimento de emergência para partir os motores diretamente e ainda não danificar ou gerar mal funcionamento dos dispositivos da rede dado os valores expressivos de afundamentos de tensão encontrado na partida de motores com grande potência.

Diante dessa situação, o detalhamento será capaz de demonstrar a melhor maneira de realizar tal atividade, seja esse método desligando as cargas mais sensíveis ou até mesmo optando pela manutenção do dispositivo de partida suavizada, para que assim seja possível evitar situações em que a partida cause desligamento de setores não previstos pela magnitude do afundamento de tensão ou falhas catastróficas aos equipamentos.

REFERÊNCIAS

- [1] FILHO, João Mamede. Instalações elétricas industriais. 9ª edição. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2017. 1288 p.
- [2] ELÉTRICOS, RH Materiais. Partida de motor: conheça os tipos existentes. [S. l.], 16 abr. 2020. Disponível em: <https://blog.rhmateriaiseletricos.com.br/partida-de-motor-conheca-os-tipos-existentis/>. Acesso em: 21 set. 2022.
- [3] AULA 06 – Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD). Disponível em: https://www.gesep.ufv.br/wp-content/uploads/Aula6_ELT428-Varia%20a7%20b5es-de-Tens%20a3o-de-Curta-Dura%20a7%20a3o.pdf. Acesso em: 6 set. 2022.
- [4] UMA CONTRIBUIÇÃO PARA DETERMINAÇÃO DE VALORES DE REFERÊNCIA PARA AS VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Mestrado em Engenharia Elétrica) - UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO, [S. l.], 2015.
- [5] AVALIAÇÃO da Qualidade da Energia Elétrica. [S. l.], 17 fev. 2020. Disponível em: <https://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/qualidade/a7.pdf>. Acesso em: 9 set. 2022.
- [6] CHAPMAN, Stephen J. Fundamentos de Máquinas Elétricas. Ed. São Paulo: AMGH 2013.
- [7] MOTORES Trifásicos linha W21. Disponível em: [https://essel.com.br/cursos/material/02/motores/Catalogo](https://essel.com.br/cursos/material/02/motores/Catalogo_Motor_Trifasico_IP55-WEG.pdf)
- [8] OLIVEIRA, Thales Lima. Desenvolvimento de um Programa Computacional Livre, Gráfico, e Multiplataforma para Analisar sistemas Elétricos de Potência em Regime Permanente e Dinâmico. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia.
- [9] PERES, Larissa Marques. Estudos do Desempenho Dinâmico de Geradores Síncronos de Produtores Independentes em Sistemas de Geração Distribuída via ATPDraw. 2019. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia.
- [10] NASCIMENTO, Thyago Fazan. Afundamento de Tensão de Geradores Síncronos Devido À Partida de Motores de Indução Trifásicos, Usando o Software PSP-UFU. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Instituto Federal de Goiás, [S. l.], 2022.
- [11] ANEEL, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Nacional – PRODIST. Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/modulo-8>. Acesso em 16 set. 2022.