

APLICATIVO COMPUTACIONAL PARA CÁLCULO DE CURTO-CIRCUITO E ESTUDOS DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

Gustavo Gonçalves dos Santos, Andréia Crico dos Santos, Thales Lima Oliveira, Carlos Eduardo Tavares
Núcleo de Qualidade de Energia Elétrica - NQEE
Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Uberlândia – MG
g.gustavo.santos@gmail.com, andreia.crico@gmail.com, thaleslima.ufu@gmail.com, carlosetavares@yahoo.com.br

Resumo – No contexto da Qualidade de Energia Elétrica, este trabalho realiza um estudo sobre as variações de tensão de curta duração (VTCD's), principal fenômeno responsável pela interrupção parcial ou total de processos produtivos em indústrias. É apresentado um aplicativo computacional desenvolvido com o intuito de detectar áreas de vulnerabilidades, que são regiões onde curtos-circuitos ocasionam afundamentos abaixo de limites críticos, o que pode resultar em desligamentos de cargas sensíveis. Para alcançar esse objetivo, o aplicativo é capaz de simular todos os tipos de curtos-circuitos, em diferentes localidades dos sistemas elétricos analisados, levando em consideração características importantes, como a ligação e o defasamento de transformadores. Por fim, é apresentado um estudo de caso a partir do programa criado, sendo que seus resultados foram considerados promissores quando confrontados com aqueles fornecidos por um software comercial.

Palavras-Chave – Afundamentos de tensão, áreas de vulnerabilidade, Matlab, método do curto circuito deslizante.

COMPUTER PROGRAM FOR SHORT CIRCUIT CALCULATIONS AND VOLTAGES SAGS STUDIES

Abstract - Based on the Power Quality context, this paper conducting a study about voltage sags, main phenomenon responsible for partial or total interruption of production process in industries. A computer program is present developing with the goal of detect vulnerable area, regions where short circuit can cause sags before critics limits, that results in termination of sensitive loads. To achieve this goal, the program can simulate all types of short circuit, in locals different of the analyzed electric system, considering relevant characteristics, like the transformers lag. Finally, a case study is illustration by the program developed, wherein the results were considerate promising when faced with those provided by commercial software.

Keywords – Voltage sags, vulnerable areas, Matlab, short circuit sliding method.

NOMENCLATURA

I_f	Corrente de falta.
E_{TH}	Tensão equivalente (de Thévenin).
Z_{TH}	Impedância equivalente (de Thévenin).
I_a	Corrente na fase A.
I_{a0}	Componente de sequência zero da corrente I_a .
I_{a1}	Componente de sequência positiva da corrente I_a .
I_{a2}	Componente de sequência negativa da corrente I_a .
Z_f	Impedância de falta.
E_{a1}	Tensão pré-falta (condição de sistema equilibrado).

I. INTRODUÇÃO

O termo “Qualidade de Energia Elétrica (QEE)” está relacionado ao modo com que um sistema lida com o conjunto de anomalias que se manifestam ao longo de sua extensão [1]. Tais distúrbios caracterizam-se como desvios que ocorrem na forma de onda, na magnitude e frequência de sinais elétricos de tensão e corrente, tendo como principal consequência a possibilidade de funcionamento inadequado e até mesmo o dano de equipamentos elétricos.

Dentro do contexto da QEE, merecem destaque os estudos relacionados às Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD's), as quais são especificadas em termos da duração e da amplitude de tensão (valor eficaz) em relação à tensão eficaz nominal [2,3]. Suas principais causas são: chaveamentos de cargas pesadas, partidas de grandes motores e curtos-circuitos em qualquer ponto de fornecimento de energia, entre outras razões [1-3].

De modo especial, as indústrias podem ter seus desempenhos significativamente prejudicados pelos afundamentos de tensão, os quais podem causar danos à operação de equipamentos (perdas de sincronismo, perda de torque, etc.) ou, até mesmo, a suspensão do funcionamento de importantes cadeias produtivas. Fábricas com processos contínuos possuem, fundamentalmente, a característica de manterem as instalações com operação ininterrupta e, assim, apresentam uma relação custo por tempo substancial no processo de produção. Uma vez que esta é rompida, as perdas de produto bem como a queda na produtividade podem criar uma perda financeira muito significativa, sem contar ainda os custos adicionais que podem vir de eventuais serviços de manutenção e reparos em equipamentos danificados devido aos efeitos dos afundamentos [1, 4].

Pode-se citar que, estatisticamente, um dos grupos de empresas que mais são afetados pelos distúrbios de tensão é a indústria têxtil. Geralmente estas fábricas trabalham com



XIII CEEL - ISSN 2178-8308
12 a 16 de Outubro de 2015
Universidade Federal de Uberlândia - UFU
Uberlândia - Minas Gerais - Brasil

extensos períodos de produção contínua e não é possível recuperar os prejuízos advindos de paradas devidas aos afundamentos de tensão. Estima-se que, neste tipo de indústria, o custo de uma interrupção momentânea é de no mínimo R\$ 4,20 por kW de demanda podendo chegar a R\$ 8,52 por kW de demanda [4].

Ainda buscando uma forma de retratar, de maneira mais prática, os efeitos do assunto em pauta, pode-se citar que quando uma lâmpada de descarga de sódio encontra-se no término de sua vida útil, uma variação da ordem de apenas 2% de sua tensão nominal já pode ser suficiente para apagá-la. Quando nova, é preciso uma variação de cerca de 45% de sua tensão nominal para que ela tenha o seu funcionamento suspenso [3].

Com base neste contexto, este trabalho apresenta um aplicativo computacional capaz de realizar o cálculo de diferentes tipos de curtos-circuitos e, posteriormente, detectar áreas de vulnerabilidade dos sistemas elétricos. Na ocorrência de curtos-circuitos, estas áreas de vulnerabilidade são capazes de demarcar as regiões onde ocorrerão afundamentos de tensão abaixo de limites críticos que possam resultar em desligamentos de cargas sensíveis.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No Brasil, o módulo 8 do documento Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no sistema Elétrico Nacional (PRODIST / ANEEL) estabelece os procedimentos relativos a QEE. Nesse módulo, conceituam-se e classificam-se os diversos tipos de VTCD's quanto à magnitude de tensão do evento (interrupção, afundamentos ou elevação) e pela duração do fenômeno (momentânea ou temporária) conforme ilustra a tabela I [5].

Tabela I – Classificação das Variações de Tensão de Curta Duração

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 pu
	Afundamento Momentâneo de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior a três segundos	Superior ou igual a 0,1 pu e inferior a 0,9 pu
	Elevação Momentânea de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior a três segundos	Superior a 1,1 pu
Variação Temporária de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Inferior a 0,1 pu
	Afundamento Temporário de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior ou igual a 0,1 pu e inferior a 0,9 pu
	Elevação Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior a 1,1 pu

De fato, uma das principais causas da ocorrência de VTCD's está associada ao acontecimento de curtos-circuitos. Um curto-circuito pode ser definido como uma conexão intencional ou acidental, em geral de baixa impedância, entre dois ou mais pontos, que normalmente estão em diferentes potenciais elétricos. Como consequência, têm-se níveis de corrente muito elevados e tensões quase nulas, configurando, assim, o que se denomina de afundamentos de tensão.

Diante desse contexto, o presente trabalho terá como foco os cálculos de afundamentos de tensão para diferentes tipos de faltas em um ponto do sistema e seus efeitos nos demais barramentos. A origem dos defeitos acontecem em maior parte na rede de distribuição. Condições do tempo, galhos de árvores, contato de animais, falhas na isolação ou atividade humana podem causar faltas na rede de distribuição. Em geral, um pequeno número de consumidores que estiver próximo à falta irá sentir um severo afundamento de tensão seguido de uma interrupção, quando irá atuar o religador da concessionária. A grande maioria, conectada em outros alimentadores, irá sentir o afundamento de acordo com a distância entre a falta e os consumidores. Os transformadores serão os principais responsáveis pela limitação do curto [6].

A caracterização de um curto-circuito pode ser realizada de várias formas, destacando-se os seguintes aspectos:

- Tipo de curto: trifásico (3ϕ), fase-terra (ϕ -terra), fase-fase (ϕ - ϕ) e fase-fase-terra (ϕ - ϕ -terra).
- Duração: auto extingüível, transitório e estacionário.
- Origem: sobretensões mecânicas, falha de isolamento interior ou exterior de equipamentos, entre outras possibilidades [5].

Os curtos podem ser classificados, ainda, pela presença ou não da impedância de falta, ou seja, uma impedância situada entre os pontos de potenciais diferentes que sofrerão o curto-circuito [3]. Embora ela sempre exista nos curtos, nem sempre se dispõe de valores típicos e seu cálculo com precisão é dificultado por uma série de motivos. Assim sendo, por precaução, é comum considerar seu valor como sendo zero, chama-se, então, o curto-circuito de franco ou sólido.

As propagações dos afundamentos de tensão na rede elétrica mudam suas características não apenas devido à impedância de transferência entre a origem dos afundamentos e a carga, mas também, devido ao tipo de conexão de transformadores através dos quais se propagam e da conexão da própria carga [7]. A Figura 1 mostra as tensões no secundário de um transformador devido a uma falta fase-terra no primário [8]. Observa-se pela figura que uma falta fase-terra do lado de delta será vista do lado de estrela (aterrada ou não) como uma falta fase-fase, onde uma das fases inclusive continuará com tensão igual a 1 pu. Isto ocorre porque o lado de delta não enxergará um curto fase-terra, pois não há conexão com a terra. Por outro lado, um curto-circuito fase-terra visto no lado de estrela aterrado do primário de um transformador será visto como uma falta fase-fase no lado de delta do secundário.

Transformer connection (primary/secondary)	Phase-to-phase			Phase-to-neutral			Phasor diagram
	$\frac{V_{ab}}{V_{ca}}$	$\frac{V_{bc}}{V_{ca}}$	$\frac{V_{ca}}{V_{ca}}$	$\frac{V_{an}}{V_{ca}}$	$\frac{V_{bn}}{V_{ca}}$	$\frac{V_{cn}}{V_{ca}}$	
	0.58	1.00	0.58	0.00	1.00	1.00	
	0.58	1.00	0.58	0.33	0.88	0.88	
	0.33	0.88	0.88	---	---	---	
	0.88	0.88	0.33	0.58	1.00	0.58	

Fig. 1. Tensões no secundário do transformador devido a uma falta fase-terra no primário

Não se pode, a priori, determinar quais dos quatro tipos de curtos-circuitos são mais severos, entretanto, de um modo geral, os curtos-circuitos trifásicos (simétricos) apresentam menor impedância equivalente e, por conseguinte, resultam em maiores níveis de corrente. Contudo, quanto à ocorrência dos tipos de curto-circuito, pela própria configuração, os curtos-circuitos trifásicos são mais difíceis de acontecer, conforme mostra a Figura 2 [9].

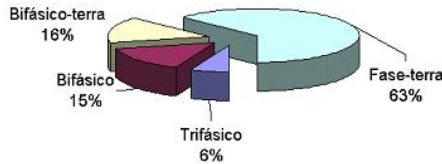


Fig. 2. Percentuais de ocorrência dos tipos de curto-circuito

A seguir é descrito cada tipo de curto-circuito, bem como, suas respectivas equações para a condição de falta em um ponto do sistema elétrico.

A. Curto-Circuito Trifásico

Considera-se como um curto que envolva as 3 fases. O sistema antes e após o curto é equilibrado (tensões e correntes são iguais nas 3 fases) e, por isso, é chamado de curto-circuito simétrico. A corrente de falta (corrente de curto-circuito) é definida por (1).

$$I_f = \frac{E_{TH}}{Z_{TH}} \approx \frac{1}{Z_{TH}} \quad (1)$$

B. Curto-Circuito Fase-Terra

Considera-se como um curto-circuito que aconteça entre uma fase do sistema e o terra. O diagrama equivalente para a condição desse tipo de falta é ilustrado na Figura 3 [9].

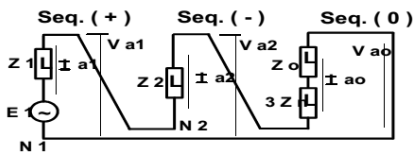


Fig. 3. Circuito equivalente para a falta fase-terra

Em (2) são definidos os valores das componentes simétricas da corrente da fase A, para um curto entre esta fase e a terra.

$$\frac{I_a}{3} = I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} = \frac{\dot{E}_{a1}}{\dot{Z}_0 + \dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \dot{Z}_f} \quad (2)$$

C. Curto-Circuito Fase-Fase

Considera-se como um curto-circuito que aconteça entre duas fases do sistema. O diagrama equivalente para a condição desse tipo de falta é mostrado na Figura 4 [9].

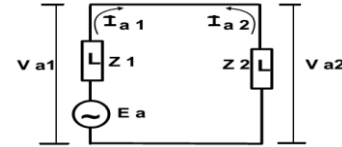


Fig. 4. Circuito equivalente para a falta fase-fase

Em (3) são definidas as componentes simétricas da corrente da fase A, para um curto entre as fases B e C. Neste caso, a corrente na fase é nula e pode ser obtida a partir da soma das componentes simétricas de sequência positiva e negativa. Nota-se que não há caminho para a terra no curto-circuito fase-fase e, por isso, não existe corrente de sequência zero.

$$I_{a1} = -I_{a2} = \frac{\dot{E}_{a1}}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \dot{Z}_f} \quad (3)$$

D. Curto-Circuito Fase-Fase-Terra

Considera-se um curto-circuito que aconteça entre duas fases do sistema e o terra. O diagrama equivalente para a condição desse tipo de falta é ilustrado na Figura 5 [9].

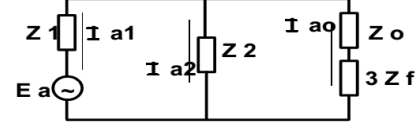


Fig. 5. Esquema curto-circuito fase-fase-terra

Para um curto entre as fases B e C e o terra, as componentes simétricas de sequência positiva, negativa e zero da corrente da fase A são definidas por (4), (5) e (6), respectivamente.

$$I_{a1} = \frac{-(\dot{Z}_0 + \dot{Z}_2 + 3\dot{Z}_f)}{\dot{Z}_1\dot{Z}_2 + (\dot{Z}_0 + 3\dot{Z}_f)(\dot{Z}_1\dot{Z}_2)} \dot{E}_{a1} \quad (4)$$

$$I_{a2} = \frac{-(\dot{Z}_0 + 3\dot{Z}_f)}{\dot{Z}_1\dot{Z}_2 + (\dot{Z}_0 + 3\dot{Z}_f)(\dot{Z}_1\dot{Z}_2)} \dot{E}_{a1} \quad (5)$$

$$I_{a0} = \frac{-\dot{Z}_2}{\dot{Z}_1\dot{Z}_2 + (\dot{Z}_0 + 3\dot{Z}_f)(\dot{Z}_1\dot{Z}_2)} \dot{E}_{a1} \quad (6)$$

III. O APLICATIVO DESENVOLVIDO

Foi desenvolvido um programa em arquivo .m (Matlab) para cálculo de diferentes tipos de curtos-circuitos. Primeiramente, o programa recebe o número de barras do

sistema. Em segundo lugar, é criada a matriz de admitâncias de seqüências positiva, negativa e zero, sendo que cada elemento dessa matriz é inicializado com valor 0. A tensão pré-falta usada no cálculo do curto é sempre considerada igual a 1 pu.

Após esse processo, são recebidos os dados da diagonal principal dessas matrizes que correspondem aos componentes conectados nas barras que terão influência sobre o curto (em geral, geradores e motores). Os dados que compõem os elementos fora da diagonal principal dessas matrizes (geralmente transformadores e linhas de transmissão/distribuição que estão conectados entre barras) são recebidos e armazenados em seguida. Em especial, para o caso dos transformadores, essas matrizes são modificadas, isso porque, considera-se a defasagem desses equipamentos para a construção das matrizes de seqüência positiva e negativa, enquanto a conexão dos mesmos influencia a matriz de seqüência zero.

Posteriormente a formação das matrizes de admitâncias, essas são invertidas para o cálculo do curto-circuito. É, então, pedido ao usuário que informe qual o tipo de curto-circuito que se deseja simular (trifásico, fase-terra, fase-fase ou fase-fase-terra). De acordo com o dado fornecido, pelas fórmulas desenvolvidas para cálculo de cada tipo de curto-circuito, é obtida a corrente na barra da falta. Com essa corrente, calcula-se a tensão na barra do curto e fora desta.

Ao final do cálculo do curto para cada barra, armazenam-se os resultados de tensão e corrente numa matriz de resultados. É contado também o número de barras que tiveram tensão abaixo de 0,9 pu, de acordo com a barra em que aconteceu o curto. Depois do cálculo do curto-circuito, em todas as barras do sistema, é exibido para o usuário o número de barras vulneráveis (que ficam com tensão menor que 0,9 pu) a fenômenos de curto-circuito para cada caso. Todos esses dados são mostrados para as três fases (A, B e C).

IV. ESTUDO DE CASO

Com o programa desenvolvido em linguagem Matlab, fez-se um estudo de análise de curto-circuito do sistema elétrico de 5 barras mostrado na Figura 6. Para fins de validação do programa aqui desenvolvido, esse mesmo sistema foi simulado também no software Power World [10].

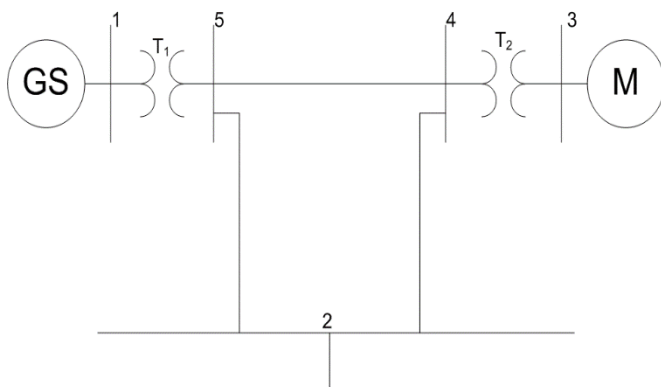


Fig. 6. Sistema Elétrico de 5 barras

A Tabela II mostra as impedâncias dos componentes desse sistema.

Tabela II – Impedância de seqüências positiva, negativa e zero dos componentes do sistema da Figura 2

Componente	Z_1	Z_2	Z_0
Gerador GS	j0,3 pu	j0,4 pu	j0,25 pu
Motor M	j0,3 pu	j0,4 pu	j0,25 pu
Transformador T_1	j0,08 pu	j0,08 pu	j0,12 pu
Transformador T_2	j0,04 pu	j0,04 pu	j0,06 pu
Linha de Transmissão entre as barras 5 e 2 (LT_{5-2})	0,018 + j0,20 pu	0,018 + j0,20 pu	j0,40 pu
Linha de Transmissão entre as barras 5 e 4 (LT_{5-4})	0,009 + j0,10 pu	0,009 + j0,10 pu	j0,40 pu
Linha de Transmissão entre as barras 2 e 4	0,036 + j0,40 pu	0,036 + j0,40 pu	j0,80 pu

A partir dos dados de impedância fornecidos, foram geradas as matrizes de admitâncias (Y_{bus}) pra as seqüências positiva, negativa e zero, por meio do aplicativo em destaque neste trabalho. Considerou-se, para tanto, o transformador T_1 com conexão Y_T-Y_T (estrela aterrado – estrela aterrado) e o transformador T_2 com conexão $Y_T-\Delta$ (estrela aterrado – delta), sendo o lado delta aquele conectado à barra 3.

A. Curto-Circuito Trifásico

Foram impostos curtos-circuitos trifásicos em todas as barras do sistema, sendo a simulação da falta em cada barra realizada separadamente, vez a vez. A Tabela III contém os valores da corrente de falta de acordo com a barra na qual ocorreu o curto. A corrente de falta foi maior para os curtos na barra 1 e na barra 3, que são as barras que contém, nesta ordem, gerador e motor, ambos contribuintes para o curto. Para o curto na barra 2, o valor da corrente de curto-circuito foi menor que nas demais barras, nota-se que não há elemento ativo conectado diretamente a esta barra.

Tabela III - Corrente de falta para o curto 3 ϕ

Barra Curto	Corrente de falta			
	Matlab		Power World	
	Módulo (p.u.)	Ângulo (°)	Módulo (p.u.)	Ângulo (°)
1	5,3104	-89,6755	5,31	-89,67
2	3,1655	-87,8041	3,165	-87,78
3	5,3104	-89,6755	5,31	-89,67
4	5,088	-89,6006	5,088	-89,6
5	4,98	-89,5117	4,98	-89,51

Para esse tipo de falta, independentemente da barra onde ocorre o curto-circuito, os níveis de tensão nas barras ficaram abaixo de 0,9 pu nas 3 fases. Esse resultado é esperado, uma vez que, em geral, os curtos-circuitos trifásicos resultam em maiores afundamentos de tensão.

B. Curto-Circuito Fase-Terra

Foi simulado um curto entre a fase A e a terra. De acordo com a Tabela IV, a corrente de falta foi maior para o curto na barra 4 e menor para o curto na barra 2. Vale lembrar, que a corrente de falta, neste caso, corresponde à corrente circulante na fase A da respectiva barra de curto.

Tabela IV - Corrente de falta para o curto ϕ_A -terra

Barra Curto	Matlab		Power World	
	Módulo (p.u.)	Ângulo (°)	Módulo (p.u.)	Ângulo (°)
1	5,2146	-89,7726	5,215	-89,77
2	2,9014	-88,6586	2,901	-88,64
3	4,4168	-89,8074	4,417	-89,81
4	6,0232	-89,673	6,023	-89,67
5	5,0496	-89,666	5,05	-89,67

Para esse tipo de curto, independentemente da barra de curto-circuito, as tensões nas barras na fase A tiveram valores menores que 0,9 pu. Os valores de tensão nas barras para as fases B e C foram maiores que 0,9 pu, ou seja, não houve afundamento de tensão nas fases sãs; algumas barras tiveram ainda níveis de tensão maior que 1 pu.

C. Curto-Circuito Fase-Fase

Foi simulado um curto entre a fase B e a fase C. De acordo com a Tabela V, a corrente de falta foi maior para o curto na barra 1 e na barra 3 e menor na barra 2. Comparados com os demais tipos de falta, os níveis de corrente de curto-circuito obtidos foram menores para esse tipo de defeito.

Tabela V - Corrente de falta para o curto ϕ_B - ϕ_C

Barra Curto	Matlab		Power World	
	Módulo (p.u.)	Ângulo (°)	Módulo (p.u.)	Ângulo (°)
1	4,0352	-179,6952	4,035	-179,69
2	2,5404	-177,9654	2,54	-177,94
3	4,0352	-179,6952	4,035	-179,69
4	3,9005	-179,6332	3,901	-179,63
5	3,8342	-179,5607	3,834	-179,56

Para esse tipo de curto, independente da sua localidade, nas fases envolvidas no curto (B e C), foram encontradas tensões menores que 0,9 pu, o que se configura como afundamentos de tensão. Em contrapartida, observa-se sobretensão (tensão maior que 1 pu) na fase A para todas as barras.

D. Curto-Circuito Fase-Fase-Terra

Foi simulado um curto entre as fases B e C e o terra. A Tabela VI mostra que a corrente de falta foi expressivamente maior para o curto na barra 4 (maior que 10 vezes o valor nominal) e, novamente, menor para o curto na barra 2. Observa-se que os níveis de corrente de curto-circuito foram altos quando comparados com os demais tipos de curto.

Tabela VI - Corrente de falta para o curto ϕ_B - ϕ_C -terra

Barra Curto	Matlab		Power World	
	Módulo (p.u.)	Ângulo (°)	Módulo (p.u.)	Ângulo (°)
1	6,6879	90,1452	6,688	90,15
2	3,0853	90,8074	3,085	90,82
3	4,734	90,1072	4,734	90,11
4	10,2233	90,276	10,223	90,28
5	6,563	90,2365	6,563	90,24

Os curtos na barra 1 e na barra 5 resultaram em 3 barras com níveis de tensão menor que 0,9 pu na fase A e em todas as 5 barras nas demais fases. Os curtos na barra 2 e na barra 3 resultaram em todas as 5 barras com níveis de tensão menores que 0,9 pu nas fases B e C. Por fim, o curto na barra 4 resultou em todas as 5 barras com níveis de tensão menores que 0,9 pu nas 3 fases.

E. Segunda condição: defasagem nos dois transformadores

Também, foi feita uma análise do sistema de 5 barras modificado (com mudança de conexão no transformador T_1), para os quatro tipos de curtos-circuitos. Desta vez, considerou-se que os dois transformadores estavam defasados; o transformador T_1 , diferentemente do caso anterior, agora conectado em Δ - Y_T (sendo o lado delta conectado à barra 1) e o transformador T_2 conectado em Y_T - Δ , como no caso anterior.

As correntes de falta foram iguais ao caso anterior para os curtos trifásicos e fase-fase, uma vez que nesses curtos não há conexão com a terra. Contudo, os valores de tensão foram modificados devido à defasagem dos dois transformadores. Novamente, as tensões apresentaram níveis críticos (abaixo de 0,9 pu) para as três fases da falta trifásica e para as fases B e C do curto-circuito fase-fase (considerando que o defeito aconteceu nessas fases).

Para o curto-circuito fase-terra, os resultados para corrente de falta, mostrados na Tabela VII, são parcialmente diferentes daqueles obtidos anteriormente. Essa diferença, identificada nas barras 1 e 2 deve-se agora ao tipo de conexão do transformador. Os resultados para tensões nas barras também foram diferentes dos encontrados para a condição de conexão do transformador apresentada anteriormente. Entretanto, novamente, todas as barras tiveram suas tensões menores que 0,9 pu na fase A.

Tabela VII - Corrente de falta para o curto ϕ_A -terra para nova condição de defasagem

Barra Curto	Matlab		Power World	
	Módulo (p.u.)	Ângulo (°)	Módulo (p.u.)	Ângulo (°)
1	4,4168	-89,8069	4,417	-89,81
2	3,0058	-88,5956	3,006	-88,66
3	4,4168	-89,8069	4,412	-89,92
4	6,0752	-89,6693	6,07	-89,76
5	5,6523	-89,6251	5,652	-89,63

Para o curto fase-fase-terra, as correntes de falta nas barras, evidenciadas na Tabela VIII, foram consideravelmente diferentes dos obtidos anteriormente, exibidos na tabela VI.

Os valores para tensão também foram diferentes para esta nova condição. O curto na barra 1 resultou em afundamentos de tensão nas barras apenas nas fases B e C. A condição de curto na barra 2, que anteriormente apresentava afundamentos de tensão apenas nas fases B e C, passou a ter um afundamento também na fase A. Para o curto na barra 3, os resultados se repetiram, com todas as barras apresentando tensão menor que 0,9 pu nas fases B e C. O curto na barra 4, como no caso anterior, teve suas tensões abaixo de 0,9 pu em todas as barras para as 3 fases. E, finalmente, para o defeito

na barra 5, houve afundamento de tensão em todas as barras para as 3 fases; sendo que anteriormente, para a fase A, duas das cinco barras não tiveram afundamentos de tensão.

Tabela VIII - Corrente de Falta para o curto ϕ_B - ϕ_C -terra para nova condição de defasagem

Barra Curto	Matlab		Power World	
	Módulo (p.u.)	Ângulo (°)	Módulo (p.u.)	Ângulo (°)
1	4,734	90,1075	4,734	90,11
2	3,3134	90,8658	3,313	90,8
3	4,734	90,1075	4,729	89,99
4	10,4966	90,2835	10,487	90,19
5	8,7447	90,3028	8,745	90,3

Na sequência, a Tabela IX sintetiza os resultados obtidos para as faltas fase-terra e fase-fase-terra, apresentando o número de barras que resultaram em tensão menor que 0,9 pu para cada condição estudada.

Tabela IX – Número de barras que obtiveram níveis críticos para o curto ϕ_A -terra e ϕ_B - ϕ_C - terra

Barra Curto	Falta ϕ_A -terra						Falta ϕ_B - ϕ_C - terra					
	1ª Condição			2ª Condição			1ª Condição			2ª Condição		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
1	5	-	-	5	-	-	3	5	5	-	5	5
2	5	-	-	5	-	-	-	5	5	1	5	5
3	5	-	-	5	-	-	-	5	5	-	5	5
4	5	-	-	5	-	-	5	5	5	5	5	5
5	5	-	-	5	-	-	3	5	5	5	5	5

V. CONCLUSÕES

Nesse artigo, abordou-se estudos teóricos e uma revisão bibliográfica sobre aspectos relacionados às VTCD's, especialmente, no que se refere aos afundamentos de tensão. Curtos-circuitos na rede constituem-se como os principais fenômenos responsáveis pelos afundamentos de tensão e, por isso, teve-se como foco desse artigo seus cálculos no ponto da falta e a propagação nos demais pontos do sistema.

Os estudos de curto-circuito são necessários para assegurar que os equipamentos não serão destruídos devido às solicitações de correntes de curto-circuito, para determinação do poder de corte de disjuntores e fusíveis e para regulação das proteções. Adicionalmente, os estudos sobre afundamentos de tensão se apresentam como fundamentais, uma vez que representam a grande maioria dos problemas de consumidores industriais no que se refere à qualidade de energia elétrica. Com o levantamento das áreas de vulnerabilidade, é possível que a concessionária possa tomar ações mitigadoras preventivas de forma a minimizar a probabilidade de possíveis problemas com afundamentos de tensão.

O programa desenvolvido permite que o usuário determine qual o tipo de curto-circuito que se deseja analisar. Através da opção escolhida, é exibido o número de barras que ficaram com tensões em níveis críticos, menores que 0,9 pu, para as 3 fases (A, B e C), de acordo com a barra em que aconteceu a falta, sendo que são simulados curtos em todas as fases do sistema estudado. Além disso, são criadas matrizes que exibem as correntes de falta e matrizes que

exibem as tensões nas barras, isso para cada fase, dependendo da barra onde aconteceu o curto.

No estudo em pauta no decorrer deste trabalho, os resultados obtidos a partir do aplicativo desenvolvido em linguagem Matlab se mostram bastante condizentes com os gerados no software Power World [10], o que permite a validação do programa criado.

Diante do que foi exposto, considera-se que o trabalho foi importante para a área à qual está relacionado. O programa desenvolvido apresenta-se como uma ferramenta útil e simples, visto que os softwares comercialmente disponíveis apresentam grande complexidade de uso, especialmente no que se refere à conexão de transformadores.

Como trabalhos futuros, pretende-se buscar meios de tornar o programa mais dinâmico e atraente, de modo a tornar sua interface mais amigável e prática.

REFERÊNCIAS

- [1] MAIA, Reginaldo Moreira. *Estudo de casos de afundamentos de tensão nos componentes do sistema elétrico industrial da Moinhos Vera Cruz*. Belo Horizonte – MG, 2008.
- [2] STAROSTA, José. “*Afundamentos de Tensão (ou SAG)*” – Parte I. Revista o Setor Elétrico. Edição 74 / Março de 2012. Acedido em 07 de junho de 2015, em: <http://www.osetoreletrico.com.br/web/colunistas/jose-starosta/816-afundamento-de-tensao-ou-sag-parte-i.html>.
- [3] CHAMPMAN, David. *Guia da Aplicação de Qualidade de Energia Elétrica*. Afundamentos de Tensão. Acedido em 07 de junho de 2015, em: <http://www.leonardo-energy.org.br/wp-content/uploads/2009/06/51-afundamento-introducao.pdf>.
- [4] CANGUNÇU, Nilza Alves. *Contribuições para avaliação dos impactos econômicos causados por mergulho de tensão em sistema elétrico industrial*. Ilha Solteira - SP, Fevereiro de 2006.
- [5] Agência Nacional de Engenharia Elétrica - ANEEL. *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST*, 01 de janeiro de 2015.
- [6] REIS, João Luis; MOURA, Luiz Carlos. *Alternativas Tecnológicas para Mitigação e Interrupção Momentânea de Tensão em Cargas Sensíveis do Sistema Elétrico de Potência*. Acedido em: 07 de junho de 2015 em: <http://www.centralmat.com.br/Artigos/Mais/afundament-oTensao.pdf>
- [7] BRITO, C. M. C.; LEÃO, R. P. S. *Caracterização dos afundamentos de tensão em transformadores trifásicos*. Anais da Conferência Internacional de Aplicações Industriais (VII Induscon), Recife, PE, 2006.
- [8] SANTOS, Ivan Nunes. *Apostila Qualidade de Energia Elétrica*. Capítulo 5: Variações de Tensão de Curta Duração. Uberlândia-MG, 2015.
- [9] RESENDE, J. W. *Análise de Sistemas*. Apostila da disciplina de Análise de Sistemas Elétricos. Curso de Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia - MG, 2006.
- [10] Power World Simulator. Versão 18. < Disponível em: <http://www.powerworld.com/download-purchase/demo-software>>.