

Detecção de Áreas de Vulnerabilidade a Afundamentos de Tensão Devido a Faltas em Sistemas Elétricos

G. G. Santos, A. C. Santos, C. E. Tavares / UFU

Universidade Federal de Uberlândia (UFU)

Faculdade de Engenharia Elétrica (FEELT)

Núcleo de Qualidade da Energia Elétrica (NQEE)

Uberlândia-MG, Brasil

g.gustavo.santos@gmail.com, andrea.crico@gmail.com,

cetavares@ufu.br

T. L. Oliveira / UFU

Universidade Federal de Uberlândia (UFU)

Faculdade de Engenharia Elétrica (FEELT)

Núcleo de Dinâmica de Sistemas Elétricos (NDSE)

Uberlândia-MG, Brasil

thaleslima.ufu@gmail.com

Resumo— Este artigo aborda o desenvolvimento de um programa computacional para cálculo de curtos-circuitos, visando à detecção de áreas de vulnerabilidade a afundamentos de tensão em sistemas elétricos que podem resultar em desligamentos de cargas sensíveis. Em um primeiro momento são tecidos comentários sobre aspectos gerais relacionados à problemática dos afundamentos de tensão e apresentada a fundamentação teórica sobre curtos-circuitos, evidenciando o algoritmo elaborado para a realização dos cálculos computacionais pretendidos. Em seguida, com o intuito de avaliar o desempenho do programa desenvolvido, é realizado um estudo de caso envolvendo um sistema elétrico de nove barras cujos resultados são comparados com os oriundos dos softwares Anafas e Power World. Também fica evidenciado que os dados fornecidos para os cálculos aqui propostos influenciam nos resultados para levantamento das áreas de vulnerabilidade do sistema.

Palavras-chave— Afundamentos de tensão, Anafas, áreas de vulnerabilidade, Matlab, e Power World.

I. INTRODUÇÃO

A crescente elevação do número de dispositivos de controle microprocessados e baseados em eletrônica de potência, sensíveis a perda de controle, é uma das maiores preocupações das indústrias em termos da Qualidade da Energia Elétrica (QEE) [1]. No contexto dos fenômenos acometedores da QEE, merecem destaque as Variações de Tensão de Curta Duração (VTCDs) que são causadas, especialmente, por curtos-circuitos, partida de grandes motores e chaveamento de cargas pesadas. Esses distúrbios ocasionam enormes prejuízos financeiros em unidades consumidoras industriais, uma vez que importantes cadeias produtivas podem ser rompidas devido à sensibilidade de seus equipamentos. Diante dessa realidade, são despendidos enormes gastos de manutenção e reparo nos equipamentos danificados, como também, deixa-se de lucrar durante o período em que a produção é interrompida [2].

Perdas de produção nas indústrias ocasionadas por problemas de QEE possuem um impacto significativo na economia comercial, representando prejuízos anuais de grandes montantes [2,3]. Os eventos típicos de QEE responsáveis por essas ocorrências geralmente possuem duração de 6 a 10 ciclos e queda de tensão na ordem de 50% da tensão nominal [3]. Tais

distúrbios podem ser classificados como Afundamentos Momentâneos de Tensão (AMTs), onde o valor eficaz da tensão fica entre 10% e 90% do valor nominal. Nos casos em que magnitude da tensão atinge valores inferiores a 10% do valor nominal, o fenômeno é classificado como Interrupções Momentâneas de Tensão (IMTs). De forma geral, os AMTs e as IMTs são reduções no valor de tensão eficaz, conforme valores citados, de curta duração (superiores a 1 ciclo e inferiores a 3 segundos) e são causados, principalmente, devido a curtos-circuitos [2].

De acordo com pesquisas relacionadas à QEE, os AMTs constituem o principal fenômeno responsável pela interrupção parcial ou total de sistemas produtivos [2]. Obviamente, um AMT não é tão prejudicial para as indústrias como uma interrupção. Porém, como ocorrem, proporcionalmente, muito mais afundamentos do que interrupções, o total de danos causados por AMTs são maiores [4].

Nem todos os custos associados ao AMT são facilmente quantificados ou, de fato, refletem a urgência de se evitar uma queda de tensão momentânea. A tabela I reflete o impacto dos afundamentos e interrupções [5]. São estabelecidos alguns pesos de acordo com a magnitude do afundamento, considerando peso 1 para as interrupções. Os pesos para os casos de afundamentos equivalem ao impacto econômico causado por este distúrbio, em relação ao provocado por uma interrupção. O fator peso do impacto econômico é associado com o número de ocorrências de cada evento e tem como resultado o custo do impacto econômico.

Conforme apresentado na tabela I, o custo total corresponde a 16,9 vezes o custo equivalente de uma interrupção momentânea de tensão, ou seja, se uma interrupção custa R\$40.000,00 o custo total devido a afundamentos e interrupções seria R\$676.000,00 por ano [5].

TABELA I. COMBINAÇÃO DO FATOR PESO COM A EXPECTATIVA DE AFUNDAMENTOS E INTERRUPÇÕES DE TENSÃO PREVISTOS PARA DETERMINAR O CUSTO DAS VARIAÇÕES DA QUALIDADE DE ENERGIA

Tipo de evento	Peso por fator econômico	Número de eventos por ano	Total equivalente a interrupções
Interrupção	1	5	5
Afundamentos com tensão mínima abaixo de 50%	0,8	3	2,4
Afundamentos com tensão mínima entre 50 e 70%	0,4	15	6
Afundamentos com tensão mínima entre 70 e 90%	0,1	35	3,5
Total	-	-	16,9

Os estudos que envolvem AMT são analisados a partir da monitoração da tensão no sistema elétrico de potência (SEP) ou através da utilização de metodologias de predição. Neste último caso, um dos métodos envolve a utilização de programas computacionais para cálculo dos valores dos AMT. O uso desses programas permite que sejam tomadas medidas mitigatórias em regiões mais sensíveis ou que acarrete maiores prejuízos financeiros.

Inserido neste contexto, este artigo apresenta um programa computacional, desenvolvido em linguagem Matlab, capaz de realizar o cálculo dos diferentes tipos de curtos-circuitos e exibir um panorama geral sobre as regiões mais vulneráveis à ocorrência de afundamentos de tensão. Os resultados são obtidos no domínio da frequência e contemplam apenas os valores das tensões remanescentes no momento da falta em todas as barras do sistema em análise, não sendo considerada a duração do afundamento.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No Brasil, o módulo oito do documento “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional” (PRODIST/ANEEL), classifica as VTCDs quanto à duração e quanto à amplitude da tensão alcançada. De acordo com o primeiro quesito, emprega-se o termo “momentânea” para eventos com duração inferior a três segundos e “temporária” para duração superior a três segundos e inferior a 3 minutos. Com relação à amplitude da tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência, usa-se “interrupção” quando essa relação atinge valor menor que 0,1 pu, “afundamento”, para valores superiores a 0,1 pu e inferiores a 0,9 pu e “elevação”, para níveis superiores a 1,1 pu [6].

Conforme mencionado anteriormente, os eventos que mais comumente ocorrem dentro da categoria de VTCDs são os AMTs, que, por sua vez, são frequentemente ocasionados por curtos-circuitos [2].

A origem dos defeitos acontece em maior parte na rede de distribuição devido a fenômenos meteorológicos [3]. Eles podem ser classificados em quatro tipos: trifásico (3φ), fase-terra (φ-terra), fase-fase (φ-φ) e fase-fase-terra (φ-φ-terra), conforme descrito a seguir.

A. Curto-Circuito Trifásico

Considera-se como um curto simétrico, por envolver as três fases do SEP e, portanto, equilibrado também após o curto. Este

tipo de falta, pela própria configuração, é mais difícil de acontecer, porém, na sua ocorrência, apresenta menor impedância equivalente que resulta em maiores níveis de corrente [7,8].

A corrente de falta (corrente de curto-circuito) é definida por (1).

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

Onde,

I_f - corrente de falta

E_{TH} - tensão de Thévenin

Z_{TH} - impedância de Thévenin

B. Curto-Circuito Fase-Terra

Considera-se como um curto monofásico a terra. Este tipo de curto, como envolve apenas uma fase, ocorre com maior frequência, conforme ilustra o gráfico da Fig. 1 [7].

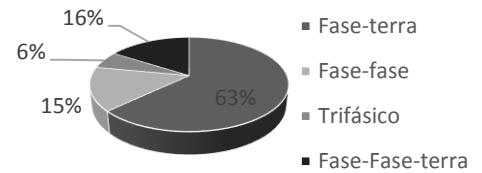


Figura 1. Gráfico percentual de ocorrência dos tipos de curtos-circuitos

O diagrama equivalente para a condição desse tipo de falta é ilustrado na Fig. 2 [7,8].

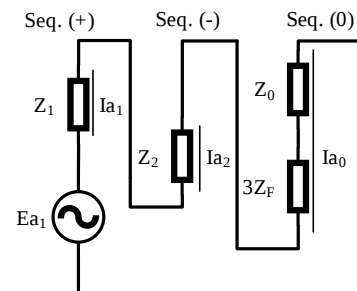


Figura 2. Circuito equivalente para a falta fase-terra

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

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

Onde,

I_a - corrente na fase A

E_{a1} - tensão pré-falta

I_{a0} , I_{a1} e I_{a2} - na ordem, corrente na fase A de sequência zero, positiva e negativa

Z_f , Z_0 , Z_1 e Z_2 - na ordem, impedância de falta, de sequência zero, positiva e negativa

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 Fig. 3 [7,8].

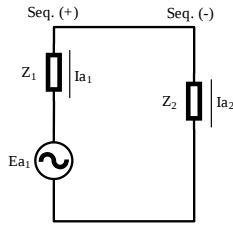


Figura 3. Circuito equivalente para a falta fase-fase

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 a terra. O diagrama equivalente para a condição desse tipo de falta é ilustrado na Fig. 4 [7,8].

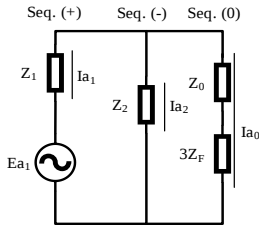


Figura 4. Circuito equivalente para a falta fase-fase-terra

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

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

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

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

Na ocorrência de uma falta, os consumidores que estão próximos ao defeito, naturalmente, sentem um afundamento de maior magnitude. A propagação desse afundamento para os demais consumidores é limitada pela quantidade de elementos que se encontram entre o ponto de falta e os alimentadores a que estão conectados. Dentre estes elementos, os transformadores são os principais responsáveis pela limitação do curto [3].

Os transformadores limitam a falta não apenas devido à sua impedância, mas também devido ao tipo de conexão desses. A Fig. 5 ilustra a propagação de um curto-circuito fase-terra ocorrido no primário de um transformador. Observa-se pela figura que um curto-circuito fase-terra do lado de delta será visto pelo lado de estrela (aterrada ou não) como uma falta fase-

fase, sendo que uma das fases continua, inclusive, com tensão igual a 1 pu. Por outro lado, um curto-circuito fase-terra ocorrido no primário ligado em estrela aterrada é visto no secundário em delta como uma falta fase-fase [9].

Conexão transformador (primário - secundário)	Fase-Fase			Fase-Terra			Diagrama fasorial
	V _{ab}	V _{bc}	V _{ca}	V _{an}	V _{bn}	V _{cn}	
	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	

Figura 5. Tensões no secundário do transformador devido a uma falta fase-terra no primário

III. O PROGRAMA DESENVOLVIDO

O fluxograma elaborado para implementação do programa desenvolvido em linguagem Matlab é exibido na Fig. 6. Em resumo, após receber o número de barras do SEP, são inicializadas as variáveis de tensão com magnitude igual a 1 pu e ângulo zero e as demais variáveis são iniciadas como 0. Em seguida, o usuário informa os dados de impedâncias de geradores ou motores que pertencem ao sistema, para preenchimento da diagonal principal das matrizes de admitâncias. Logo após, são inseridos os dados de transformadores e de linhas de transmissão/distribuição, que ocupam os elementos fora da diagonal principal e atualizam os valores da diagonal principal dessas matrizes. Deve-se atentar para o caso particular dos transformadores, uma vez que o tipo de conexão será determinante na formação da matriz de admitâncias de sequência zero enquanto que a defasagem influencia nas matrizes de admitâncias de sequências positiva e negativa. Posteriormente, se desejável, é possível inserir o valor da impedância de falta. Ao final do cálculo do curto, são armazenados os resultados de tensão em todas as barras e a corrente na barra da falta.

Por fim, o programa desenvolvido tem condições de apresentar um relatório sobre as áreas de vulnerabilidade do sistema elétrico investigado, com a descrição das barras que tiveram tensão abaixo de 0,9 pu, de acordo com os tipos de curtos-circuitos simulados, bem como da barra onde eles ocorreram.

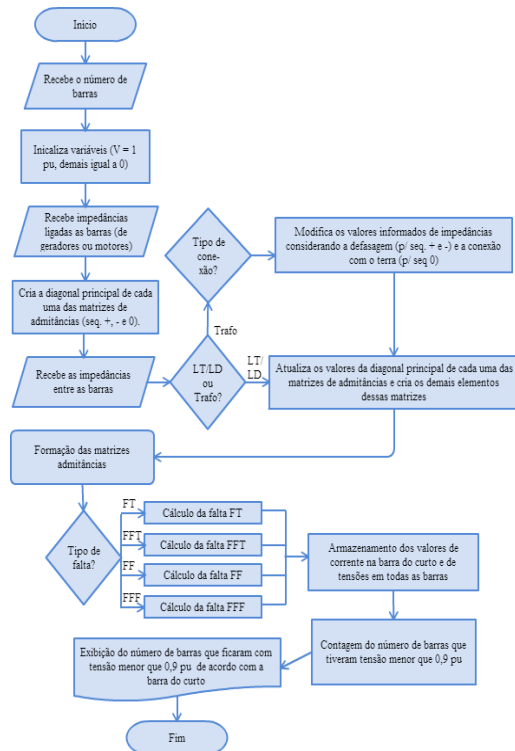


Figura 6. Fluxograma resumido do cálculo do curto-circuito

IV. ESTUDO DE CASO

Com o intuito de avaliar a funcionalidade do programa desenvolvido, fez-se um estudo de análise no sistema elétrico de nove barras mostrado na Fig. 7. Para fins de validação do programa, esse mesmo sistema foi simulado também nos softwares Anafas e Power World Simulator.

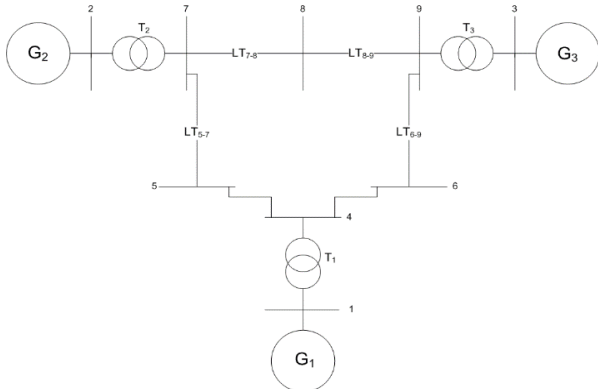


Figura 7. SEP de 9 barras

O Anafas (Análise de Faltas Simultâneas) é um software desenvolvido pela Centro de Pesquisa de Energia Elétrica (CEPEL) para solução de faltas de diversos tipos de composição em sistemas elétricos de grande porte [10]. Por sua vez, o Power World Simulator é um pacote de simulação computacional desenvolvido para cálculo de fluxo de potência, que contém ferramentas para cálculo de curtos-circuitos [11].

A tabela II mostra as impedâncias dos componentes do SEP ilustrado na Fig. 7.

TABELA II. IMPEDÂNCIA DE SEQUÊNCIAS POSITIVA, NEGATIVA E ZERO DOS COMPONENTES DO SISTEMA DA FIG. 7

Componente	Z_1 (pu)	Z_2 (pu)	Z_0 (pu)
Gerador 1 – G1	j0,05168	j0,07429	j0,020627
Gerador 2 – G2	j0,10183	j0,149365	j0,040732
Gerador 3 – G3	j0,154105	j0,2020525	j0,061642
Transformador T ₁	j0,0576	j0,0576	j0,0576
Transformador T ₂	j0,0625	j0,0625	j0,0625
Transformador T ₃	j0,0586	j0,0586	j0,0586
Linha de Transmissão entre as barras 4 e 5 (LT ₄₋₅)	0,01 + j0,085	0,01 + j0,085	0,025 + j0,2125
Linha de Transmissão entre as barras 4 e 6 (LT ₄₋₆)	0,017 + j0,092	0,017 + j0,092	0,0425 + j0,23
Linha de Transmissão entre as barras 5 e 7 (LT ₅₋₇)	0,032 + j0,161	0,032 + j0,161	0,08 + j0,4025
Linha de Transmissão entre as barras 6 e 9 (LT ₆₋₉)	0,039 + j0,17	0,039 + j0,17	0,0975 + j0,425
Linha de Transmissão entre as barras 7 e 8 (LT ₇₋₈)	0,0085 + j0,072	0,0085 + j0,072	0,2125 + j0,18
Linha de Transmissão entre as barras 8 e 9 (LT ₈₋₉)	0,0119 + j0,1008	0,0119 + j0,1008	0,02975 + j0,252

A partir dos dados de impedância fornecidos, em um primeiro momento, foram geradas as matrizes de admitâncias para as sequências positiva, negativa e zero. Considerou-se, para tanto, que os três transformadores estão conectados em delta – estrela aterrado (Δ -Y_T), sendo o lado em delta conectado ao lado de menor tensão, que no caso corresponde ao lado ligado aos geradores.

A seguir são apresentados os resultados obtidos nas simulações realizadas pelo aplicativo computacional desenvolvido, os quais são comparados com os advindos dos softwares Anafas [12] e Power World [13]. Foi designado que seriam simuladas faltas nas barras de número 2, 6 e 8 do SEP da Fig. 7, sendo o evento ocorrido apenas em uma barra por vez, a cada simulação. Por motivo de espaço, os resultados contemplam a aplicação de faltas trifásicas, que são as mais severas e faltas fase-terra, que são as mais comuns em termos de ocorrência.

Para a apresentação destes resultados considerou-se duas situações distintas:

- “Resultados Situação 1”: Como o software Anafas não permite a entrada de dados de impedâncias de sequência negativa, estas foram consideradas iguais as impedâncias de sequência positiva para a validação do aplicativo desenvolvido;
- “Resultados Situação 2”: Neste caso foram contemplados os distintos valores para as impedâncias de sequência positiva e negativa, indicados na tabela II.

A. Curto-Circuito Trifásico – Resultados Situação 1

Foram impostos curtos-circuitos trifásicos nas barras 2, 6 e 8 do sistema, sendo a simulação da falta em cada barra realizada separadamente, vez a vez, resultando em três simulações distintas. As tabelas III e IV contêm os valores da tensão e corrente de falta (fornecidos pelo programa desenvolvido em Matlab e pelo software Anafas, respectivamente) de acordo com a barra na qual ocorreu o curto. Por sua vez, A tabela V exhibe o número de barras por fase que tiveram níveis críticos de

tensão (inferiores a 0,9 pu) de acordo com a barra em que ocorreu o curto.

TABELA III. TENSÕES E CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO NA SITUAÇÃO 1 – PROGRAMA EM MATLAB

Matlab	Tensão		Corrente	
	Módulo	Ângulo	Módulo	Ângulo
Falta na barra 2	0,000	0,0	13,922	-88,9
	0,000	0,0	13,922	151,1
	0,000	0,0	13,922	31,1
Falta na barra 6	0,000	0,0	8,518	-83,8
	0,000	0,0	8,518	156,2
	0,000	0,0	8,518	36,2
Falta na barra 8	0,000	0,0	9,171	-86,4
	0,000	0,0	9,171	153,6
	0,000	0,0	9,171	33,6

TABELA IV. TENSÕES E CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO NA SITUAÇÃO 1 – SOFTWARE ANAFAS

Anafas	Tensão		Corrente	
	Módulo	Ângulo	Módulo	Ângulo
Falta na barra 2	0,000	0,0	13,922	-88,9
	0,000	0,0	-13,922	-28,8
	0,000	0,0	-13,922	-148,9
Falta na barra 6	0,000	0,0	8,518	-83,8
	0,000	0,0	-8,518	-23,8
	0,000	0,0	-8,518	-143,8
Falta na barra 8	0,000	0,0	9,171	-86,4
	0,000	0,0	-9,171	-26,4
	0,000	0,0	-9,171	-146,4

TABELA V. NÚMERO DE BARRAS QUE TIVERAM NÍVEIS CRÍTICOS DE TENSÃO DE ACORDO COM A BARRA DE CURTO

Barra do curto	Fase A	Fase B	Fase C
2	9	9	9
6	9	9	9
8	9	9	9

B. Curto-Circuito Trifásico – Resultados Situação 2

Como o curto-circuito trifásico é um curto simétrico, para o seu cálculo utiliza-se apenas os dados de impedâncias de sequência positiva e, por isso, os “Resultados Situação 2” obtidos no programa desenvolvido em Matlab foram iguais aos do “Resultados Situação 1” exibidos na tabela III. A tabela VI exibe os resultados de falta trifásica obtidos no software Power World Simulator.

TABELA VI. TENSÕES E CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO NA SITUAÇÃO 2 – SOFTWARE POWER WORLD SIMULATOR

Power World	Tensão		Corrente	
	Módulo	Ângulo	Módulo	Ângulo
Falta na barra 2	0,000	0,0	13,922	-88,9
	0,000	0,0	13,922	151,1
	0,000	0,0	13,922	31,1
Falta na barra 6	0,000	0,0	8,518	-83,8
	0,000	0,0	8,518	156,2
	0,000	0,0	8,518	36,2
Falta na barra 8	0,000	0,0	9,171	-86,4
	0,000	0,0	9,171	153,6
	0,000	0,0	9,171	33,6

C. Curto-Circuito Fase-Terra – Resultados Situação 1

Foram considerados curtos-circuitos monofásicos, envolvendo a fase A das barras 2, 6 e 8, sendo eventos isolados

(não simultâneos). A tabela VII exibe os resultados de tensões e correntes de curto na barra da falta obtidos no programa em Matlab e a tabela VIII no software Anafas. Por sua vez, a tabela IX mostra o número de barras por fase que tiveram níveis de tensão menores que 0,9 pu, de acordo com a barra de curto.

TABELA VII. TENSÕES E CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO FASE-TERRA NA SITUAÇÃO 1 – PROGRAMA EM MATLAB

Matlab	Tensão		Corrente	
	Módulo	Ângulo	Módulo	Ângulo
Falta na barra 2	0,000	0,0	16,271	-89,2
	0,932	-110,8	0,000	26,6
	0,923	111,0	0,000	26,6
Falta na barra 6	0,912	-1,0	7,224	-82,3
	0,944	-115,9	0,000	53,1
	1,000	120,0	0,000	41,2
Falta na barra 8	0,000	90,0	8,511	-85,7
	1,029	-123,8	0,000	56,3
	1,047	123,1	0,000	56,3

TABELA VIII. TENSÕES E CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO FASE-TERRA NA SITUAÇÃO 1 – PROGRAMA ANAFAS

Anafas	Tensão		Corrente	
	Módulo	Ângulo	Módulo	Ângulo
Falta na barra 2	0,000	0,0	16,271	-89,2
	0,932	-110,8	0,000	0,0
	0,923	111,0	0,000	0,0
Falta na barra 6	0,912	-1,0	7,224	-82,3
	0,944	-115,9	0,000	0,0
	1,000	120,0	0,000	0,0
Falta na barra 8	0,000	0,0	8,511	-85,7
	1,029	-123,8	0,000	0,0
	1,047	123,1	0,000	0,0

TABELA IX. NÚMERO DE BARRAS QUE TIVERAM NÍVEIS CRÍTICOS DE TENSÃO DE ACORDO COM A BARRA DE CURTO

Barra do curto	Fase A	Fase B	Fase C
2	8	0	2
6	8	0	0
8	8	1	0

D. Curto-Circuito Fase-Terra – Resultados Situação 2

A tabela X apresenta os resultados de tensões e correntes de curto na barra da falta obtidos no programa em Matlab e a tabela XI no software Power World Simulator. Por sua vez, a tabela XII exibe o número de barras por fase que tiveram níveis de tensão inferiores a 0,9 pu, de acordo com a barra de curto.

TABELA X. TENSÕES E CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO FASE-TERRA NA SITUAÇÃO 2 – PROGRAMA EM MATLAB

Matlab	Tensão		Corrente	
	Módulo	Ângulo	Módulo	Ângulo
Falta na barra 2	0,000	-179,1	14,466	-89,0
	1,011	-107,0	0,000	90,0
	1,001	107,0	0,000	90,0
Falta na barra 6	0,000	15,7	7,028	-82,5
	1,071	-126,1	0,000	63,4
	1,114	124,9	0,000	63,4
Falta na barra 8	0,000	2,7	8,185	-85,8
	1,043	-121,7	0,000	45,0
	1,065	121,2	0,000	45,0

TABELA XI. TENSÕES E CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO FASE-TERRA NA SITUAÇÃO 2 – SOFTWARE POWER WORLD SIMULATOR

Power World Fases A/B/C	Tensão		Corrente	
	Módulo	Ângulo	Módulo	Ângulo
Falta na barra 2	0,000	176,7	14,466	-89,0
	1,011	-107,0	0	0,0
	1,001	107,0	0	0,0
Falta na barra 6	0,000	164,6	7,028	-82,5
	1,071	-126,1	0	0,0
	1,114	124,9	0	90,0
Falta na barra 8	0,000	-23,8	8,185	-85,8
	1,043	-121,7	0	0,0
	1,065	121,2	0	0,0

TABELA XII. NÚMERO DE BARRAS QUE TIVERAM NÍVEIS CRÍTICOS DE TENSÃO DE ACORDO COM A BARRA DE CURTO

Barra do curto	Fase A	Fase B	Fase C
2	9	0	1
6	9	0	0
8	8	0	0

O curto-circuito fase-terra resultou em níveis de tensão inferiores a 0,9 pu na fase A (fase do curto). Comparando-se as duas situações analisadas, na ocorrência de falta nas barras 2, 6 e 8 (eventos isolados), uma barra permaneceu na situação 1 (subitem C), enquanto que, na segunda situação (subitem D), isso aconteceu apenas para a falta na barra 8 (vide tabelas IX e XII). Observa-se que os resultados se diferenciaram nas duas situações (subitem C e D), sendo que algumas barras que não apresentaram níveis críticos de tensão em uma das situações passaram a apresentar na outra. Entende-se que a consideração da equivalência entre as impedâncias de sequência positiva e negativa se faz necessária em um grande número de situações devido à falta de informação sobre os dados de impedâncias de sequência negativa. Contudo, os resultados mostram uma inconsistência desta alternativa para a análise de afundamentos de tensão devido aos curtos-circuitos.

V. CONCLUSÕES

Neste artigo foram retratados aspectos relacionados às VTCDs, tendo como foco o estudo de afundamentos de tensão devido a fenômeno de curtos-circuitos. Abordou-se também a propagação de faltas nos demais pontos do SEP.

Baseado na teoria clássica de análise de curtos-circuitos foi desenvolvido um algoritmo que identifica, de acordo com o tipo e a localização da falta simulada, o número de barras que apresentam tensões em níveis críticos, menores que 0,9 pu, para as três fases de determinado sistema elétrico analisado. Além disso, é possível visualizar a tensão remanescente após o defeito e a corrente na barra de curto.

No estudo de caso apresentado, ficou claro que os resultados obtidos a partir do programa desenvolvido em linguagem Matlab se mostraram bem condizentes com o esperado na teoria. Constatou-se uma boa correspondência com as respostas fornecidas pelos reconhecidos softwares Anafas e Power World, motivo pelo qual foi omitida a informação relativa ao erro percentual. Os resultados também mostraram que no caso das simulações de faltas fase-terra, a consideração de que as impedâncias de sequência negativa são iguais às de sequência

positiva, metodologia empregada no Anafas, geraram resultados um pouco divergentes quanto ao número de barras vulneráveis do SEP. Nesse sentido, pondera-se que, sempre que possível, a utilização de todos os dados confere maior confiabilidade aos resultados, principalmente para o fenômeno aqui enfocado.

Diante do que foi exposto, considera-se que o programa desenvolvido foi validado e se apresenta como uma ferramenta útil e simples para estudos de afundamentos de tensão.

REFERÊNCIAS

- [1] R. M. MAIA. “Características das VTCDs e seus Impactos nas Indústria Alimentícia”. Dissertação Mestrado em Engenharia Elétrica, Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, Belo Horizonte – MG, julho de 2011.
- [2] N. A. CANGUNÇU. “Contribuições para avaliação dos impactos econômicos causados por mergulho de tensão em sistema elétrico industrial”. Dissertação Mestrado em Engenharia Elétrica, Faculdade de Ilha Solteira, UNESP, Ilha Solteira - SP, fevereiro de 2006.
- [3] J. L. REIS e L. C. MOURA. “Alternativas Tecnológicas para Mitigação e Interrupção Momentânea de Tensão em Cargas Sensíveis do Sistema Elétrico de Potência”. *Artigos da Centralmat* [Online]. Disponível em: <http://www.centralmat.com.br/Artigos/Mais/afundamentoTensa o.pdf>.
- [4] M. H. J. BOLLEN. *Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions*. New York: IEEE press, 1960, p. 155.
- [5] M. MCGRANAGHAN e B. ROETTGER. Economic Evaluation of Power Quality. *IEEE Power Engineering Review*, vol. 22, Issue 2, February 2002.
- [6] *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST*, Agência Nacional de Engenharia Elétrica – ANEEL, 01 de janeiro de 2016.
- [7] W. D. STEVERSON. *Elementos de Análise de Sistemas de Potência*, 2ª ed. São Paulo, Brasil: McGraw-Hill, 1986, p. 265-359.
- [8] J. W. RESENDE. *Análise de Sistemas*. Apostila da disciplina de Análise de Sistemas Elétricos. Curso de Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia - MG, 2006.
- [9] R. C. DUGAN, M. F. MCGRANAGHAN e H. W. BEATY. *Electrical Power Systems Quality*, 2nd ed. New York, NY, USA: The McGraw-Hill Companies, 1996, p. 56.
- [10] *Apresentação ANAFAS – Análise de Faltas Simultâneas*, Eletrobras – CEPEL. Disponível em: <http://www.cepel.br/main.jsp?lumPageId=21CF888C4A1692FF014A784FD2AE60D0&lumItemId=4028B88136E3DBC70136E40D43522D26>.
- [11] *Power World Simulator overview*, POWER WORLD CORPORATION. Disponível em: <http://www.powerworld.com/products/simulator/overview>.
- [12] *ANAFAS – Análise de Faltas Simultâneas*, Versão 6.5, Licença educacional, Brasil: CEPEL.
- [13] *Power World Simulator*, Versão 18, Educational License, United States: Power World Corporation.