



XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica

SENDI 2008 - 06 a 10 de outubro

Olinda - Pernambuco - Brasil

Nova Metodologia para Cálculo de Defeitos em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica

Leandro Matos Riani
ArcelorMittal Tubarão

leandro.riani@arcelor.com.br

Paulo Augusto Nepomuceno Garcia
Universidade Federal de
Juiz de Fora

paulo.garcia@ufjf.edu.br

Márcio de Pinho Vinagre
Universidade Federal de
Juiz de Fora

marcio.vinagre@ufjf.edu.br

José Luiz Rezende Pereira
Universidade Federal de
Juiz de Fora

jluiz@ieee.org

André Luiz Marques Marcato
Universidade Federal de
Juiz de Fora

André.marcato@ufjf.edu.br

Helio Antônio da Silva
Universidade Federal de
Juiz de Fora

helioa@lacee.ufjf.br

Edimar José de Oliveira
Universidade Federal de
Juiz de Fora

edimar@lacee.ufjf.br

Sandoval Carneiro Jr
Universidade Federal do
Rio de Janeiro

sandoval@coep.ufjf.br

Palavras-chave

Análise de defeitos

Coordenadas de fase

Fluxo de potência continuado

Modelagem a quatro fios

Resumo

Este trabalho apresenta uma nova formulação para o cálculo de defeitos em sistemas elétricos onde uma modelagem trifásica a quatro fios com representação explícita do condutor neutro e do aterramento das barras é utilizada. Dessa forma, permiti-se calcular diretamente as tensões e correntes de neutro. Adicionalmente as cargas podem ser representadas por diversos modelos, ou seja, cargas do tipo potência constante, corrente constante, impedância constante ou ainda qualquer combinação entre estes modelos. Para tanto utilizou-se um fluxo de potência continuado, onde a impedância de falta é o parâmetro de continuação. Foram realizadas simulações em sistemas reais de propriedade da ArcelorMittal Tubarão onde comprovou-se a eficiência e a versatilidade da formulação proposta.

1. Introdução

A análise de faltas em sistemas elétricos de potência é normalmente realizada utilizando-se componentes simétricas [1, 2]. No entanto, defeitos sérios e simultâneos introduzem acoplamentos entre as seqüências, tornando a análise dispendiosa. Adicionalmente, quando o método das componentes simétricas é aplicado a sistemas desbalanceados, como linhas monofásicas, bifásicas ou mesmo trifásicas que não sejam perfeitamente transpostas, são introduzidos acoplamentos entre as componentes de seqüência, diminuindo substancialmente

as vantagens deste método. Para contornar estes problemas utilizam-se simplificações que introduzem erros consideráveis nos cálculos das faltas [3].

As restrições do uso de componentes simétricas no cálculo de faltas complexas e sistemas desequilibrados motivaram o desenvolvimento de eficientes metodologias baseadas em coordenadas de fase, onde tais limitações não estão presentes [4-12]. Porém, na maioria destas metodologias de fluxo de potência e análise de defeitos, os efeitos dos cabos neutros e dos aterramentos do sistema são negligenciados ou incorporados nas fases, através da redução de Kron. Estas simplificações podem conduzir a erros nas análises, que se tornam maiores quanto mais severo for o desequilíbrio do sistema [13]. Além disso, as correntes e tensões de neutros e aterramentos permanecem desconhecidas, impedindo a análise completa de seus efeitos [14,15].

Neste trabalho apresenta-se uma poderosa ferramenta para análise de defeitos através da representação completa do sistema trifásico a quatro condutores, ou seja, considerando a representação explícita do condutor neutro e das impedâncias de aterramento das barras e dos transformadores. Esta representação permite o cálculo direto das grandezas elétricas dos neutros e dos aterramentos do sistema sob defeito. Os desequilíbrios da rede e da carga, as mútuas entre as fases, gerações dispersas, transformadores de dois e três enrolamentos nas mais diversas conexões e formas de aterramento também são considerados na modelagem. Outra característica importante deste método é a representação do modelo de carga dependente da tensão durante o cálculo de curto-circuito, permitindo avaliar a influência da carga nos estudos de afundamento de tensão [16,17].

A metodologia é baseada no fluxo de potência trifásico por injeção de corrente –MICQ [18, 19] que soluciona um sistema de equações em coordenadas de fase utilizando o método de Newton-Raphson. Inicialmente, o sistema é solucionado para condição pré-falta e então aplica-se um fluxo de potência continuado onde a impedância de defeito é alterada passo a passo até que o valor real seja alcançado.

Nas simulações realizadas foram aplicados defeitos em sistemas elétricos reais de alta e baixa tensão, onde se constatou a grande eficácia, robustez numérica e versatilidade da metodologia proposta mostrando que o método pode ser aplicado em qualquer tipo de sistema elétrico, equilibrado ou desequilibrado, radial ou reticulado, com três ou quatro condutores, com aterramentos das mais diversas formas, com neutro isolado, com cargas ou ramais monofásicos, bifásicos e trifásicos, ou seja, pode ser utilizado na análise de sistemas de transmissão, subtransmissão, distribuição e industrial.

2. Modelagem Trifásica a Quatro Fios do Sistema

A. Modelos de Linhas

Como modelo de linhas utiliza-se o circuito “pi-equivalente” a parâmetros concentrados, conforme apresentado na Figura 1. Este modelo permite a representação de linhas com cabo neutro e/ou parâmetros assimétricos, comuns em sistemas de distribuição.

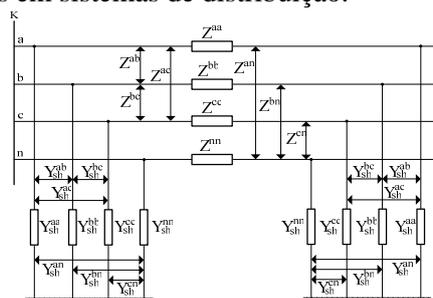


Figura 1 - Circuito pi-equivalente de uma linha trifásica a 4 condutores

Os elementos do circuito da Figura 1 são matrizes 4x4 dadas por:

$$Y_{km}^{abcn} = \begin{bmatrix} Z_{km}^{aa} & Z_{km}^{ab} & Z_{km}^{ac} & Z_{km}^{an} \\ Z_{km}^{ba} & Z_{km}^{bb} & Z_{km}^{bc} & Z_{km}^{bn} \\ Z_{km}^{ca} & Z_{km}^{cb} & Z_{km}^{cc} & Z_{km}^{cn} \\ Z_{km}^{na} & Z_{km}^{nb} & Z_{km}^{nc} & Z_{km}^{nn} \end{bmatrix} \quad Y_{sh_{km}}^{abcn} = \begin{bmatrix} b_{sh_{km}}^{aa} & b_{sh_{km}}^{ab} & b_{sh_{km}}^{ac} & b_{sh_{km}}^{an} \\ b_{sh_{km}}^{ba} & b_{sh_{km}}^{bb} & b_{sh_{km}}^{bc} & b_{sh_{km}}^{bn} \\ b_{sh_{km}}^{ca} & b_{sh_{km}}^{cb} & b_{sh_{km}}^{cc} & b_{sh_{km}}^{cn} \\ b_{sh_{km}}^{na} & b_{sh_{km}}^{nb} & b_{sh_{km}}^{nc} & b_{sh_{km}}^{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Para representar derivações monofásicas e bifásicas utiliza-se o artifício de substituir a impedância da fase inexistente por um número de valor elevado (10^{10} , por exemplo). Adota-se o mesmo procedimento para a matriz admitância do circuito pi-equivalente, porém neste caso, substitui-se a susceptância por zero.

B. Modelos de Carga

Foi adotado na análise de defeitos o modelo polinomial de carga onde são combinados os modelos potência constante, corrente constante e impedância constante [20]. Esta modelagem permite analisar a influência do tipo de carga nos afundamentos de tensão provocados por curtos-circuitos.

Se, durante o processo iterativo, a tensão numa determinada barra cair abaixo de um valor pré-estabelecido, a carga conectada a esta barra será automaticamente transformada em impedância constante.

Uma representação genérica de uma carga trifásica aterrada através de uma impedância de aterramento Z_{at} é mostrada na Figura 2. Os modelos de cargas monofásicas e bifásicas são semelhantes ao modelo de carga trifásica, porém fazendo-se as potências das fases ausentes iguais à zero.

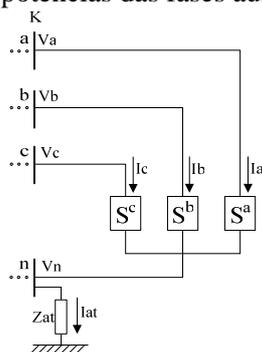


Figura 2 - Modelo de Carga em Estrela com Impedância de Aterramento

C. Modelos de Capacitores em Derivação

Capacitores em derivação normalmente são trifásicos e ligados em estrela. No entanto, No presente trabalho permite-se a representação de capacitores monofásicos, bifásicos, além do aterramento do neutro através de impedância.

D. Modelos de Geradores

Assim como na maioria das metodologias de análise de faltas, neste trabalho os geradores também serão representados por uma fonte de tensão constante atrás de sua reatância transitória. Normalmente, os fabricantes de geradores fornecem somente os dados de seqüência positiva, negativa e zero. Para obtenção dos parâmetros necessários, deve ser feita uma transformação para valores de fase.

E. Modelo de Transformadores

Uma correta representação dos transformadores é de vital importância no cálculo de faltas em sistemas elétricos. O modelo permite a utilização de impedâncias de aterramento em ambos os lados do transformador, a representação do condutor de neutro e a representação de transformadores de três enrolamentos. Neste modelo, as diferenças nos ângulos entre as tensões do primário e secundário, devido ao tipo de conexão do transformador, são obtidas naturalmente.

A matriz que representa o transformador é dada pela equação (2), onde Y_{barra} é a matriz admitância de barras, Y_{prim} é a matriz de admitância primitiva do transformador, A é a matriz de incidência nodal e A^t sua transposta.

$$Y_{barra} = A^t Y_{prim} A = \begin{bmatrix} Y_p & Y_{ps} & Y_{ps} \\ Y_{sp} & Y_s & Y_{st} \\ Y_{tp} & Y_{ts} & Y_t \end{bmatrix} \quad (2)$$

As várias possibilidades de conexões dos transformadores são facilmente representadas pela matriz de incidência nodal apropriada. Os elementos da matriz de impedância primitiva são calculados a partir da reatância de dispersão, reatância de magnetização e das resistências de seus enrolamentos, parâmetros facilmente obtidos por ensaios normalizados pelos fabricantes. A Figura 3 mostra um transformador trifásico de três enrolamentos, com o primário e terciário conectado em delta e o secundário conectado em estrela aterrado por impedância.

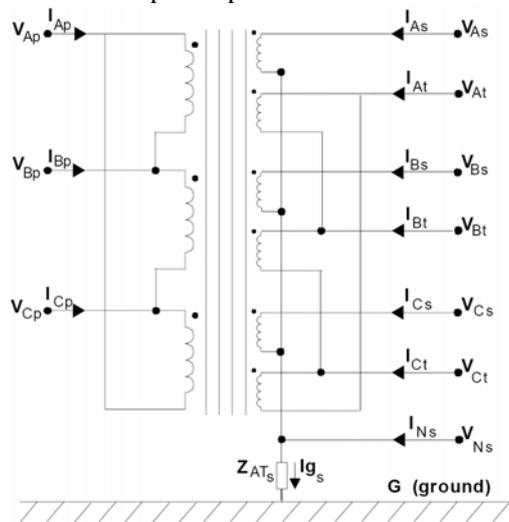


Figura 3 - Transformador conectado em delta-estrela-delta

A matriz de incidência nodal para este exemplo é apresentada em (3), onde as linhas da matriz representam os ramos e as colunas os nós. Neste tipo de conexão existe uma diferença angular de 30° entre os ângulos das tensões de fase do primário e secundário. Cabe ressaltar que no modelo proposto neste trabalho esta diferença de fase é obtida naturalmente.

$$A = \begin{bmatrix} & V_{Ap} & V_{Bp} & V_{Cp} & V_{Np} & V_{As} & V_{Bs} & V_{Cs} & V_{Ns} & V_{At} & V_{Bt} & V_{Ct} & V_{Nt} \\ V_{Ap} V_{Bp} & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ V_{Bp} V_{Cp} & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ V_{Cp} V_{Ap} & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ V_{Np} G & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline V_{As} V_{Ns} & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ V_{Bs} V_{Ns} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ V_{Cs} V_{Ns} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ V_{Ns} G & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline V_{At} V_{Bt} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ V_{Bt} V_{Ct} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ V_{Ct} V_{At} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ V_{Nt} G & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

3. Modelagem dos Defeitos

As faltas são representadas pelas respectivas matrizes admitância de barras e impedância de barras, de acordo com o tipo de defeito [21]. Estas matrizes são obtidas a partir de dois modelos genéricos formulados para faltas shunt e série. Faltas simultâneas são representadas pela combinação entre as duas. A seguir descreve-se a formulação proposta

A. Faltas Shunt

Todos os tipos de faltas *shunt* podem ser obtidas através da adequada manipulação das impedâncias Z_{f_A} , Z_{f_B} , Z_{f_C} , Z_{f_N} e Z_{f_G} da Figura 4. As impedâncias das fases envolvidas no defeito tenderão a zero (10^{-10}) ou para o valor de impedância de falta especificado. As impedâncias das fases não envolvidas no defeito terão seus valores tendendo a infinito (10^{+10}).

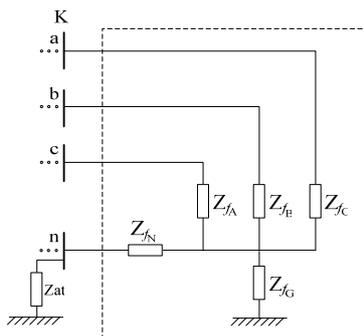


Figura 4 - Representação de Faltas Shunt

Onde Z_{f_A} , Z_{f_B} , Z_{f_C} , Z_{f_N} e Z_{f_G} , são as impedâncias de falta especificadas para a falta *shunt*. A Equação (4) estabelece a matriz admitância de barras relativa ao modelo de faltas *shunt* representado pela Figura 4.

$$Y_{bus4\phi}^{K} = X \begin{bmatrix} Y_A(Y_B+Y_C+Y_N+Y_G) & -Y_A Y_B & -Y_A Y_C & -Y_A Y_N \\ -Y_B Y_A & Y_B(Y_A+Y_C+Y_N+Y_G) & -Y_B Y_C & -Y_B Y_N \\ -Y_C Y_A & -Y_C Y_B & Y_C(Y_A+Y_B+Y_N+Y_G) & -Y_C Y_N \\ -Y_N Y_A & -Y_N Y_B & -Y_N Y_C & Y_N(Y_A+Y_B+Y_C+Y_G) \end{bmatrix} \quad (4)$$

onde:

$$X = \frac{1}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_N + Y_G} \quad (5)$$

$$Y_A = \frac{1}{Z_{f_A}}, Y_B = \frac{1}{Z_{f_B}}, Y_C = \frac{1}{Z_{f_C}}, Y_N = \frac{1}{Z_{f_N}}, Y_G = \frac{1}{Z_{f_G}} \quad (6)$$

A Tabela I contém os valores das impedâncias para os mais diversos tipos de faltas *shunt*.

Tabela I

Circuito Equivalente para Faltas Shunt

Defeito	Z_{f_A}	Z_{f_B}	Z_{f_C}	Z_{f_N}	Z_{f_G}
A-G	Z_{f_A}	∞	∞	∞	Z_{f_G}
A-N	Z_{f_A}	∞	∞	Z_{f_N}	∞
BC	∞	Z_{f_B}	Z_{f_C}	∞	∞
BC-G	∞	Z_{f_B}	Z_{f_C}	∞	Z_{f_G}
BC-N	∞	Z_{f_B}	Z_{f_C}	Z_{f_N}	∞
ABC	Z_{f_A}	Z_{f_B}	Z_{f_C}	∞	∞
ABC-N	Z_{f_A}	Z_{f_B}	Z_{f_C}	Z_{f_N}	∞
ABC-NG	Z_{f_A}	Z_{f_B}	Z_{f_C}	Z_{f_N}	Z_{f_G}

B. Falta Série

Faltas do tipo série são representadas utilizando o circuito trifásico a quatro condutores da Figura 5. Duas novas barras K' e M' são criadas entre as barras da linha original KM. A impedância da linha original é distribuída entre as linhas KK' e MM' proporcionalmente ao local do defeito ($0 < n < 1$). Entre K' e M' temos a representação da impedância série da falta. O valor desta impedância tende a zero quando representa estado normal de operação e a infinito quando representa abertura do condutor daquela fase. As impedâncias dos elementos série do ramo K'M' é a matriz diagonal dada pela Equação(7).

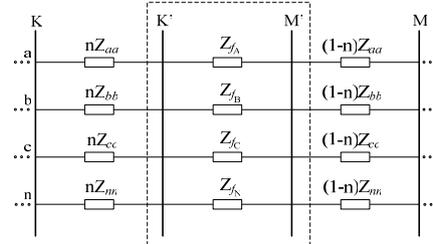


Figura 5 - Representação de Falta Série

Onde Z_{f_A} , Z_{f_B} , Z_{f_C} , Z_{f_N} são as impedâncias de falta especificadas para a falta série.

$$Z_{4\phi}^{K'M'} = \begin{bmatrix} Z_{f_A} & & & \\ & Z_{f_B} & & \\ & & Z_{f_C} & \\ & & & Z_{f_N} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$Y_{4\phi}^{K'M'} = [Z_{4\phi}^{K'M'}]^{-1} \quad (8)$$

A abertura de linha pode ser homopolar, bipolar, tripolar. Também pode-se simular o rompimento do cabo neutro A Tabela II contém os valores das impedâncias de falta para estes tipos de defeito.

Tabela II

Circuito Equivalente para Falta Série

Defeito	Z_{f_A}	Z_{f_B}	Z_{f_C}	Z_{f_N}
A	∞	0	0	0
AB	∞	∞	0	0
ABC	∞	∞	∞	0
ABCN	∞	∞	∞	∞

C. Falta Simultâneas

Para representar defeitos série e em derivação simultaneamente, basta considerar as matrizes admitâncias de barras dos tipos de faltas envolvidas. Conforme pode ser visto na Figura 6, para representar o rompimento de fase com contato do condutor ao solo, utiliza-se modelos shunt e série mostrados nas seções III.A e III.B respectivamente.

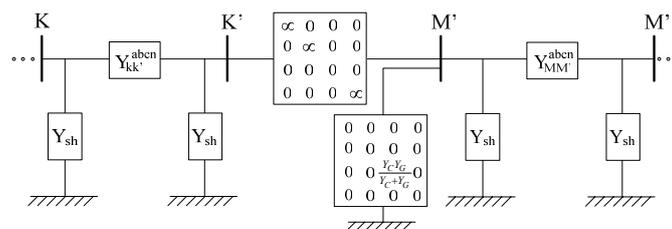


Figura 6 - Representação de Falta Simultâneas

4. Aplicação do Fluxo de Potência Continuado no Cálculo de Defeitos

Neste trabalho o cálculo de defeitos é realizado a partir de um fluxo de potência acrescido da representação do defeito, conforme modelado no item anterior. No entanto, a representação de faltas no problema de fluxo de potência é extremamente complexa e na maioria das vezes levam a divergência ou a resultados que não correspondem ao ponto de operação, visto que nas barras eletricamente próximas ao defeito as condições pós-falta são, de forma geral, totalmente diferentes das condições pré-falta.

Buscando resolver este problema, ou seja, visando um condicionamento numérico adequado ao problema, utilizou-se o método de continuação aplicado ao fluxo de potência trifásico a quatro condutores – MICQ, onde as impedâncias de falta que representam o defeito são os parâmetros de continuação.

Assim, para faltas do tipo *shunt*, parte-se de um valor elevado para a impedância de falta ($Z_f = 10^{10}$) até atingir o real valor de impedância da falta através de reduções sucessivas. O fluxo de potência inicial será praticamente o mesmo da condição pré-falta e, portanto, possui convergência garantida. Os fluxos de potência subsequentes serão realizados com as impedâncias de falta atualizadas de acordo com as Equações (9) e (10). Se após uma determinada atualização (redução) não houver a convergência do fluxo de carga, retorna-se ao ponto anterior utilizando um novo valor para alfa na Equação (10).

Procedimento similar é utilizado para faltas do tipo série, parte-se de um valor desprezível para a impedância de falta ($Z_f = 10^{-10}$) até atingir, após sucessivos incrementos, o valor de circuito aberto ($Z_f = 10^{10}$).

Defeitos simultâneos são calculados através da análise seqüencial dos eventos. Ou seja, para uma representação de uma abertura de linha com queda do condutor ao solo, utiliza-se a matriz representativa de abertura de linha nas fases desejadas e executa-se o fluxo de potência continuado até obter a solução. Em seguida, inclui-se a matriz de admitância de barras que representa o defeito em derivação, e executa-se novamente a metodologia, obtendo a análise final do sistema diante destes defeitos

$$Z_f^{(h)} = Z_f^{(h-1)} \cdot F \quad (9)$$

$$F = e^{x \cdot (\alpha/n)} \quad (10)$$

onde:

Z_f : Impedância da falta

h : Número de atualizações da impedância de falta

α : Passo de continuação

n : Número de iterações do fluxo de potência em (h-1)

$x = +1$, para defeito série (incremento impedância falta);

$x = -1$, para defeito shunt (redução impedância falta).

5. Resultados

Com o objetivo de verificar a eficiência da metodologia proposta foram realizados testes em sistemas elétricos reais de baixa e alta tensão. As simulações mostram que, além da robustez numérica, o algoritmo, possui grande flexibilidade podendo ser aplicado em um espectro amplo de problemas envolvendo defeitos.

A. Sistema de Fornecimento Ininterrupto de Energia - UPS.

Este estudo de caso apresenta a simulação de uma falta série real que ocorreu no sistema de alimentação segura de uma indústria (usina siderúrgica da ArcelorMittal Tubarão). A Figura 7

apresenta o diagrama simplificado do sistema composto por uma UPS industrial de 20kVA e por um transformador de “by-pass”.

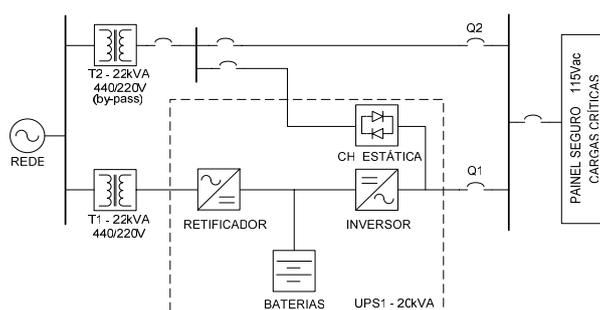


Figura 7 - Diagrama Simplificado do Sistema de Fornecimento Ininterrupto de Energia - UPS.

Em condição normal de operação, o painel das cargas críticas é alimentado via UPS (transformador T1). Porém, para sanar uma pendência do projeto, havia a necessidade de desligar a UPS e transferir a alimentação para o transformador do by-pass (transformador T2). A transferência é realizada através do paralelismo momentâneo dos disjuntores Q1 e Q2, de forma a não haver pique de energia nas cargas. No entanto, o neutro do transformador T2 do circuito do disjuntor Q2 foi seccionado inadvertidamente durante a preparação para execução da atividade. Desta forma, quando o paralelo foi desfeito (abertura Q1) o sistema perdeu o condutor de neutro causando grande desequilíbrio nas tensões.

Tendo em vista o defeito série no neutro e que as ferramentas convencionais para análise de rede não suportavam esta análise, aplicou-se a metodologia proposta para simular o caso em questão. A simulação do defeito foi realizada a partir da condição pré-falta, onde foi aplicado um defeito série de seccionamento do cabo neutro do transformador T2. A Tabela III contém os valores das tensões e correntes pré-falta no painel de cargas críticas. Os resultados mostraram que a distribuição das cargas entre as fases estava muito desigual havia ocorrido na prática, com cerca de 10A na fase A e apenas 1A nas fases B e C. A corrente de retorno pelo neutro era de 9A.

Tabela III

Tensões e correntes pré-falta no painel de cargas críticas

TENSÃO			CORRENTE		
Fase	(V)	θ (°)	Fase	(A)	θ (°)
V_{an}	126.406	29.349	I_a	10.047	29.349
V_{bn}	126.931	-90.053	I_b	1.000	-90.053
V_{cn}	126.942	149.920	I_c	1.000	149.920
V_n	0.000	-169.822	I_n	9.047	-150.716

Após o seccionamento do neutro, conforme verificado em campo, houve sobretensão nas fases menos carregadas (B e C) e subtensão na fase de maior carregamento, conforme Tabela IV. O desequilíbrio das tensões trouxe graves conseqüências para a usina, pois a sobretensão de 1,52pu (193V) nas fases B e C provocou a queima do PLC do controle de processo da torre de queima nº4 de gás do Alto-Forno (BFG), além da queima do computador da estação do sistema supervisor do gerador diesel de emergência da usina. Na fase A, a tensão caiu para apenas 0,25pu (31,5V), o que provocou o desligamento de todas as cargas conectadas a esta fase, incluindo o controle de processo da ERPO (estação redutora de pressão de oxigênio para o Alto-Forno).

Tabela IV

Tensões e correntes no painel de cargas críticas após seccionamento do neutro

TENSÃO			CORRENTE		
Fase	(V)	θ (°)	Fase	(A)	θ (°)
V_{an}	31.506	29.886	I_a	2.504	29.886

V_{bn}	193.052	-115.401	I_b	1.522	-115.401
V_{cn}	193.215	175.201	I_c	1.5228	175.201
V_n	47.684	-29.896	I_n	0.000	-164.883

A simulação deste defeito permitiu uma perfeita análise do distúrbio que provocou a queima de alguns equipamentos e desligamento de outros, mostrando que a metodologia proposta pode ser aplicada a qualquer tipo de sistema elétrico, sendo uma ferramenta muito útil para os engenheiros na análise de faltas.

B- Sistema Industrial Real Interligado a Concessionária de Energia.

Neste estudo de caso foi modelado o sistema elétrico real de 138kV da Usina Siderúrgica da ArcelorMittal Tubarão, localizada em Serra-ES, interligado com a concessionária local de energia, sistema ESCELSA. A planta da ArcelorMittal Tubarão possui geração interna de aproximadamente 502MW, sendo auto-suficiente em energia, exportando o excedente (cerca de 120MW) para o sistema ESCELSA via duas linhas de transmissão de 138kV que se originam da subestação abaixadora de Pitanga (345/138kV). A Figura 7 contém o diagrama unifilar simplificado do sistema de 138kV analisado. Os dados deste sistema podem ser obtidos em [23].

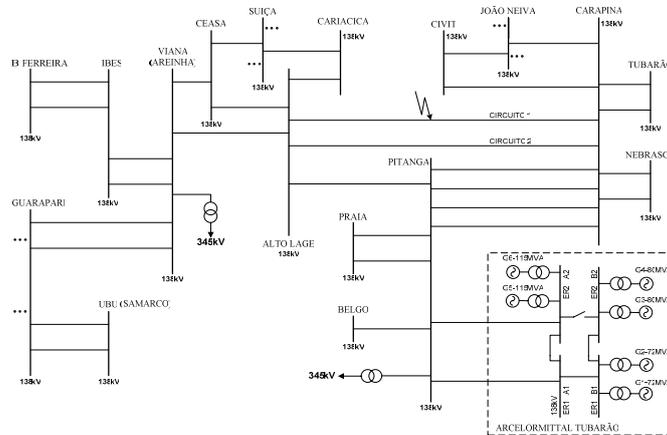


Figura 7 - Diagrama Unifilar do Sistema 138kV.

O objetivo do estudo é avaliar o impacto da representação da carga no afundamento de tensão provocado por defeitos ocorridos no sistema ESCELSA. Para tanto, foi simulada uma falta monofásica real ocorrida no dia 01/03/2008, às 19:03hs. Este defeito atingiu a fase C do circuito 1 da linha Alto Lage x Carapina. A Figura 8 contém a oscilografia da tensão na barra ER1-A1 medida pelo relé de proteção GE-Multilin SR-750. Dentre outras funções, este relé realiza a proteção de subtensão de sistema (função 27), desligando a interligação entre ER1-A1 e ER1-B1 quando ocorrem defeitos no sistema ESCELSA. Atualmente, o *pickup* desta proteção de subtensão está ajustado em 0,85pu. O instante $t = 0ms$ da Figura 8 indica o ponto onde houve a atuação do relé (*trip*).

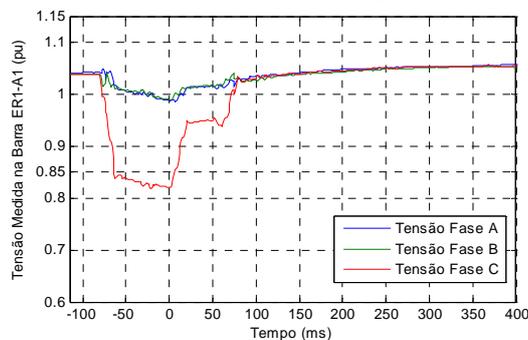


Figura 8 – Oscilografia da tensão na Barra ER1-A1 durante falta monofásica no circuito 1 da linha Alto Lage x Caparina.

Para verificar a queda de tensão na barra ER1-A1 utilizando a metodologia proposta, foram realizadas duas simulações. A primeira considera a carga modelada como impedância constante e a segunda considera a carga como potência constante. A Tabela V contém os resultados das tensões em todas as barras do sistema sob falta para ambas as simulações. A Figura 9 ilustra a diferença percentual das tensões calculadas considerando a carga como impedância constante e potência constante.

Tabela V
Valores de tensão para curto-circuito fase-terra na fase C da linha

S/E	VA (pu)		VB (pu)		VC (pu)	
	Z_{CTE}	S_{CTE}	Z_{CTE}	S_{CTE}	Z_{CTE}	S_{CTE}
ER1 - A1	0,999	0,968	1,012	1,014	0,853	0,808
ER1 - B1	0,999	0,968	1,012	1,014	0,853	0,808
ER2 - A2	1,001	0,970	1,011	1,012	0,828	0,778
ER2 - B2	1,008	0,980	1,016	1,017	0,911	0,876
PITANGA	1,010	0,983	1,009	1,007	0,703	0,638
PRAIA	0,997	0,982	1,000	0,995	0,698	0,612
BELGO	1,002	0,982	1,004	1,000	0,700	0,623
CARAPINA	1,016	0,993	1,018	1,016	0,646	0,574
TUBARÃO	1,001	0,995	1,013	1,011	0,635	0,538
NEBRASCO	1,007	0,995	1,013	1,009	0,644	0,556
JOÃO NEIVA	0,947	0,927	0,978	0,980	0,627	0,547
CIVIT	0,995	0,986	1,007	1,001	0,641	0,551
ALTO LAGE	1,026	0,991	1,025	1,026	0,556	0,506
AREINHA	0,990	0,960	0,991	0,993	0,739	0,686
CEASA	1,002	0,974	1,006	1,005	0,637	0,580
SUIÇA	0,992	0,978	1,003	0,998	0,599	0,515
IBES	0,980	0,960	0,984	0,981	0,733	0,666
B. FERREIRA	0,977	0,959	0,982	0,978	0,731	0,659
GUARAPARI	0,965	0,953	0,971	0,967	0,724	0,628
CARIACICA	1,019	0,987	1,021	1,022	0,561	0,507
UBU	0,948	0,947	0,957	0,951	0,713	0,590

onde:

Z_{CTE} : representa os resultados das tensões nas barras para a carga modelada como impedância constante.

S_{CTE} : representa os resultados das tensões nas barras para a carga modelada como potência constante.

Conforme pode ser observado, diferenças substanciais podem ocorrer. Quando se considera a carga como impedância constante, a tensão na fase defeituosa da barra ER1-A1 é de 0,853pu, estando no limiar de não-atuação do relé de subtensão (0,85 pu). Porém, considerando a carga como potência constante, a tensão atinge 0,808pu, valor próximo ao real que foi de 0,82pu, indicando que modelar a carga como impedância constante pode acarretar em erros significativos.

A influência do modelo de carga foi bem maior em outras subestações do sistema ESCELSA do que propriamente no sistema da ArcelorMittal Tubarão. A maior diferença de tensão observada foi de 17,32% na subestação de UBU que está eletricamente mais afastada do local de defeito. Este caso prático mostra a importância da correta representação da carga, evidenciado a potencialidade da metodologia proposta, especialmente para estudos onde é necessário analisar os impactos de uma falta em todo o sistema.

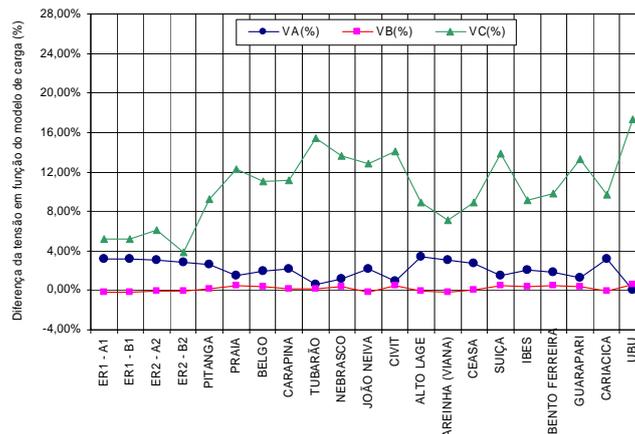


Figura 9 – Diferença nos resultados das simulações com a carga representada como impedância constante e potência constante

A Figura 10 apresenta o trajeto percorrido pela impedância de falta durante o processo do fluxo de potência continuado. Conforme pode ser observado, a impedância de falta parte de um valor elevado ($Z_{fA} = 10^{+10}$) até atingir o valor de curto-circuito sólido ($Z_{fA} = 10^{-10}$), após 19 atualizações.

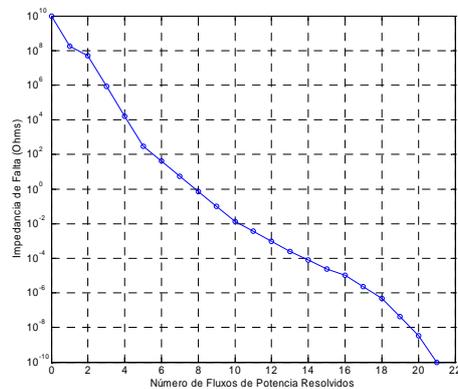


Figura 10 – Variação da impedância de falta durante o processo do fluxo de potência continuado.

6. Conclusões

Neste artigo foi apresentada uma formulação para o cálculo de defeitos em sistemas trifásicos desequilibrados a quatro condutores (3 fases e o neutro). Defeitos shunt, série e simultâneos são modeladas através de matrizes de admitâncias que são inseridas na matriz de admitância de barra do sistema. Os problemas relativos ao condicionamento numérico são contornados através da utilização da técnica do fluxo de potência continuado, onde a atualização dos valores das admitâncias de falta garante a convergência do processo.

A representação explícita dos condutores de neutro e dos aterramentos das barras e dos neutros dos transformadores permite calcular diretamente as tensões e correntes de neutros e aterramentos do sistema sob falta. Adicionalmente, a importância da representação do modelo de carga na análise de defeitos foi investigada, mostrando a aplicabilidade da ferramenta proposta em estudos de aprofundamento de tensão.

O método desenvolvido para análise de faltas pode ser aplicado em qualquer tipo de sistema elétrico, equilibrado ou desequilibrado, radial ou reticulado, com três ou quatro condutores, com aterramentos das mais diversas formas, com neutro isolado, com cargas ou ramais monofásicos, bifásicos e trifásicos. Pode ser aplicado em sistemas de transmissão, subtransmissão e possui especial potencial para análise de sistemas de distribuição e industrial.

7. Referências bibliográficas

- [1] P. M. Anderson, "Analysis of Faulted Power Systems," IEEE Press Series on Power Engineering, 1995, pp. 251-255.
- [2] Willian D. Stevenson, "Elements of Power system Analysis" McGraw-Hill, 1982.
- [3] J.M. Undrill and T.E. Kostynaik. "Advanced Power System Fault Analysis Method". IEEE Transactions on PAS, 1975.
- [4] M. A. Laughton, "Analysis of Unbalanced Polyphase Networks by the method of phase co-ordinates, part 1: System representation in phase frame of reference". Proceedings of IEE, Vol. 115, No. 8, pp. 1163-1172, August 1968.
- [5] M. A. Laughton, "Analysis of Unbalanced Polyphase Networks by the Method of Phase Co-ordinates, part 2: Fault Analysis." Proceedings of IEE, Vol. 116, No. 6, pp. 857-865, May 1969.
- [6] P. K. Dash. "Analysis of Power Systems by Phase Impedance Matrix Method: Part 1 and 2". Proc. IEEE, Vol. 91, No. 2, pp. 592-610, February 1972.
- [7] Alex Berman and Wilsun Xu. "Analysis of Faulted Power Systems By Phase Coordinates". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.13, No. 2, April 1998.
- [8] Tsai-Hsiang Chen et al. "Distribution System Short Circuit Analysis – A Rigid Approach". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. 1, February 1992.
- [9] S.M. Halpin et al. "An improved Fault Analysis Algorithm for Unbalanced Multi-Phase Power Distribution Systems". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 3, July 1994.
- [10] X. Zhang et al. "A Distribution Short Circuit Analysis Approach Using Hybrid Compensation Method". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 4, February 1995.
- [11] Y. Mao and K. Miu. "Radial distribution Short Circuit Analysis with Lateral and Load Equivalencing: Solution Algorithms and Numerical Results. 2000 IEEE PES Summer Meeting, Vol.1, pp. 449-453, 2000.
- [12] S. M. Souza, P. A. N. Garcia, M. P. Vinagre, J.L.R. Pereira, S. Carneiro Jr., Análise Trifásica de Falhas em Sistemas de Distribuição Utilizando-se o Método de Injeção de Corrente. In: XV Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica - SENDI, 2002, Salvador.
- [13] T. Chen and W. Yang, "Analysis of Multi-Grounded Four-Wire Distribution Systems Considering the Neutral Grounding", IEEE Transactions on Power Delivery, v. 16, n. 4, pp. 710 – 717, October 2001.
- [14] J. C. Balda et al., "Measurements of Neutral Currents and Voltages on a Distribution Feeder", IEEE Transactions on Power Delivery, v. 12, n. 4, pp. 1799 – 1804, October 1997.
- [15] A. P. S. Meliopoulos et al. "Power Distribution Practices in USA and Europe: Impact on Power Quality", Proc. Int. Conf. Harmon. Quality Power, v. 1, pp. 24 – 29, 1998.
- [16] J. M. Carvalho Filho; T. C. Oliveira, R. C. Leborgne, J. P. G. Abreu, Análise Comparativa de Simulações e Medições de Afundamentos de Tensão. In: XIV Congresso Brasileiro de Automática, Natal. 2002.
- [17] Wilsun Xu. Component Modeling Issues for Power Quality Assessment. IEEE Power Engineering Review, November 2001.
- [18] Garcia, P. A. N., Pereira, J. L. R., Carneiro, Jr. S., Costa V. M., Martins N., Three-phase Power Flow Calculations Using the Current Injection Method, IEEE Transactions on Power Systems, vol 15, n. 2, May 2000, pp 508-514.
- [19] D. R. R. Penido, L. R. Araujo, J. L. R. Pereira, P. A. N. Garcia, and S. Carneiro Jr., "Four wire Newton-Raphson power flow based on the current injection method," IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, Vol. 1, pp. 239-242, Oct. 2004.
- [20] W. W. Price et al. Standard load models for power flow and dynamic performance simulation. IEEE Transactions on Power Systems, 10(3):1302-1313. August 1995.
- [21] G. W. Stagg, and A. H. El-Abiad, Computer Methods in Power System Analysis. International Student Edition. McGraw-Hill, 1968.
- [22] <http://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders.html>.
- [23] http://www.ons.com.br/operacao/base_dados_curtoc_referencia.aspx