

Análise Trifásica de Falhas em Sistemas de Distribuição Utilizando-se o Método de Injeção de Corrente

Suzana M. de Souza – UFJF, Marcio P. Vinagre – UFJF, Paulo Augusto N. Garcia – UFJF, José Luiz R. Pereira – UFJF, Sandoval Carneiro Jr. – UFRJ, Leonardo Barros - UFJF.

E-mail: pgarcia@lacee.ufjf.br

Palavras-chave – cálculo de faltas, coordenadas de fase, faltas simultâneas, sistemas de distribuição.

Resumo – Este artigo apresenta uma formulação alternativa para análise e diagnóstico de faltas. Esta metodologia é baseada no fluxo de potência pelo método de injeção de correntes trifásicas – MICT e permite a análise de sistemas trifásicos desbalanceados na presença de qualquer tipo de falta. Foram realizados testes em sistemas didáticos e em sistemas reais e se constatou a eficiência da metodologia proposta. Foram realizadas também comparações com a metodologia convencional em componentes simétricas, verificando-se grandes vantagens da formulação proposta.

1. INTRODUÇÃO

A análise de faltas em sistemas elétricos de potência é normalmente realizada utilizando-se componentes simétricas [1, 2]. Esta metodologia, devido principalmente às limitações dos recursos computacionais da época, foi extremamente difundida nas décadas de 70 e 80, sendo muito utilizada até os dias de hoje.

Quando o método das componentes simétricas é aplicado a sistemas com linhas monofásicas e bifásicas ou mesmo trifásicas que não sejam perfeitamente transpostas, características típicas de sistemas de distribuição, são introduzidos acoplamentos entre as componentes de seqüência, o que diminui substancialmente as vantagens deste método. Para contornar este problema utiliza-se simplificações que introduzem erros consideráveis [3] nos cálculos das faltas. Assim, novas metodologias onde tais limitações não são necessárias vem sendo desenvolvidas [4, 5].

Nos últimos anos, devido à grande evolução da informática, a utilização de ferramentas de análise de sistemas de potência utilizando coordenadas de fase ganhou novo impulso. Em se tratando de sistemas de transmissão, o uso de programas para análise de transitórios eletromagnéticos como EMTP e ATP passaram a ser utilizados com maior freqüência. Em regime permanente, vem sendo desenvolvidos métodos não iterativos utilizando a matriz admitância de barras na forma trifásica [6].

Para sistemas de distribuição, devido aos desequilíbrios característicos destes sistemas, o número de algoritmos desenvolvidos e apresentados na última década foi bem maior, principalmente adotando-se metodologias

baseadas no método da varredura [7, 8, 9, 10, 11]. Normalmente, estes métodos se aplicam somente a sistemas radiais com uma única fonte de alimentação. Contudo, devido à desregulamentação que o setor elétrico vem experimentando, novas concepções operacionais vem sendo propostas, tais como geração distribuída, geração dispersa e integração da distribuição à subtransmissão [13, 14]. Estas novas condições operativas inviabilizam definitivamente a aplicação de algoritmos baseados no método de varredura [15].

Neste trabalho apresenta-se uma poderosa ferramenta para análise e diagnóstico de faltas. Esta metodologia é baseada no fluxo de potência trifásico por injeção de corrente – MICT [16, 17] e permite a análise de sistemas trifásicos desbalanceados onde são considerados modelos completos da rede, incluindo ramais monofásicos e bifásicos, rede secundária, transformadores, etc. Adicionalmente, as cargas podem ser representadas por qualquer tipo de modelo.

A metodologia foi aplicada com sucesso em sistemas reais de distribuição, onde se constatou grande eficácia e robustez numérica. Foram estudados diversos tipos de faltas, simples e simultâneas, evidenciando-se o poder da ferramenta na análise de faltas em sistemas de distribuição.

2. MODELAGEM TRIFÁSICA DA REDE

2.1. Modelos de linhas

Para análise em regime permanente as linhas trifásicas são representadas pelo tradicional modelo “pi-equivalente” conforme ilustra a Figura 1.

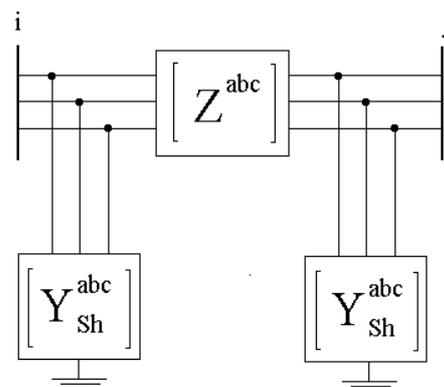


Figura 1 - Circuito pi-equivalente de uma linha trifásica

Os elementos do circuito da Figura 1 são matrizes 3x3 dadas por:

$$[Z_{ij}^{abc}] = \begin{bmatrix} Z_{ij}^{aa} & Z_{ij}^{ab} & Z_{ij}^{ac} \\ Z_{ij}^{ba} & Z_{ij}^{bb} & Z_{ij}^{bc} \\ Z_{ij}^{ca} & Z_{ij}^{cb} & Z_{ij}^{cc} \end{bmatrix} [Y_{ij}^{abc}] = j \begin{bmatrix} b_{sh_{ij}}^{aa} & b_{sh_{ij}}^{ab} & b_{sh_{ij}}^{ac} \\ b_{sh_{ij}}^{ba} & b_{sh_{ij}}^{bb} & b_{sh_{ij}}^{bc} \\ b_{sh_{ij}}^{ca} & b_{sh_{ij}}^{cb} & b_{sh_{ij}}^{cc} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Para representar derivações monofásicas e bifásicas adota-se o artifício de substituir a impedância da fase inexistente por um número de valor elevado (por exemplo, 10^{15}). Dessa forma, para um ramo bifásico constituído pelas fases *a* e *b*, tem-se:

$$[Z_{ij}^{abc}] = \begin{bmatrix} Z_{ij}^{aa} & Z_{ij}^{ab} & 0 \\ Z_{ij}^{ba} & Z_{ij}^{bb} & 0 \\ 0 & 0 & 10^{15} \end{bmatrix} \quad (2)$$

2.2. Modelos de carga

Para análise trifásica de sistemas de potência, deve-se considerar dois tipos básicos de conexão para as cargas: conexão estrela aterrada e conexão delta. No presente trabalho ambas conexões estão contempladas. As cargas monofásicas são conectadas entre uma fase e o retorno e as bifásicas e trifásicas através da ligação estrela.

Além disso, é desejável representar o efeito da tensão. No fluxo de carga adotou-se o modelo polinomial onde são combinados os modelos potência constante, corrente constante e impedância constante. No cálculo de faltas, as cargas são consideradas impedância constante durante todo o processo iterativo. Uma vez atingida a convergência, atualizam-se as cargas de acordo com o modelo a ser adotado, ou seja, potência constante, corrente constante, impedância constante ou qualquer combinação entre estes.

2.3. Capacitores em Derivação

Capacitores em derivação normalmente são trifásicos e ligados em estrela com neutro aterrado. Todavia no presente trabalho permite-se a representação de capacitores monofásicos e bifásicos sendo estes representados por suas respectivas admitâncias ligadas em estrela.

2.4. Co-geração

Dentro da nova filosofia de aproveitamento energético o número de unidades cogeneradoras vem crescendo substancialmente. Estas unidades cogeneradoras podem conter geradores síncronos ou de indução. Como na maioria das metodologias de análise de faltas, neste trabalho os geradores também são representados por uma fonte de tensão constante atrás de sua reatância transitória. Contudo, 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. Dessa forma, a representação trifásica de geradores é dada pela Figura 2.

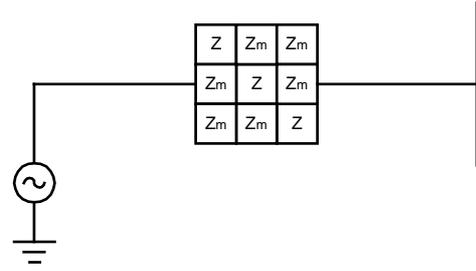


Figura 2 - Representação de geradores

2.5. Transformadores

Uma correta representação dos transformadores é de vital importância no cálculo de faltas em sistemas de distribuição. No presente trabalho os transformadores são representados por suas matrizes admitância de barras, que são definidas a partir das conexões conforme mostrado na Tabela I.

TABELA I

TIPOS DE CONEXÃO DE TRANSFORMADORES

Tipo de Conexão		Admitância Própria		Admitância Mútua	
Barra P	Barra S	Y_p^{abc}	Y_s^{abc}	Y_{ps}^{abc}	Y_{sp}^{abc}
Y_{aterrado}	Y_{aterrado}	Y_I	Y_I	$-Y_I$	$-Y_I$
Y_{aterrado}	Y	Y_{II}	Y_{II}	$-Y_{II}$	$-Y_{II}$
Y_{aterrado}	Delta	Y_I	Y_{II}	Y_{III}	Y_{III}^t
Y	Y	Y_{II}	Y_{II}	$-Y_{II}$	$-Y_{II}$
Y	Delta	Y_{II}	Y_{II}	Y_{III}	Y_{III}^t
Delta	Y_{aterrado}	Y_{II}	Y_I	Y_{III}^t	Y_{III}^t
Delta	Delta	Y_{II}	Y_{II}	$-Y_{II}^t$	$-Y_{II}$

onde:

$$Y_{barra} = \begin{bmatrix} Y_p & Y_{ps} \\ Y_{sp} & Y_s \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$Y_I = \begin{bmatrix} y_t & 0 & 0 \\ 0 & y_t & 0 \\ 0 & 0 & y_t \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$Y_{II} = \frac{I}{3} \begin{bmatrix} 2y_t & -y_t & -y_t \\ -y_t & 2y_t & -y_t \\ -y_t & -y_t & 2y_t \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$Y_{III} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} -y_t & y_t & 0 \\ 0 & -y_t & y_t \\ y_t & 0 & -y_t \end{bmatrix} \quad (6)$$

y_t : Admitância de dispersão

3. FLUXO DE POTÊNCIA PELO MÉTODO DE INJEÇÃO DE CORRENTES TRIFÁSICO (MICT)

Visto que a nova metodologia para cálculo de faltas é baseada no MICT, é necessário o conhecimento deste método. Dessa forma, nesta seção apresenta-se, de forma sucinta, o MICT e suas principais características.

Para tal, considere uma barra k do tipo PQ onde os resíduos de corrente nas fases a , b e c são determinados por:

$$\Delta I_k^s = \frac{(P_k^{sp})^s - j \cdot (Q_k^{sp})^s}{(E_k^s)^*} - \sum_{i \in \Omega_k} \sum_{t \in \alpha_p} Y_{ki}^{st} E_i^t \quad (7)$$

onde:

$$s, t \in \alpha_p$$

$$\alpha_p = \{a, b, c\}$$

$Y_{ki}^{st} = G_{ki}^{st} + jB_{ki}^{st}$: Elemento da matriz admitância nodal.

$$E_k^s = V_{r_k}^s + jV_{m_k}^s$$

$$(P_k^{sp})^s = P_{g_k}^s - P_{l_k}^s$$

$$(Q_k^{sp})^s = Q_{g_k}^s - Q_{l_k}^s$$

$(P_k^{sp})^s, (Q_k^{sp})^s$: Potências ativa e reativa especificadas para a fase s da barra k .

$P_{g_k}^s, Q_{g_k}^s$: Potências ativa e reativa geradas na a fase s da barra k .

$P_{l_k}^s, Q_{l_k}^s$: Potências ativa e reativa da carga na fase s da barra k .

O modelo de carga adotado é do tipo polinomial. Desta forma o efeito da variação de tensão sobre as cargas é representado por:

$$P_{l_k}^s = P_{0_k}^s + P_{l_k}^s V_k^s + P_{2_k}^s (V_k^s)^2 \quad (8)$$

$$Q_{l_k}^s = Q_{0_k}^s + Q_{l_k}^s V_k^s + Q_{2_k}^s (V_k^s)^2 \quad (9)$$

Dividindo-se a equação (7) em partes real e imaginária e aplicando o método de Newton-Raphson nas equações resultantes, obtém-se a seguinte equação matricial:

$$\begin{bmatrix} \Delta I_{m_1}^{abc} \\ \Delta I_{r_1}^{abc} \\ \Delta I_{m_2}^{abc} \\ \Delta I_{r_2}^{abc} \\ \vdots \\ \Delta I_{m_n}^{abc} \\ \Delta I_{r_n}^{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (Y_{11}^*)^{abc} & Y_{12}^{abc} & \Lambda & Y_{1n}^{abc} \\ Y_{21}^{abc} & (Y_{22}^*)^{abc} & \Lambda & Y_{23}^{abc} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{n1}^{abc} & Y_{n2}^{abc} & \Lambda & (Y_{nn}^*)^{abc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_{r_1}^{abc} \\ \Delta V_{m_1}^{abc} \\ \Delta V_{r_2}^{abc} \\ \Delta V_{m_2}^{abc} \\ \vdots \\ \Delta V_{r_n}^{abc} \\ \Delta V_{m_n}^{abc} \end{bmatrix} \quad (10)$$

onde:

$\Delta I_{r_k}^{abc}, \Delta I_{m_k}^{abc}$: Vetores dos resíduos da corrente real e imaginário respectivamente.

Os elementos fora da diagonal principal da matriz jacobiana são idênticos aos correspondentes elementos da matriz admitância de barras. Para modelagem trifásica em coordenadas retangulares estes elementos têm dimensão (6×6) e possuem a seguinte estrutura:

$$Y_{im}^{abc} = \begin{bmatrix} B_{im}^{abc} & G_{im}^{abc} \\ G_{im}^{abc} & -B_{im}^{abc} \end{bmatrix}; i, m = l, \Lambda, n \quad (11)$$

Já os elementos diagonais da matriz jacobiana $(Y_{kk}^*)^{abc}$ determinam a dependência da matriz jacobiana com o modelo de carga adotado [14].

Os resíduos de corrente na Equação (10), para fase s ($s = \{a, b, c\}$) da barra k , são calculados da seguinte forma:

$$\Delta I_{r_k}^s = \frac{V_{r_k}^s \Delta P_k^s + V_{m_k}^s \Delta Q_k^s}{(V_{r_k}^s)^2 + (V_{m_k}^s)^2} \quad (12)$$

$$\Delta I_{m_k}^s = \frac{V_{m_k}^s \Delta P_k^s - V_{r_k}^s \Delta Q_k^s}{(V_{r_k}^s)^2 + (V_{m_k}^s)^2} \quad (13)$$

Os resíduos de potência ativa ΔP_k^s e reativa ΔQ_k^s em (12) e (13) são dados por:

$$\Delta P_k^s = (\Delta P_k^{sp})^s - (\Delta P_k^{calc})^s \quad (14)$$

$$\Delta Q_k^s = (\Delta Q_k^{sp})^s - (\Delta Q_k^{calc})^s \quad (15)$$

onde:

$$(\Delta P_k^{calc})^s = V_{r_k}^s (I_{r_k}^{calc})^s + V_{m_k}^s (I_{m_k}^{calc})^s \quad (16)$$

$$(\Delta Q_k^{calc})^s = V_{m_k}^s (I_{r_k}^{calc})^s - V_{r_k}^s (I_{m_k}^{calc})^s \quad (17)$$

Para representação de barras PV no método de injeção de corrente (MICT), é necessária a inclusão de novas equações para representar o controle das tensões através da geração de potência reativa. Conseqüentemente a potência reativa trifásica é introduzida como uma nova variável de estado. As equações adicionais de controle são dadas por:

$$(V_k^s)^2 = (V_{r_k}^s)^2 + (V_{m_k}^s)^2 \quad (18)$$

4.1. Faltas Shunt

Todos os tipos de faltas *shunt* podem ser obtidos manipulando-se as impedâncias Z_a , Z_b , Z_c e Z_g , da Figura 3.

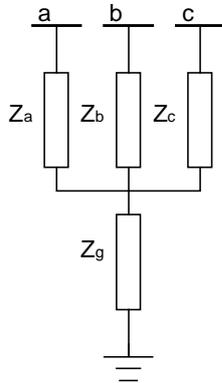


Figura 3 - Representação de Faltas Shunt

A matriz admitância de barras relativa a Figura 3 é expressa por:

$$Y_{bus3\phi} = X \begin{bmatrix} Y_a(Y_b + Y_c + Y_g) & -Y_a Y_b & -Y_a Y_c \\ -Y_a Y_b & Y_b(Y_a + Y_c + Y_g) & -Y_b Y_c \\ -Y_a Y_c & -Y_b Y_c & Y_c(Y_a + Y_b + Y_g) \end{bmatrix} \quad (27)$$

onde:

$$X = \frac{1}{Y_a + Y_b + Y_c + Y_g} \quad (28)$$

$$Y_a = \frac{1}{Z_a}, Y_b = \frac{1}{Z_b}, Y_c = \frac{1}{Z_c}, Y_g = \frac{1}{Z_g} \quad (29)$$

A partir da equação (27) pode-se estabelecer a matriz admitância de barras para qualquer tipo de falta shunt. Isto é realizado abrindo ou curto-circuitando os elementos Z_a , Z_b , Z_c e Z_g , ou seja, fazendo as impedâncias tenderem a infinito ou a zero respectivamente.

A seguir, para cada tipo de falta shunt, o circuito equivalente e os valores das impedâncias são dados pelas Tabelas II, IV, VI, VIII e X. As respectivas matrizes admitância de barras são descritas nas Tabelas III, V, VII, IX e XI.

4.1.1. Curto-circuito Trifásico Terra

TABELA II

CIRCUITO EQUIVALENTE DO CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO TERRA	
Circuito Equivalente	Valores das Impedâncias
	$Z_a = Z_a;$ $Z_b = Z_b;$ $Z_c = Z_c;$ $Z_g = Z_g$

TABELA III

MATRIZ ADMITÂNCIA DE BARRAS PARA CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO-TERRA

Matriz Admitância de Barras	
$Y_{bus3\phi} = \frac{1}{Y_a + Y_b + Y_c + Y_g} \begin{bmatrix} Y_a(Y_b + Y_c + Y_g) & -Y_a Y_b & -Y_a Y_c \\ -Y_a Y_b & Y_b(Y_a + Y_c + Y_g) & -Y_b Y_c \\ -Y_a Y_c & -Y_b Y_c & Y_c(Y_a + Y_b + Y_g) \end{bmatrix}$	

4.1.2. Curto-circuito Trifásico

TABELA IV

CIRCUITO EQUIVALENTE DO CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO	
Circuito Equivalente	Valores das Impedâncias
	$Z_a = Z_a;$ $Z_b = Z_b;$ $Z_c = Z_c;$ $Z_g \rightarrow \infty$

TABELA V

MATRIZ ADMITÂNCIA DE BARRAS PARA CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO

Matriz Admitância de Barras	
$\frac{1}{Y_a + Y_b + Y_c} \begin{bmatrix} Y_a(Y_b + Y_c) & -Y_a Y_b & -Y_a Y_c \\ -Y_a Y_b & Y_b(Y_a + Y_c) & -Y_b Y_c \\ -Y_a Y_c & -Y_b Y_c & Y_c(Y_a + Y_b) \end{bmatrix}$	

4.1.3. Curto-circuito Bifásico Terra

TABELA VI

CIRCUITO EQUIVALENTE DO CURTO-CIRCUITO BIFÁSICO-TERRA	
Circuito Equivalente	Valores das Impedâncias
	$Z_a \rightarrow \infty;$ $Z_b = Z_b;$ $Z_c = Z_c;$ $Z_g = Z_g$

TABELA VII

MATRIZ ADMITÂNCIA DE BARRAS PARA CURTO-CIRCUITO BIFÁSICO-TERRA

Matriz Admitância de Barras	
$Y_{bus3\phi} = \frac{1}{Y_b + Y_c + Y_g} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_b(Y_c + Y_g) & -Y_b Y_c \\ 0 & -Y_b Y_c & Y_c(Y_b + Y_g) \end{bmatrix}$	

4.1.4. Curto-circuito Bifásico

TABELA VIII

CIRCUITO EQUIVALENTE DO CURTO-CIRCUITO BIFÁSICO	
Circuito Equivalente	Valores das Impedâncias
	$Z_a \rightarrow \infty;$ $Z_b = Z_b;$ $Z_c = Z_c;$ $Z_g \rightarrow \infty$

TABELA IX

MATRIZ ADMITÂNCIA DE BARRAS PARA CURTO-CIRCUITO BIFÁSICO	
Matriz Admitância de Barras	
$Y_{bus3\phi} = \frac{Y_b Y_c}{Y_b + Y_c}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}$

4.1.5. Curto-circuito monofásico

TABELA X

CIRCUITO EQUIVALENTE DO CURTO-CIRCUITO MONOFÁSICO	
Circuito Equivalente	Valores das Impedâncias
	$Z_a = Z_a$ $Z_b \rightarrow \infty$ $Z_c \rightarrow \infty$ $Z_g = Z_g$

TABELA XI

MATRIZ ADMITÂNCIA DE BARRAS PARA CURTO-CIRCUITO MONOFÁSICO	
Matriz Admitância de Barras	
$Y_a Y_g$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$

4.2. Falta série

Para representação de faltas do tipo série, adota-se o circuito trifásico da

Figura 4.

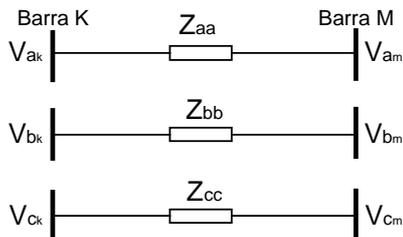


Figura 4 - Representação de faltas Série

Onde Z_{aa} , Z_{bb} e Z_{cc} são as impedâncias série da falta e tendem a zero quando representam estado normal de operação e a infinito quando representam abertura de linha. Uma abertura de linha pode ser representada em qualquer ponto de um ramo. Para representação da falta série é necessária a inclusão de duas novas barras no sistema, como é mostrado na Figura 5.

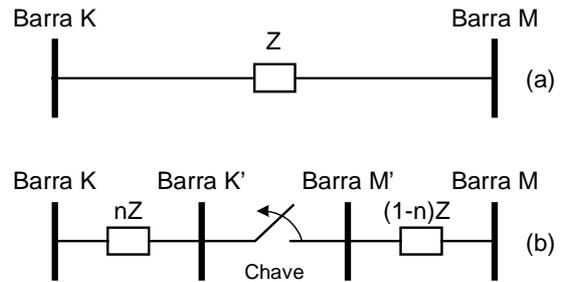


Figura 5 - (a) Configuração Original, (b) Abertura da chave

Como pode ser observado na Figura 5, são criadas duas novas barras K' e M' entre as barras da linha original KM . Com isso surgem duas novas linhas cujos valores das impedâncias são proporcionais à linha original KM e dependem do local onde ocorrerá a falta. Assim, a matriz de impedâncias série e *shunt* da nova linha KK' é n ($0 < n < 1$) vezes os correspondentes valores da linha original. Conseqüentemente, os valores das impedâncias série e *shunt* da nova linha MM' será $(1-n)$ vezes os valores da linha original KM .

Entre K' e M' temos a representação da chave (aberta ou fechada) utilizando-se o circuito da Figura 5. A abertura de linha pode ser homopolar ou trifásica. A matriz impedância de barras neste caso é uma matriz diagonal onde os elementos representam as impedâncias série de cada fase.

A seguir, para cada tipo de falta série, são apresentados os circuitos equivalentes e as respectivas matrizes de impedância de barras.

4.2.1. Abertura de uma fase

TABELA XII

CIRCUITO EQUIVALENTE E MATRIZ IMPEDÂNCIA PARA ABERTURA DE UMA FASE DA LINHA

Circuito Equivalente	Matriz de impedâncias
	$Z = \begin{bmatrix} \infty & & \\ & 0 & \\ & & 0 \end{bmatrix}$

4.2.2. Abertura de duas fases

TABELA XIII

CIRCUITO EQUIVALENTE E MATRIZ IMPEDÂNCIA PARA ABERTURA DE DUAS FASES DA LINHA

Circuito Equivalente	Matriz impedâncias	de
	$Z = \begin{bmatrix} \infty & & \\ & \infty & \\ & & 0 \end{bmatrix}$	

4.2.3. Abertura das três fases

TABELA XIV

CIRCUITO EQUIVALENTE E MATRIZ IMPEDÂNCIA PARA ABERTURA DA LINHA

Circuito Equivalente	Matriz impedâncias	de
	$Z = \begin{bmatrix} \infty & & \\ & \infty & \\ & & \infty \end{bmatrix}$	

4.3. Falta shunt e série simultâneas

Para representar faltas série e shunt simultaneamente basta considerar as matrizes admitâncias de barras dos tipos de faltas envolvidas. Como pode ser visto na Figura 6, para simular o rompimento de uma fase com contato com o solo, utiliza-se os modelos shunt e série mostrados nas seções 4.1 e 4.2 respectivamente.

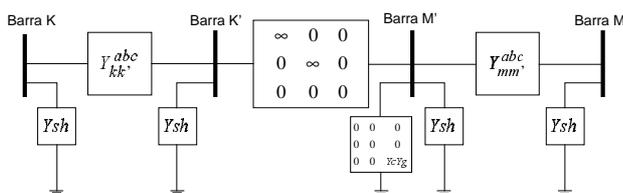


Figura 6 – Representação de falta shunt e série simultâneas

5. CONDICIONAMENTO NUMÉRICO

As maiores dificuldades de representação de faltas em coordenadas de fase encontram-se no condicionamento numérico do problema. No presente trabalho foram detectados dois problemas numéricos: (i) representação das impedâncias de falta; (ii) Determinação das condições iniciais no problema de fluxo de carga na presença de faltas. A seguir são descritas as metodologias propostas para a solução dos problemas relativos ao condicionamento numérico.

5.1- Representação das Impedâncias de Falta

Para evitar problemas numéricos as impedâncias de falta assumem os valores 10^{10} e 10^{-10} quando representam circuito aberto e curto-circuito respectivamente. Além disso, é necessário definir as variáveis com precisão dupla na implementação computacional.

5.2- Tratamento das condições iniciais

Quando um fluxo de carga é utilizado na análise de um sistema, principalmente para fluxo de potência baseado no método de Newton-Raphson, deve-se observar o condicionamento numérico do problema. Para casos onde as condições iniciais encontram-se longe do ponto de operação o problema de fluxo de potência pode divergir ou até mesmo caminhar para uma solução espúria.

Visto que nas barras eletricamente próximas ao defeito as condições pós-falta são, de forma geral, totalmente diferentes das condições pré-falta, 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.

Dessa forma, é necessário adotar artifícios numéricos visando um condicionamento numérico adequado ao problema. No presente trabalho adotou-se o método de continuação ao problema do fluxo de potência pelo método de injeção de correntes trifásico – MICT resultando em fluxo de potência continuado.

Assim, para faltas do tipo shunt, parte-se de um valor elevado para a impedância de falta e a partir de reduções sucessivas no valor da impedância de falta, soluciona-se diversos fluxos de potência até que o valor real da impedância de falta seja atingido.

A Figura 7 ilustra o processo de redução da impedância de falta. Como pode ser visto, a partir de um valor elevado para a impedância de falta ($Z_f=10^{10}$) soluciona-se um fluxo de potência. Este primeiro cálculo do fluxo de carga é praticamente o mesmo fluxo de carga utilizado para o cálculo das condições pré-falta, logo, a convergência está garantida. Atingindo-se a convergência em n iterações a impedância de falta é atualizada de acordo com as Equações (30) e (31) levando-a ao ponto **A** da curva através da trajetória indicada pela linha cheia. As curvas tracejadas indicam trajetórias possíveis para atualização da impedância de falta. Estas trajetórias dependem de α e do número de fluxos convergidos.

$$Z^{(h)} = Z^{(h-1)} F \quad (30)$$

$$F = e^{(-h/\alpha)} \quad (31)$$

onde:

h : Número de iterações do fluxo continuado

α : Passo do fluxo continuado

A partir do ponto **A** soluciona-se um novo fluxo de carga e obtendo-se a convergência repete-se o processo até que o valor real de Z_f seja atingido. Este processo de atualização da impedância de falta é realizado conforme a seqüência **ABCDE**. No entanto, como indicado na Figura 7, quando adotou-se a trajetória **BC'** a impedância de

falta $Z_f^{(3)}$ foi inadequada e levou à divergência do fluxo de potência. Assim foi necessário retornar ao ponto **B**, utilizando-se um novo valor para alfa na Equação (31) que resultou em um $Z_f^{(3)}$ correspondente ao ponto **C**.

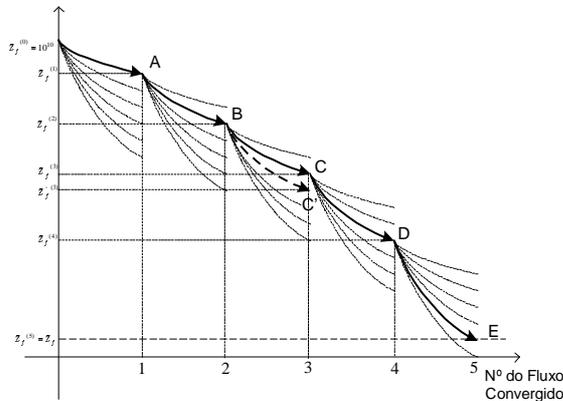
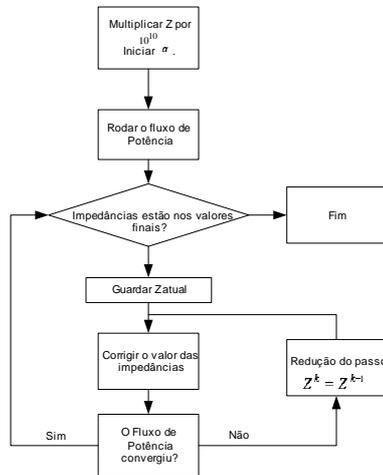


Figura 7 – Gráfico $Z_f x$ Números de Fluxos Convergidoss

Assim, através desse processo de fluxo de potência continuado determina-se as condições pós-falta sem os problemas de condicionamento numérico. Procedimento similar é usado para faltas do tipo série.

6. FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE CÁLCULO DE FALTAS



7. RESULTADOS

Com o objetivo de verificar a eficiência da metodologia proposta foram realizados testes em um sistema didático constituído de quatro barras, no sistema IEEE14 e em um sistema de distribuição real de propriedade da CEMIG.

A seguir são descritos os testes realizados e comparações com o método convencional utilizando componentes simétricas.

7.1. Sistema teste de 4 barras

Este sistema é composto de quatro barras conforme mostrado na Figura 8. As tabelas XV, XVI e XVII descrevem os dados de barras, dos geradores e das linhas respectivamente. Como pode ser observado este sistema é totalmente desequilibrado, ou seja, apresenta desequilíbrios nas impedâncias das linhas e nas cargas.

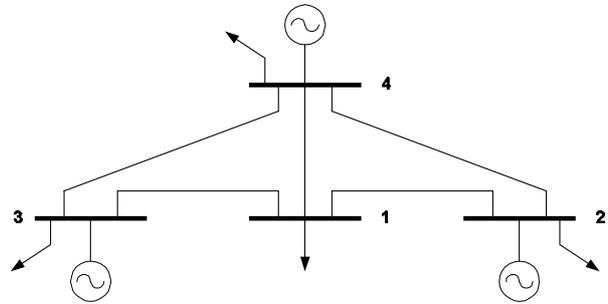


Figura 8 – Sistema de 4 barras e 3 geradores

TABELA XV

DADOS DE BARRAS DO SISTEMA TESTE 1		
Barras	Tensão (pu)	Carga (pu)
1	Va=1.0011 ∠-46.48°	As= 1.0 +j 0.4
	Vb=1.0003 ∠-166.62°	Sb= 1.0 +j 0.4
	Vc=0.9997 ∠73.40°	Sc= 1.0 +j 0.4
2	Va=1.0000 ∠-46.07°	As= 1.2 +j 0.5
	Vb=1.0000 ∠-166.07°	Sb= 1.2 +j 0.5
	Vc=1.0000 ∠73.93°	Sc= 1.2 +j 0.5
3	Va=1.0000 ∠-45.88°	Sa= 1.2 +j 0.5
	Vb=0.9998 ∠-165.88°	Sb= 1.2 +j 0.5
	Vc=0.9996 ∠74.1°	Sc= 1.2 +j 0.5
4	Va=1.0000 ∠-45.91°	Sa= 1.4 +j 0.6
	Vb=0.9998 ∠-165.91°	Sb= 1.4 +j 0.6
	Vc=0.9996 ∠74.07°	Sc= 1.4 +j 0.6

TABELA XVI

DADOS DOS GERADORES				
Barras	Reatância das Máquinas (pu)			Geração em (pu)
	+	-	0	
2	0.0408	0.0028	0.004	Sa=0.3701-j0.1056
				Sb=0.3731-j0.0993
				Sc=0.3857-j0.1063
3	0.092	0.0048	0.02	Sa=0.5435-j0.0632
				Sb=0.5497-j0.0622
				Sc=0.5552-j0.0721
4	0.112	0.0068	0.04	Sa=0.6693-j0.0646
				Sb=0.6753-j0.0636
				Sc=0.6775-j0.0719

TABELA XVII

DADOS DE LINHA

De	Para	Impedância série (pu)	Admitância Shunt (pu)
1	2	Z_I	Y_I
1	3		
1	4		
2	4	Z_{II}	Y_{II}
3	4		

onde:

$$Z_I = \begin{pmatrix} 0.006 + j0.045 & 0.002 + j0.015 & 0.001 + j0.017 \\ 0.002 + j0.015 & 0.006 + j0.05 & 0.002 + j0.017 \\ 0.001 + j0.017 & 0.002 + j0.017 & 0.007 + j0.047 \end{pmatrix}$$

$$Z_{II} = \begin{pmatrix} 0.0023 + j0.0147 & 0.0012 + j0.008 & 0.0011 + j0.0070 \\ 0.0012 + j0.0080 & 0.0021 + j0.015 & 0.0010 + j0.0080 \\ 0.0011 + j0.0070 & 0.0010 + j0.008 & 0.0024 + j0.0148 \end{pmatrix}$$

$$Y_I = \begin{pmatrix} j0.35 & -j0.06 & -j0.04 \\ -j0.06 & j0.352 & -j0.06 \\ -j0.04 & -j0.06 & j0.34 \end{pmatrix}$$

$$Y_{II} = \begin{pmatrix} j0.045 & -j0.008 & -j0.009 \\ -j0.008 & j0.04 & -j0.011 \\ -j0.009 & -j0.011 & j0.035 \end{pmatrix}$$

O teste aplicado neste sistema foi um curto-circuito monofásico franco na fase C da barra 3. As Tabelas XVIII, XIX e XX indicam os valores das tensões, das correntes nos ramos e a contribuição dos geradores após a aplicação do curto-circuito.

TABELA XVIII

TENSÕES CONVERGIDAS PARA UM CURTO-CIRCUITO MONOFÁSICO FRANCO NA FASE C DA BARRA 3.

BARRA	Va	Teta A	Vb	Teta B	Vc	Teta C
1	0.5429	-54.620	0.5427	-155.417	0.2682	73.347
2	0.5314	-46.767	0.5281	-164.929	0.4882	73.438
3	0.5750	-62.015	0.5825	-143.758	0.0000	11.459
4	0.5372	-52.541	0.5321	-156.021	0.3147	73.614

TABELA XIX

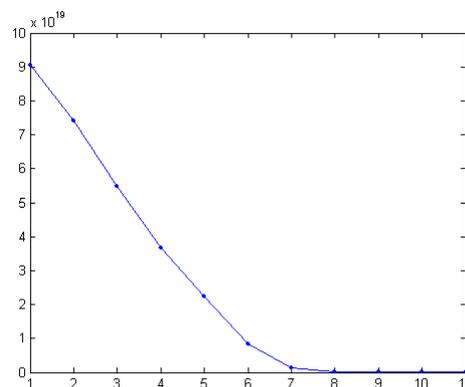
CORRENTES DOS RAMOS PARA A SIMULAÇÃO DO CURTO MONOFÁSICO FRANCO NA FASE C DA BARRA 3

DE	PARA	Ia	Teta A	Ib	Teta B	Ic	Teta C
1	2	1.3775	65.91	1.2130	-101.72	4.7326	172.48
1	3	1.2158	-125.54	1.4187	63.11	5.6373	-8.95
1	4	0.2991	88.59	0.1945	-14.68	1.0570	178.33
2	4	4.8665	-128.38	5.6818	95.04	13.547	-11.78
3	4	6.2775	47.80	7.0457	-69.71	24.562	170.82

TABELA XX
CONTRIBUIÇÃO DOS GERADORES

Gerador	IA	θA	IB	θB	IC	θC
2	6.4236	-119.79	6.7906	97.39	18.4241	-8.86
3	7.1938	44.31	8.3208	-82.10	36.9338	-10.59
4	1.9321	-114.81	2.9520	165.39	12.2139	-3.56

A Figura 9 apresenta a variação da impedância de falta durante o processo do fluxo de potência continuado. Como pode ser observado, foram necessários 11 fluxos de carga para que a impedância atingisse seu valor real. Neste caso, não existiram problemas relativos ao condicionamento numérico, mostrando assim a eficiência da metodologia proposta.

Figura 9 – Gráfico $Z_c \times O N^{\circ}$ de Fluxos

Para este sistema não foram realizadas comparações com o método convencional, visto que diante dos desequilíbrios surgem acoplamentos entre os circuitos de seqüência, tornando complexa a análise. Assim, fica evidente a vantagem da metodologia proposta quando aplicada em sistemas desequilibrados.

7.2- IEEE 14 Barras

A Figura 10 ilustra o sistema IEEE 14 barras. Os dados deste sistema podem ser obtidos em [18]. Como estes dados estão disponibilizados somente em seqüência positiva, para transformá-los em coordenadas de fase adotou-se a impedância de seqüência zero três vezes a de seqüência positiva.

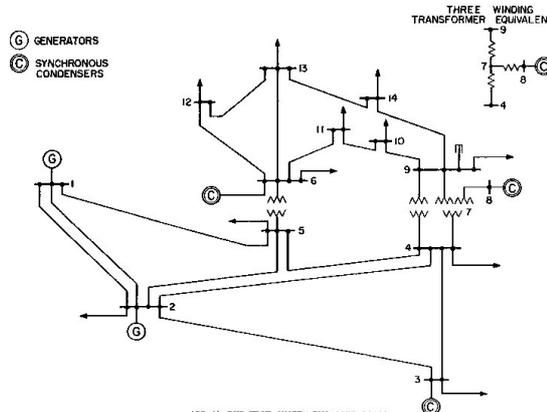


Figura 10 - Sistema IEEE 14 Barras

TABELA XXIV
DADOS DO ALIMENTADOR DC12RA (CEMIG)

Quantidade de seções	36
Tensão no Barramento SE	13800 V
Condição de Carga	Máxima
Ano de Referência	1996
Demanda do Alimentador	3217 kVA
Fator de Potência Alimentador	0.87 Indutivo
Tensão Nominal	13800 V
Queda de Tensão Máxima	5%

O teste aplicado neste sistema foi uma falta simultânea, simulando-se a queda da linha 25-28, pelo lado da barra 28 com contato do cabo à terra. Assim tem-se simultaneamente uma falta do tipo série e uma falta do tipo shunt conforme indicado pela figura 6 da seção 4.3. Como o contato do cabo com a terra se deu pelo lado não alimentado, este tipo de falta caracteriza uma falta de alta impedância.

TABELA XXV
TENSÕES NAS FASES A, B E C.

Barra	Va	Teta A	Vb	Teta B	Vc	Teta C
1.0000	0.9988	-0.0559	0.9936	-120.1111	0.9951	119.7178
2.0000	0.9988	-0.0558	0.9936	-120.1109	0.9950	119.7179
3.0000	0.9988	-0.0558	0.9936	-120.1109	0.9950	119.7179
4.0000	0.9977	-0.1078	0.9873	-120.2194	0.9903	119.4368
5.0000	0.9976	-0.1075	0.9872	-120.2191	0.9901	119.4372
6.0000	0.9976	-0.1075	0.9872	-120.2191	0.9901	119.4372
7.0000	0.9968	-0.1535	0.9812	-120.3230	0.9857	119.1592
8.0000	0.9966	-0.1527	0.9809	-120.3221	0.9854	119.1602
9.0000	0.9966	-0.1527	0.9809	-120.3220	0.9854	119.1602
10.0000	0.9962	-0.1909	0.9753	-120.4198	0.9813	118.8867
11.0000	0.9956	-0.1900	0.9748	-120.4184	0.9808	118.8884
12.0000	0.9956	-0.1900	0.9748	-120.4183	0.9808	118.8884
13.0000	0.9958	-0.2178	0.9696	-120.5076	0.9772	118.6215
14.0000	0.9949	-0.2163	0.9688	-120.5051	0.9764	118.6246
15.0000	0.9949	-0.2163	0.9688	-120.5051	0.9764	118.6246
16.0000	0.9957	-0.2320	0.9643	-120.5844	0.9735	118.3654
17.0000	0.9945	-0.2303	0.9632	-120.5811	0.9723	118.3698
18.0000	0.9945	-0.2303	0.9632	-120.5811	0.9723	118.3698
19.0000	0.9960	-0.2310	0.9593	-120.6479	0.9702	118.1206
20.0000	0.9943	-0.2290	0.9577	-120.6433	0.9685	118.1268
21.0000	0.9943	-0.2290	0.9577	-120.6433	0.9685	118.1268
22.0000	0.9968	-0.2122	0.9547	-120.6956	0.9673	117.8891
23.0000	0.9946	-0.2104	0.9527	-120.6899	0.9652	117.8972
24.0000	0.9946	-0.2104	0.9527	-120.6899	0.9652	117.8972
25.0000	0.9980	-0.1731	0.9505	-120.7254	0.9649	117.6729
26.0000	0.9952	-0.1709	0.9480	-120.7175	0.9622	117.6843
27.0000	0.9953	-0.1709	0.9480	-120.7175	0.9622	117.6843
28.0000	0.0006	29.8345	0.9468	-120.7352	0.9631	117.4737
29.0000	0.0021	34.4840	0.9422	-120.6925	0.9601	117.3962
30.0000	0.0021	34.4787	0.9422	-120.6927	0.9601	117.3965
31.0000	0.0021	29.7380	0.9442	-120.7417	0.9619	117.3365
32.0000	0.0038	32.6650	0.9387	-120.6887	0.9582	117.2433
33.0000	0.0038	32.6547	0.9387	-120.6891	0.9582	117.2440
34.0000	0.0028	29.7197	0.9429	-120.7450	0.9613	117.2663
35.0000	0.0049	32.4384	0.9363	-120.6826	0.9568	117.1552
36.0000	0.0047	32.3087	0.9369	-120.6879	0.9572	117.1646
Barra K'	0.9993	-0.1299	0.9479	-120.7320	0.9637	117.5337
Barra M	0.0000	-23.6223	0.9479	-120.7323	0.9637	117.5334

A Tabela XXV indica os valores das tensões nas fases A, B e C respectivamente. Como pode ser observado, os desequilíbrios causados pela falta podem ser totalmente analisados. Um exemplo disso são as pequenas tensões induzidas na fase A das barras a jusante do defeito.

É importante ressaltar que, como nos testes anteriores, não foram detectados qualquer tipo de problema relativo ao condicionamento numérico. Em se tratando de uma falta complexa pode-se concluir que a metodologia proposta se mostrou adequada.

8. CONCLUSÕES

Neste artigo foi apresentada uma formulação baseada no método de injeção de correntes trifásica (MICT) para a análise de faltas de sistemas desequilibrados. Nesta formulação, faltas shunt e série são modeladas através de matrizes admitâncias que são inseridas na matriz admitância de barra do sistema. Assim, pode-se representar quaisquer tipos de falta: shunt, série e simultâneas.

Para solucionar problemas relativos ao condicionamento numérico do MICT adotou-se um fluxo de carga continuado onde uma estratégia inovadora para atualização dos valores das admitâncias de falta garante a convergência do processo.

Realizou-se testes em diversos sistemas onde constatou-se uma grande eficiência da metodologia proposta, mesmo em se tratando de faltas complexas. Comparou-se também a nova formulação para análise de faltas com a metodologia convencional em componentes simétricas onde concluiu-se que, além de mais simples, a metodologia proposta é mais adequada para uma análise sistêmica, podendo inclusive ser empregada no estudo de problemas relativos à qualidade de energia como afundamentos de tensão.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Paul Anderson. "Analysis of Faulted Power Systems". The Iowa State University Press, 1973.
- [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-coordinates". Proc. IEEE, Vol. 155, No. 8, pp. 1163-1172, August 1968.
- [5] 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.
- [6] Alex Berman and Wilsun Xu. "Analysis of Faulted Power Systems By Phase Coordinates". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.13, No. 2, April 1998.

- [7] Tsai-Hsiang Chen et al. "Distribution System Short Circuit Analysis – A Rigid Approach". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. 1, February 1992.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Jiansheng Lei; Youman Deng; Ying He; Boming Z. A rigid approach of generalized power flow analysis for distribution systems Power Engineering Society Summer Meeting, 2000. IEEE, Volume: 2, 2000, pp.1047-1052, vol.2.
- [12] D. Shirmohammadi et al. A Compensation-based Power Flow method for Weakly Meshed Distribution and Transmission Network, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, No. 2, pp. 753-762, May 1988.
- [13] C.S. Cheng, D. Shirmohammadi. "A Three-Phase Power Flow Method for Real-Time Distribution System Analysis", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 2, pp. 671-679, May 1995.
- [14] P.P. Barker and R.W. de Mello. Determining the Impact of Distributed Generation on Power Systems: Part 1 – Radial Distribution Systems. Power Engineering Society Summer Meeting, 2000. IEEE, July 2000.
- [15] P.A.N. Garcia. Cálculo do Fluxo de Potência Trifásico em Sistemas de Distribuição Incluindo a Representação de Dispositivos de Controle. Tese de Doutorado – COPPE/ UFRJ, Fevereiro de 2001.
- [16] 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.
- [17] Garcia, P. A. N., Pereira, J. L. R., Carneiro Jr., S., "Voltage Control Devices Models for Distribution Power Flow Analysis", IEEE Transactions on Power Systems, vol 16, n. 4, November 2001, pp 586-594.
- [18] Power System Test Archive:
<http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>.