



Universidade Federal de Campina Grande – UFCG
Centro de Engenharia Elétrica e Informática – CEEI
Departamento de Engenharia Elétrica – DEE
Grupo de Sistemas Elétricos – GSE

Trabalho de Conclusão de Curso

**Metodologia para Alocação de Equivalentes de Rede Simplificados em
Estudos de Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT)**

Rogério Costa Melo

Campina Grande
Março de 2012

Universidade Federal de Campina Grande – UFGC
Centro de Engenharia Elétrica e Informática – CEEI
Departamento de Engenharia Elétrica – DEE
Grupo de Sistema Elétricos – GSE

**Metodologia para Alocação de Equivalentes de Rede Simplificados em
Estudos de Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT)**

*Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de
Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal
de Campina Grande, em cumprimento parcial às exigências
para obtenção do Grau de Engenheiro Eletricista.*

Rogério Costa Melo

Orientador: Damásio Fernandes Júnior, D.Sc.

Campina Grande – PB
Março de 2012

ROGÉRIO COSTA MELO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento parcial às exigências para obtenção do Grau de Engenheiro Eletricista.

Metodologia para Alocação de Equivalentes de Rede Simplificados em Estudos de Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT)

Aprovado em: / /

Professor Avaliador

Universidade Federal de Campina Grande

Avaliador, UFCG

Professor Damásio Fernandes Júnior, D.Sc.

Universidade Federal de Campina Grande

Orientador, UFCG

Agradecimentos

Agradeço em primeiro lugar a Deus, por me dar força nos momentos mais difíceis e estar presente nos dias mais felizes da minha vida.

Agradeço aos meus pais, (Ronildo e Rita), pelos ensinamentos e pelo incentivo que me deram durante toda essa caminhada.

A minhas irmãs (Isabella, Annie e Beatriz), pelo companheirismo.

A minha esposa (Cilene) e meu filho (Rodrigo), minhas fontes de inspiração e de alegria.

Ao professor Damásio pela orientação e pela oportunidade concedida.

Aos meus amigos, por todos os momentos compartilhados durante o curso, em especial a Wilker pela grande ajuda para a realização desse trabalho.

A todo corpo docente do curso de graduação em Engenharia Elétrica, por ter contribuído com a minha formação intelectual.

A todos os funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica, pela amizade e pela excelente qualidade de trabalho durante o curso.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Motivação.....	1
1.2	Objetivos	2
2	Tensão de Restabelecimento Transitória – TRT	2
2.1	Descrição do Fenômeno	2
2.2	Aspectos de Modelagem de Rede.....	4
2.3	Determinação das Impedâncias da Rede Externa.....	6
3	Espectro da Frequência.....	7
4	Representação dos Componentes do Sistema	8
4.1	Transformadores de Potência	8
4.1.1	Cálculo dos Parâmetros do Transformador de Potência.....	8
4.2	Banco de Capacitores.....	12
4.3	Chaves Seccionadoras, Religadores e Disjuntores	12
4.4	Cargas.....	12
4.5	Linhas de Transmissão e Cabos Aéreos.....	13
5	Faltas Avaliadas.....	13
6	Especificações Técnicas.....	14
6.1	Norma IEC 62271-100.....	14
7	Sistema em Estudo.....	16
7.1	Estudo do Caso – Análise do Espectro da Rede Externa	19
8	Faltas Avaliadas.....	20
9	Conclusão	24
10	Bibliografia	24

1 Introdução

1.1 Motivação

O estudo de transitórios eletromagnéticos é de grande importância na avaliação das solicitações impostas aos disjuntores quando da ocorrência de defeitos no sistema elétrico. Os parâmetros determinados nesse estudo visam verificar o comportamento térmico e dielétrico na câmara de extinção dos disjuntores que devem encontrar-se dentro dos valores especificados pelas normas vigentes, de forma a garantir o sucesso no processo de abertura quando solicitados. Com a crescente expansão do sistema elétrico, torna-se fundamental diagnosticar esses equipamentos seccionadores tendo como objetivo analisar a suportabilidade dos mesmos, observando-se, em cenários de superação, a necessidade de substituição por outros que atendam as condições de operação do sistema.

Os requisitos eletrotérmicos impostos a disjuntores e religadores são avaliados a partir do comportamento de corrente e tensão entre os terminais dos equipamentos nos cenários de eliminação de faltas. Basicamente, admite-se o nível da corrente de curto-circuito, além da taxa de crescimento e do pico da componente transitória de tensão, sendo esta última denominada Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT).

A análise da Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT) é realizada normalmente através de programas digitais, a exemplo do ATP - *Alternative Transients Program* (LEUVEN EMTP CENTER, 1987) e a representação total da rede elétrica torna-se inviável devido a um grande esforço computacional. A determinação da extensão da rede a ser modelada, em simulações que envolvem os estudos de TRT, vem sendo estabelecida com base na representação de um número mínimo de barramentos das subestações adjacentes ao ponto onde está instalado o disjuntor em estudo (CCON, 1991; ONS, 2007). Neste caso, o uso de equivalentes calculados na frequência fundamental pode introduzir erros significantes no diagnóstico da TRT (AZEVEDO, 2010), uma vez que este fenômeno pode compreender um espectro de frequência da ordem de algumas dezenas de kHz.

A modelagem dos equipamentos e demais componentes do sistema elétrico deve ser adequada o suficiente para representar corretamente o fenômeno analisado, caso contrário os resultados obtidos no estudo da TRT apresentarão incorreções, o que levará a um dispêndio financeiro caso equipamentos aptos às condições de operação sejam considerados superados, sendo indevidamente substituídos.

1.2 Objetivos

Neste trabalho é apresentado uma metodologia para a determinação do correto ponto em que devem ser dispostos os equivalentes de redes calculados na frequência fundamental sem que hajam erros no diagnóstico da TRT. Uma estratégia no domínio da frequência é utilizada para a determinação do comportamento da impedância das redes externas. A partir da análise dos resultados obtidos via ATP, define-se a extensão mínima da rede a ser representada, sem a necessidade de sua total representação, sendo possível obter de forma correta as solicitações impostas aos disjuntores para os fenômenos transitórios sob estudo.

Análises nos domínios da frequência e do tempo são realizadas com a finalidade de validar o procedimento proposto, tornando prudente a metodologia utilizada e permitindo dessa forma o uso de equivalentes de rede simplificados em estudos de TRT.

2 Tensão de Restabelecimento Transitória – TRT

2.1 Descrição do Fenômeno

A eliminação de curtos-circuitos em sistemas elétricos de potência se deve a atuação bem sucedida dos disjuntores. Esse equipamento de proteção e manobra tem a função de conduzir a corrente nominal de carga durante o regime permanente do sistema e interromper uma corrente de falta o mais rápido possível buscando proteger os demais equipamentos conectados ao sistema (transformadores, cargas, entre outros) de uma eventual avaria.

A Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT) é a diferença entre as tensões fase-terra $v_1(t) - v_2(t)$ que surge entre os terminais do disjuntor quando da sua abertura para a eliminação de uma falta (Figura 1).

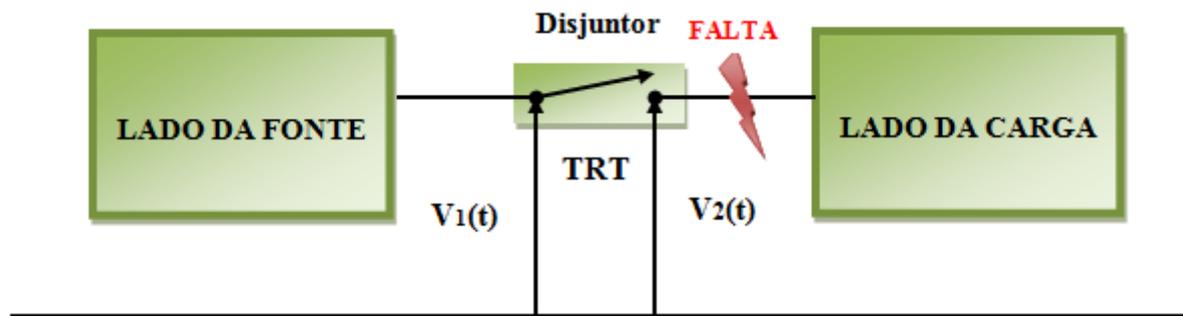


Figura 1 - Representação da TRT em um disjuntor.

Esta tensão apresenta uma componente transitória após a interrupção da corrente, devido à acomodação de energia armazenada em indutores e capacitores na rede. Junto com a componente transitória, coexiste uma componente de regime permanente, a qual depende do tipo e local da falta e do aterramento da rede (Figura 2).

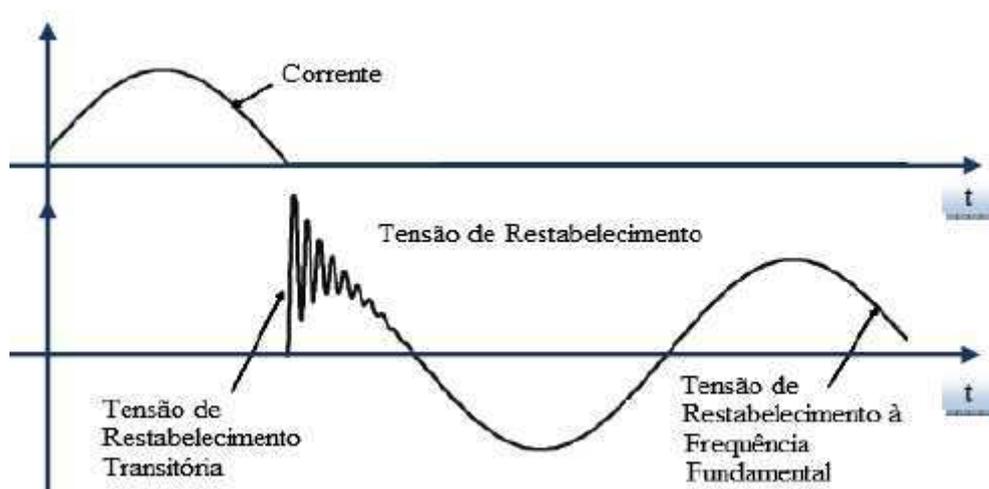


Figura 2 – Forma de onda de uma TRT em um disjuntor.

O processo de interrupção da corrente de curto-circuito pelo disjuntor é descrito sucintamente a seguir:

1) Iniciando a separação dos contatos dos pólos do disjuntor, quando a distância ainda é pequena entre os contatos, a corrente é mantida através de um caminho ionizado, devida à característica indutiva da rede. Esta é denominada corrente de arco elétrico;

2) Ao mesmo tempo em que ocorre a separação dos contatos, a câmara de extinção atua com o objetivo de reduzir a temperatura elevada devido à energia dissipada através do arco e também atua para desionizar o canal formado pela coluna do arco no interior da câmara, buscando a recuperação das características térmicas e dielétricas do meio isolante;

3) A extinção do arco ocorre quando essa corrente alternada torna-se nula em um determinado instante de tempo, $i(t) = 0$. O alto gradiente da TRT logo após a extinção do arco contribui para a elevação da temperatura e pressão no interior da câmara do disjuntor;

4) Para evitar a reignição do arco, é necessário que o resfriamento no interior da câmara ocorra de forma mais rápida que a taxa de crescimento da TRT (TCTRT), caso contrário, ocorre a reignição térmica do arco;

5) A elevada tensão que surge entre os contatos do disjuntor, que apresenta um comportamento transitório, pode romper o meio dielétrico e restabelecer o arco, tornando assim o equipamento superado, causando possíveis danos eletromecânicos. Os valores atingidos pela TRT devem ser menores que a tensão disruptiva do meio isolante.

A capacidade de interrupção de uma falta depende do nível da corrente de curto-circuito e da tensão que se estabelece entre os contatos do disjuntor após a extinção do arco. Portanto, os limites do disjuntor que devem ser respeitados são:

- Capacidade Nominal de Interrupção Simétrica (CNI);
- Suportabilidade Térmica: relacionada à elevação de temperatura do dielétrico na câmara de extinção;
- Suportabilidade Dielétrica: relativa à máxima tensão suportável pelo meio dielétrico.

2.2 Aspectos de Modelagem de Rede

A representação total do sistema elétrico em programas digitais para a análise de transitórios é normalmente evitada face à complexidade envolvida, pois pode incidir em um grande esforço computacional. Geralmente apenas o subsistema foco das

análises é representado em detalhes. O restante do sistema é representado por meio de equivalentes.

O Comitê de Operações Norte-Nordeste (CCON, 1991) definiu que a representação dos circuitos equivalentes seria no mínimo a partir da segunda barra além daquela onde o disjuntor em estudo se encontra instalado (Figura 3).

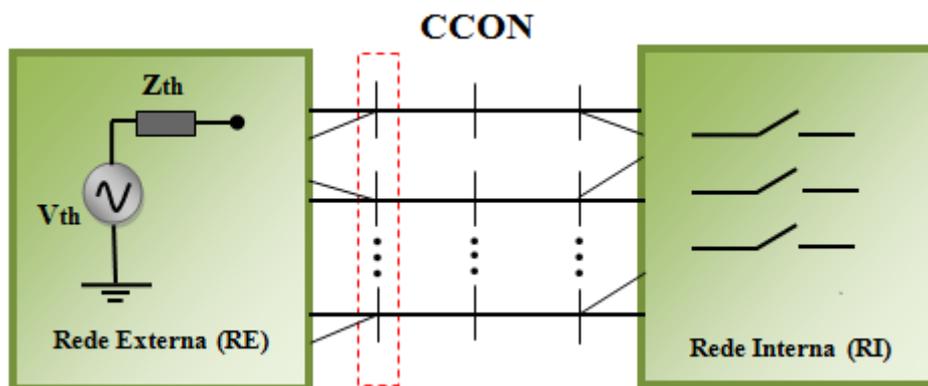


Figura 3 – Representação da Rede pela CCON.

O Operador Nacional do Sistema (ONS) define através dos procedimentos de rede (*submódulo 23.3 – diretrizes e critérios para estudos elétricos, item 9.3.2.2 - pág.47*) que entre a barra focalizada no estudo e as barras de fronteira devam existir pelo menos, duas outras barras (Figura 4).

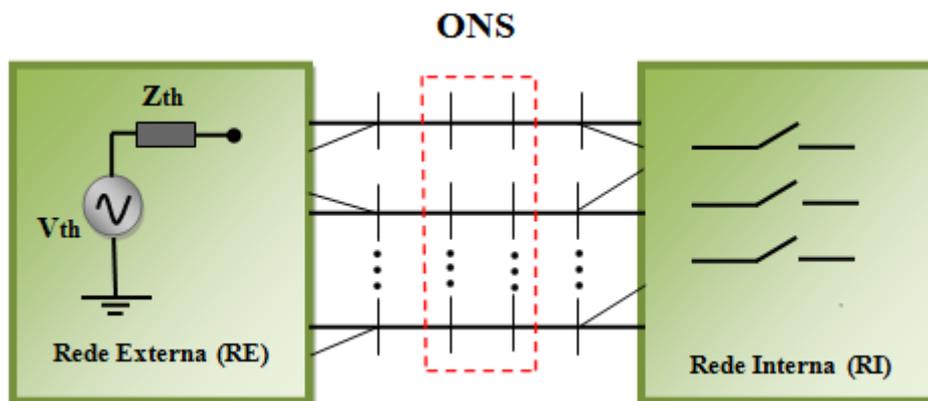


Figura 4 – Representação da Rede pelo ONS.

Nos casos mencionados a definição da extensão mínima da rede a ser modelada para a representação desses equivalentes ocorre sem levar em consideração o comportamento das reflexões na composição da TRT. Também não se considera a distância entre os barramentos e os equipamentos conectados nas subestações adjacentes, de modo que a configuração escolhida apresentasse uma influência mínima

sobre o comportamento transitório nos terminais do disjuntor. À medida que os equivalentes são estabelecidos em pontos mais próximos aos equipamentos de manobra, as imprecisões decorrentes da representação de equivalentes simplificados calculados à frequência nominal podem elevar os valores de pico da TRT presumida, acarretando erros de dimensionamento (AZEVEDO, 2010).

2.3 Determinação das Impedâncias da Rede Externa

A obtenção da impedância da rede externa é conduzida no domínio modal $[Z_{MODAL}]$. Para um sistema elétrico trifásico tem-se a seguinte relação matricial:

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Devido ao desacoplamento das grandezas e considerando as componentes de sequência positiva e negativa equivalentes, são necessárias apenas duas simulações.

Através da ferramenta *Frequency Scan* do ATP é realizada uma varredura na frequência sendo possível, dessa forma, obter o comportamento da impedância do sistema com a frequência.

No ponto onde é avaliado o disjuntor, faz-se a injeção de três fontes de corrente de amplitude 1,0 A e defasadas de 120° entre si, com a frequência variando no espectro desejado. A tensão de sequência positiva é obtida no ponto onde são injetadas as fontes de corrente. Como a corrente é unitária, o espectro da tensão verificada é equivalente ao espectro da impedância, obtendo assim a impedância de sequência positiva e negativa.

$$\begin{bmatrix} V_0(j\omega) \\ V_1(j\omega) \\ V_2(j\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_0(j\omega) & 0 & 0 \\ 0 & Z_1(j\omega) & 0 \\ 0 & 0 & Z_2(j\omega) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0(j\omega) \\ I_1(j\omega) \\ I_2(j\omega) \end{bmatrix}$$

Portanto:

$$Z_1(j\omega) \equiv V_1(j\omega)$$

O mesmo procedimento é realizado para a obtenção do espectro da impedância de sequência zero, com a diferença que agora as fontes não são defasadas entre si.

Procede-se com o aumento do comprimento da rede modelada, estendendo a localização dos equivalentes até a próxima subestação a montante do barramento principal da rede interna. Os espectros das impedâncias de sequência positiva e zero são novamente extraídos. A partir do ponto onde ocorre a superposição desses espectros para duas situações subsequentes é alocado o equivalente da rede externa não sendo mais necessário estender a localização dos equivalentes, pois a contribuição dos demais equipamentos torna-se desprezível na composição harmônica vista da rede interna.

3 Espectro da Frequência

Os equivalentes dependentes da frequência apresentam um perfil predominantemente indutivo à frequência fundamental. No entanto, à medida que a frequência do sinal se eleva, este comportamento oscila de indutivo a capacitivo, passando por pontos de ressonância, caso em que se caracteriza como uma resistência. Na Figura 6 é ilustrado um gráfico da impedância em função da frequência.

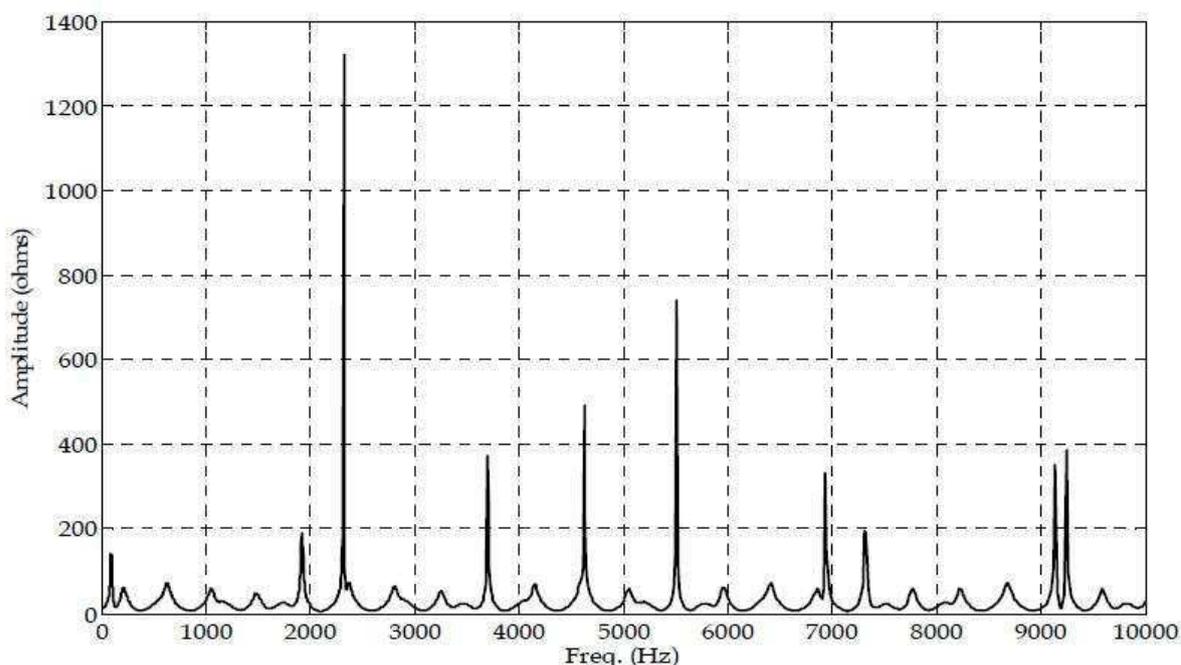


Figura 6 – Espectro da Impedância em Função da Frequência.

A análise da impedância harmônica das redes externas é realizada através da rotina *Frequency Scan* do ATP.

4 Representação dos Componentes do Sistema

4.1 Transformadores de Potência

Nos transformadores de potência são representadas as resistências e indutâncias nos lados de alta (R_H, L_H) e baixa tensão (R_L, L_L) dispostas em série. Para o fenômeno transitório em análise serão incluídas as capacitâncias equivalentes das buchas e enrolamentos para cada lado do transformador com relação ao potencial da terra (C_H, C_L) representando assim as frequências naturais de oscilação. A capacitância entre as buchas de alta e baixa tensão (C_{HL}) é representada por considerar a propagação do surto que pode decorrer entre primário e secundário. A topologia do modelo do transformador descrita acima é ilustrada na Figura 8. Estudos realizados por Nobre (1999) mostraram que a característica da saturação do núcleo dos transformadores torna-se dispensável em estudos de TRT. No caso de transformadores para instrumentos, é importante modelar as capacitâncias equivalentes.

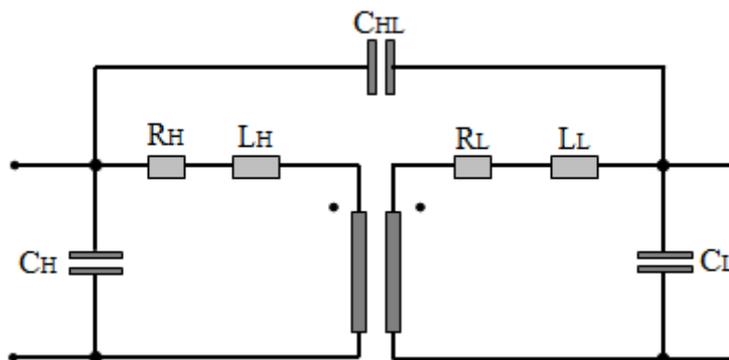


Figura 8 – Representação do transformador de potência.

4.1.1 Cálculo dos Parâmetros do Transformador de Potência

Serão tomados como exemplo os cálculos realizados no transformador 02T1 da subestação Cruz do Peixe (CPX). Os dados de placa do transformador em questão foram fornecidos pela ENERGISA.

Tabela 1 – Dados de placa do transformador 02T1 (CPX).

Transformador 02T1 – Subestação Cruz do Peixe (CPX)	
Fabricante: TOSHIBA	Reatância Percentual: 8,0%
Potência: 20/25 MVA	Ligação: Y_aterrado 13,8 kV – Δ 69 kV
Relação de Transformação: 69/13,8 kV	Posição do TAP: 3 – 66,550 kV

A reatância do transformador em p.u. é obtida a partir da reatância percentual (%) para uma potência nominal de 20 MVA.

$$X_{AB} = 8.0\% \Rightarrow X_{AB} = 0.08 pu$$

Essa reatância é convertida para a base utilizada pelo ATP, tensão e potência de 69 kV e 100 MVA, respectivamente.

$$X_{AB(NOVA)} = X_{AB} \cdot \frac{S_N}{S_V}$$

Onde: $S_N = 100MVA$ é a potência nominal da base “nova” e $S_V = 20MVA$ é a potência nominal da base “velha”. Assim:

$$X_{AB(NOVA)} = X_{AB} \cdot \frac{S_N}{S_V} \Rightarrow X_{AB(NOVA)} = 0.08 \cdot \frac{100MVA}{20MVA} \Rightarrow X_{AB(NOVA)} = 0,400 pu$$

Como o transformador é de dois enrolamentos esse valor da reatância é dividido por dois, sendo cada um disposto para os lados de alta e baixa tensão, $X_A^1 = 0,200 pu$ e $X_B^1 = 0,200 pu$.

Calcula-se a reatância (em ohms) no enrolamento de alta tensão tendo como base uma tensão e potência nominal de (69 kV, 100 MVA), respectivamente. A impedância base no enrolamento de alta tensão é:

$$Z_B = \frac{V_B^2}{S_B} \Rightarrow Z_B = \frac{69^2}{100} \Rightarrow Z_B = 47,61 \Omega$$

Assim, a reatância no enrolamento de alta tensão é:

$$X_A = X_A^1 \cdot Z_B \Rightarrow X_A = 0,20 \cdot 47,61 \Rightarrow X_A = 9,522 \Omega$$

Como o enrolamento de alta tensão é em Δ o valor da reatância (em ohms) obtido deve ser multiplicado por três, devido ao fato de considerar a tensão de linha nesse lado do transformador para o cálculo da impedância base.

Logo:

$$X_A = 3 \cdot 9,522 \Rightarrow X_A = 28,566 \Omega$$

Calcula-se a reatância (em ohms) no enrolamento de baixa tensão, base (13,8 kV, 100 MVA). A impedância base no enrolamento de baixa tensão é:

$$Z_B = \frac{V_B^2}{S_B} \Rightarrow Z_B = \frac{13,8^2}{100} \Rightarrow Z_B = 1,9044 \Omega$$

Assim:

$$X_B = X_B^1 \cdot Z_B \Rightarrow X_B = 0,20 \cdot 1,9044 \Rightarrow X_B = 0,381 \Omega$$

Os valores das resistências nos lados de alta e baixa tensão são obtidos a partir do fator $\frac{X}{R} = 30$, de acordo com a norma ANSI.

Cálculo da resistência do lado de alta tensão:

$$R_H = \frac{X_A}{30} \Rightarrow R_H = \frac{28,566}{30} \Rightarrow R_H = 0,9522 \Omega$$

E a resistência no lado de baixa tensão é:

$$R_L = \frac{X_B}{30} \Rightarrow R_L = \frac{0,381}{30} \Rightarrow R_L = 0,0127 \Omega$$

Os valores típicos da capacitância são obtidos a partir da potência nominal do transformador e do Nível Básico de Isolamento (NBI) de cada enrolamento. Os valores da capacitância dos enrolamentos são extraídos da referência (Greenwood, 1991) de acordo com a potência nominal do transformador (Tabela 2).

Tabela 2 – Capacitância fase-terra relativa ao enrolamento de transformadores.

C(pF)	Ligação	Potência (S): MVA			
		5	10	15	20
	Estrela (13,8 kV)	4500	7500	9500	12000
	Delta (69 kV)	4250	7250	6000	7000

Para uma potência de 20 MVA, os valores da capacitância dos enrolamentos de alta (C_{H_E}) e baixa tensão (C_{L_E}) são respectivamente, ($C_{H_E} = 7000 pF$) e ($C_{L_E} = 12.000 pF$).

Os valores das capacitâncias das buchas para a terra, relacionadas aos níveis de tensão (69/13,8 kV) são fornecidos pelo *IEEE Working Group on Transients Recovery Voltages* apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Capacitância fase-terra relativa à bucha de transformadores.

Classe de Tensão (kV)	Corrente Nominal (A)	Capacitância para a Terra (variação em pF)
13,8/15,0	600	160 - 180
	1200	190 - 220
69	400	180 - 270
	600	250
	1200	160 - 290
	2000	210 - 320

Para o enrolamento de alta tensão, tem-se:

$$I_L = \frac{S}{\sqrt{3}V_L} \Rightarrow I_L = \frac{20 \times 10^6}{\sqrt{3} \cdot 69 \times 10^3} \Rightarrow I_L = 167,35A$$

O enrolamento da alta tensão apresenta ligação em delta, a corrente de fase é dada por:

$$I_F = \frac{I_L}{\sqrt{3}} \Rightarrow I_F = \frac{167,35}{\sqrt{3}} \Rightarrow I_F = 96,62A$$

No enrolamento de baixa tensão a corrente de linha vale:

$$I_L = \frac{S}{\sqrt{3}V_L} \Rightarrow I_L = \frac{20 \times 10^6}{\sqrt{3} \cdot 13,8 \times 10^3} \Rightarrow I_L = 836,74A$$

Como na baixa tensão o transformador apresenta ligação em estrela, a corrente de linha é igual à corrente de fase:

$$I_F = I_L = 836,74A$$

Calculadas as correntes de fase e de acordo com a classe de tensão extrai-se da Tabela 3 a capacitância das buchas para a terra no lado de alta ($C_{H_B} = 180 pF$) e baixa tensão ($C_{L_B} = 190 pF$) do transformador 02T1(CPX).

A capacitância equivalente no lado de alta (C_H) e baixa (C_L) tensão resulta da associação paralela entre as componentes capacitivas das buchas e enrolamentos. Assim:

$$C_H = C_{H_E} + C_{H_B} \Rightarrow C_H = 7000 + 180 \Rightarrow C_H = 7180 pF$$

e:

$$C_L = C_{L_E} + C_{L_B} \Rightarrow C_L = 12.000 + 190 \Rightarrow C_L = 12.190 pF$$

Normalmente, calcula-se a admitância, ωC em $\mu mhos$, então:

$$\omega C_H = 2.7069 \mu mhos$$

$$\omega C_L = 4.5956 \mu mhos$$

A capacitância de transferência C_{HL} para transformadores de 69/13,8 kV é cerca de 4 vezes superior a capacitância equivalente do lado de alta C_H do transformador (WANG, *et al* 2005). Então:

$$C_{HL} \cong 4C_H \Rightarrow C_{HL} \cong 28.720 pF$$

Em termo de admitância, tem-se:

$$\omega C_{HL} = 10.82744 \mu mhos$$

4.2 Banco de Capacitores

Os bancos de capacitores são representados por elementos concentrados. Fornecidos os valores da potência reativa de cada banco (Q) e o valor RMS da tensão entre fases (V_{RMS}) da barra onde o banco está conectado, efetua-se o cálculo do inverso da reatância capacitiva de cada banco de capacitores de acordo com a expressão:

$$\omega C = \frac{Q}{V_{RMS}^2}$$

A subestação (CPX) apresenta um banco de capacitores 01H1 com uma potência reativa de $Q = 1,8 \text{ Mvar}$ no setor de 13,8 kV. Assim a sua admitância em μmhos é:

$$\omega C = \frac{1,80 \times 10^6}{(13,8 \times 10^3)^2} \Rightarrow \omega C = 12,6 \times 10^3 \mu\text{mhos}$$

4.3 Chaves Seccionadoras, Religadores e Disjuntores

Esses equipamentos são modelados por chaves controladas no tempo. O disjuntor é modelado como um elemento ideal, quando conduzindo apresenta resistência zero e após a abertura de seus contatos apresenta uma resistência infinita. As capacitâncias concentradas em ambos os lados do disjuntor são consideradas apenas na subestação em análise. O arco elétrico não foi representado.

4.4 Cargas

As cargas no sistema são modeladas por elementos RL série (Figura 9). A adoção desse modelo provoca uma maior severidade nos níveis da TRT, pois devido ao crescimento da reatância indutiva na presença de frequências elevadas no sinal da rede o elemento série se comporta como um circuito aberto inibindo a atenuação da TRT pela componente resistiva da carga.



Figura 9 – Modelo RL série.

A impedância da carga Z é obtida a partir da seguinte expressão:

$$Z = \frac{V^2}{S_c}$$

Onde S_c é o valor da potência aparente da carga, resultante da associação das potências ativa e reativa da carga. Os valores da potência ativa e reativa foram fornecidos pela ENERGISA. Para a carga conectada ao transformador 02T1 da subestação (CPX) tem-se uma potência de $S = (2,71 + j1,34)MVA$.

$$Z = \frac{13,8^2}{(2,71 + j1,34) \times 10^6} \Rightarrow Z = \frac{13,8^2}{3,1232 \times 10^6 \angle 26,31^\circ} \Rightarrow Z = 56,47 - j27,921 \Omega$$

$R_s = 56,47 \Omega$ e $X_L = 27,921 \Omega$. Onde X_L é a reatância indutiva e equivale a ωL_s e R_s é a resistência da carga em ohms.

4.5 Linhas de Transmissão e Cabos Aéreos

As linhas de transmissão são representadas através de modelos a parâmetros distribuídos, conhecido como modelo de Bergeron. O modelo PI a parâmetros concentrados se mostra como suficiente para linhas de comprimento da ordem de unidades de km.

Para cabos, o modelo PI a parâmetros concentrados se mostra suficiente.

5 Faltas Avaliadas

Para análise da suportabilidade dos disjuntores são avaliadas as faltas trifásicas não aterradas assim como as faltas monofásicas quilométricas, recomendadas pela norma de referência (IEC 62271-100, 2006).

As faltas quilométricas são curto-circuitos localizados em linhas de transmissão ou distribuição a uma pequena distância (1 a 3 km) de onde está conectado o disjuntor em análise. Esse tipo de falta é caracterizado por provocar uma considerável elevação térmica ao meio de extinção do arco.

Faltas trifásicas não aterradas, embora com a menor probabilidade de ocorrência, são consideradas nos estudos de TRT por incidirem nas mais severas solicitações dielétricas ao meio de extinção do arco, por apresentar o mais elevado valor de pico da TRT.

6 Especificações Técnicas

6.1 Norma IEC 62271-100

A norma IEC especifica a envoltória, tida como a referência, dos limites sob a qual deve estar a curva da TRT obtidas em ensaios ou simulações. A partir de uma comparação dessas curvas é possível avaliar se o equipamento está adequado ou não às solicitações impostas pelo sistema. Equipamentos com classe de tensão igual ou inferior a 100 kV tem a envoltória especificada por dois segmentos de reta, também conhecido como método dos dois parâmetros (Figura 10).

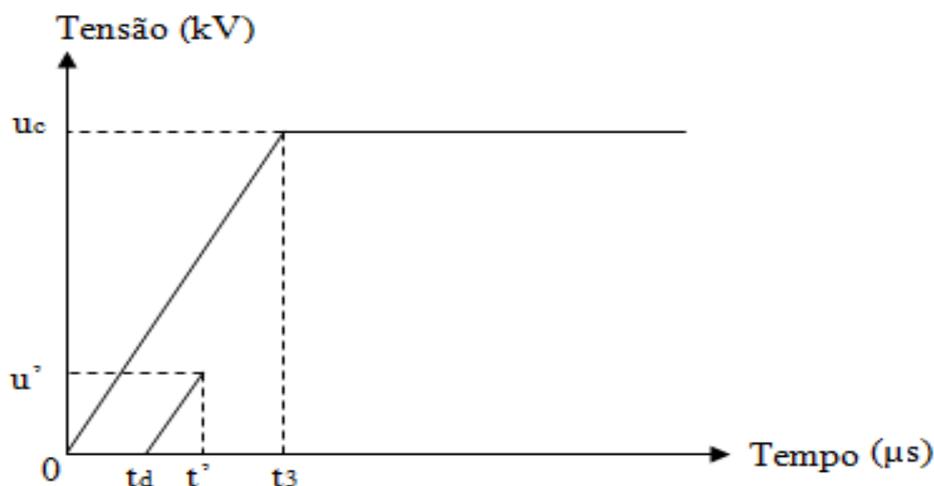


Figura 10 – Envoltória a dois parâmetros da TRT de ensaio definida pela IEC.

O valor u_c corresponde ao maior valor de pico da TRT atingido no tempo t_3 . O segmento de reta com coordenadas de tensão u' (equivalente a um terço do valor de u_c) e tempo t_1 , parte de um ponto com retardo nominal (t_d) considerado somente para testes de ensaio e se desenvolve em paralelo ao segmento de reta do traçado de referência da TRT. Os parâmetros da TRT especificada são definidos a partir da classe de tensão do disjuntor (U_R), do fator de primeiro pólo (K_{pp}) e do fator de amplitude (K_{of}).

O fator de primeiro pólo representa a relação entre a componente fundamental da tensão de primeiro pólo do disjuntor a suprimir a corrente de curto-circuito (antes da eliminação da falta pelos outros pólos) e seu correspondente valor de regime após a supressão de falta pelos outros pólos.

Para faltas trifásicas não aterradas, a norma IEC 62271-100 considera para disjuntores com nível de tensão inferior a 100 kV fator de primeiro pólo (K_{pp}) igual a 1,5. Na análise de faltas quilométricas, esse fator apresenta valor unitário, uma vez que a tensão entre os pólos do disjuntor tem como referência o valor da tensão fase-terra da fase atingida.

O fator de amplitude (K_{of}) representa a relação entre o máximo valor fase-terra atingida pela componente transitória da tensão de restabelecimento e sua componente à frequência fundamental. Este parâmetro (K_{of}) varia de acordo com o tipo de falta e segundo a relação entre a corrente de curto-circuito no ponto de falta e a máxima capacidade de interrupção do disjuntor (%CNI). Os valores atribuídos a (K_{of}) são apresentados na Tabela 4 válidos apenas para sistemas cujos cabos que conectam disjuntores e equipamentos adjacentes apresentam um comprimento inferior a 100 m (Dufournet & Montillet, 2005).

Tabela 4 – Fator de amplitude para equipamentos com nível de tensão inferior a 100 kV.

Tipo de Falta	% CNI	K_{of}
Trifásica não-aterrada	100	1,54
	60	1,65
	30	1,74
	10	1,80
Quilométrica	---	1,54

O tempo de referência em que a TRT especificada atinge o máximo valor de pico (t_3) depende do nível da corrente de curto-circuito. O valor de crista da TRT especificada por norma é dado por:

$$u_c = k_{pp} \cdot k_{of} \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot u_r$$

A Tabela 5 exhibe os valores de parâmetros para a obtenção das envoltórias de norma no caso de equipamentos com classe de tensão 15,0 e 75,0 kV.

Tabela 5 – Valores padronizados para parametrização das envoltórias da TRT especificada para faltas trifásicas: representação a dois parâmetros (IEC 62271-100/2006).

Classe de Tensão u_r (kV)	% CNI	Fator de Primeiro Pólo K_{pp} (p.u.)	Fator de Amplitude K_{of} (p.u.)	Valor de Pico u_c (kV)	Tempo t_3 (μ s)	TCTRT (kV/ μ s)
15	T100	1,5	1,54	28,3	31,0	0,91
	T60	1,5	1,65	30,3	21,0	1,44
	T30	1,5	1,74	32,0	12,5	2,56
	T10	1,5	1,80	33,1	12,5	2,67
72,5	T100	1,5	1,54	137	93,0	1,47
	T60	1,5	1,65	146	62,0	2,35
	T30	1,5	1,74	155	37,0	4,19
	T10	1,5	1,80	160	37,0	4,32

7 Sistema em Estudo

Neste trabalho foi realizada uma análise da suportabilidade de disjuntores presentes na subestação Cruz do Peixe.

O Regional Mussuré II apresenta três ramais principais conectados a partir da subestação Mussuré. O diagrama da rede de subtransmissão e alta tensão do Regional Mussuré II e detalhes dos setores de 13,8 kV e 69 kV da subestação Cruz do Peixe são mostrados nas Figuras 11, 12 e 13.

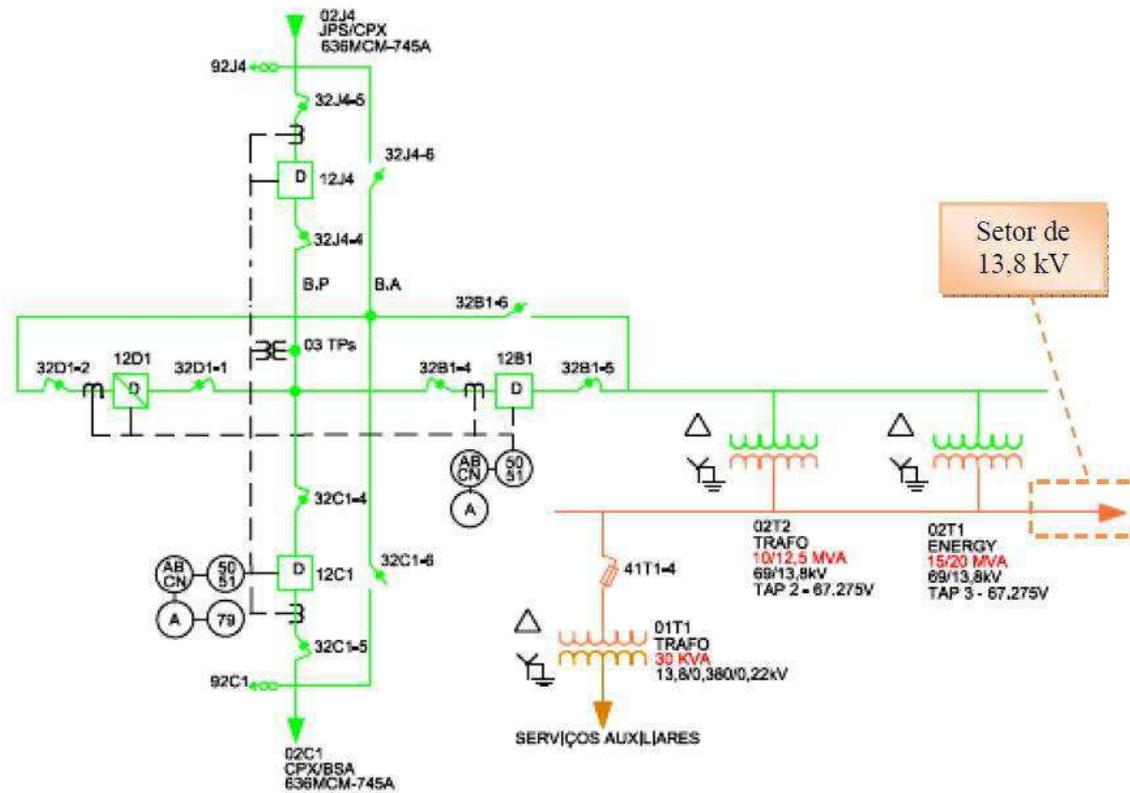


Figura 12 – Setor de 69 kV da subestação Cruz do Peixe. (Fonte: AZEVÊDO, 2010).

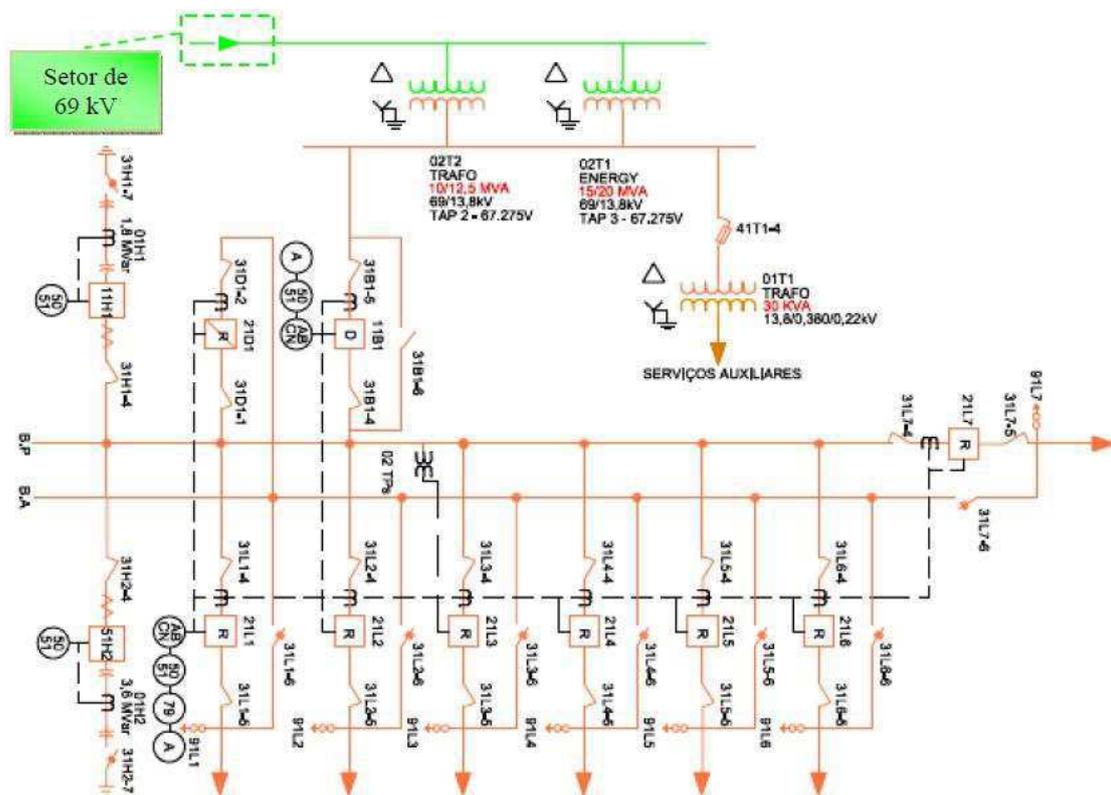


Figura 13 – Setor de 13,8 kV da subestação Cruz do Peixe. (Fonte: AZEVÊDO, 2010).

7.1 Estudo do Caso – Análise do Espectro da Rede Externa

O estudo no domínio da frequência visa obter a impedância harmônica da rede externa a fim de determinar o local ideal para análise do equivalente da rede. A partir da metodologia proposta foi realizada uma varredura na faixa de frequência de 1 a 5 kHz. Três casos foram avaliados, para obtenção do espectro da frequência da rede externa.

- ✓ **Caso 1 – Equivalente no Barramento de 69 kV da subestação João Pessoa;**
- ✓ **Caso 2 – Equivalente no Barramento de 69 kV da subestação Mussurê;**
- ✓ **Caso 3 – Equivalente no Barramento de 230 kV da subestação Mussurê;**
- ✓ **Caso 4 – Equivalente no Barramento de 230 kV da subestação Goianinha.**

A Figura 14 apresenta a matriz da impedância com destaque para a superposição, do comportamento da amplitude harmônica $Z(\omega)$, nos casos 2, 3 e 4. Sendo assim, adota-se o barramento de 69 kV da subestação Mussurê como satisfatório para alocação do equivalente de curto-circuito da rede externa.

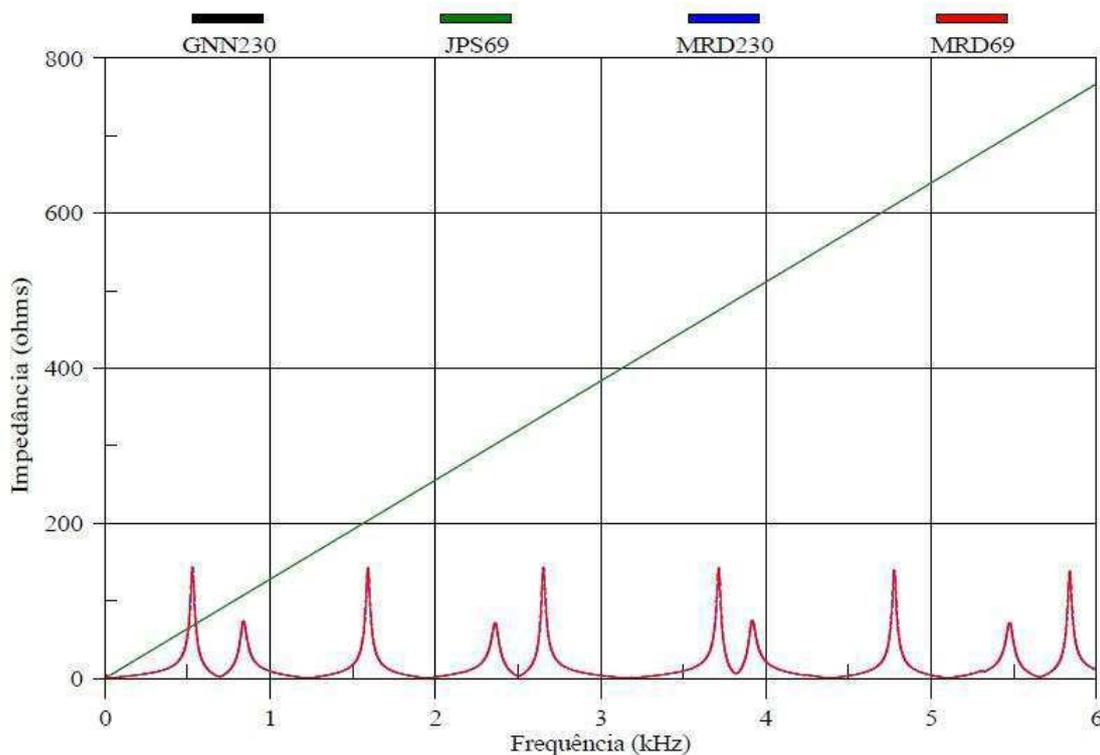


Figura 14 – Amplitude harmônica para os quatro casos avaliados.

No caso em que o equivalente é alocado na SE João Pessoa, o módulo da impedância harmônica exibe um perfil linear crescente (resistência associada à indutância), o que pode incidir na redução do amortecimento inerente à rede externa, acarretando condições transitórias mais severas.

Serão realizadas análises no domínio do tempo de forma a validar o estudo proposto, condicionando o cálculo dos parâmetros presumidos da TRT empregados no dimensionamento dos disjuntores.

8 Faltas Avaliadas

Os disjuntores 12B1 e 12J4 de classe de tensão 72,5 kV da subestação Cruz do Peixe (ver Figura 12), foram avaliados mediante interrupção de uma falta trifásica não aterrada. As formas de onda da corrente de curto-circuito e da TRT nos terminais dos disjuntores, obtidas por simulação, resultantes da avaliação de falta trifásica não aterrada são ilustradas nas Figuras 15, 16, 17 e 18.

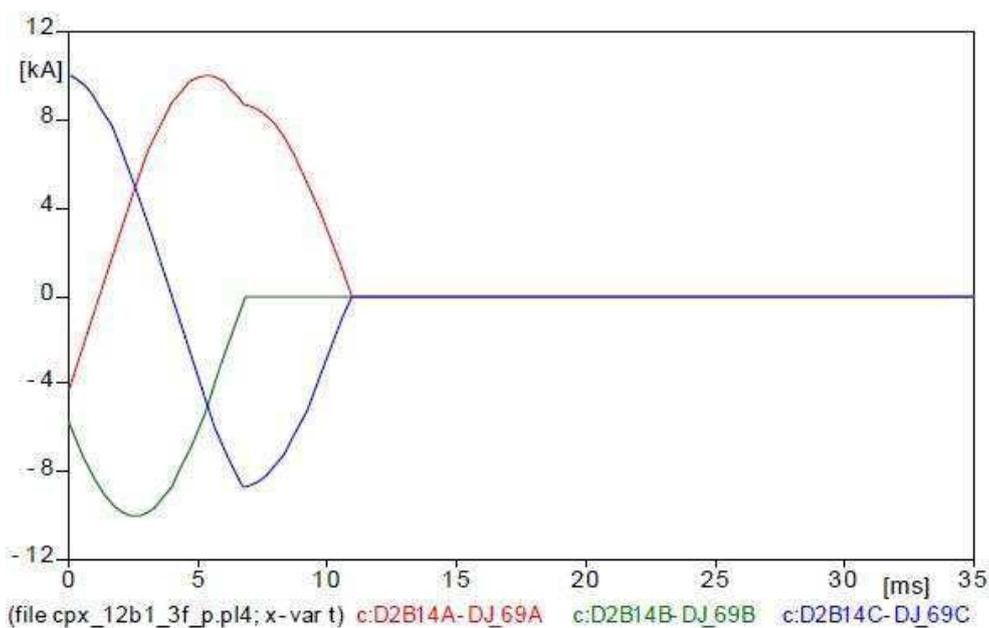


Figura 15 – Corrente de curto-circuito no disjuntor 12B1 – Falta trifásica não aterrada.

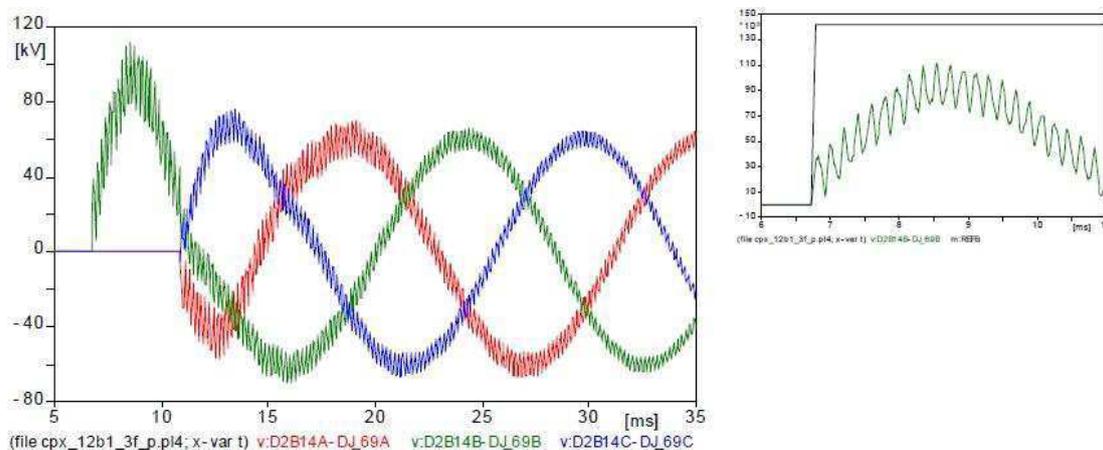


Figura 16 – Falta trifásica não aterrada no disjuntor 12B1 da subestação CPX.

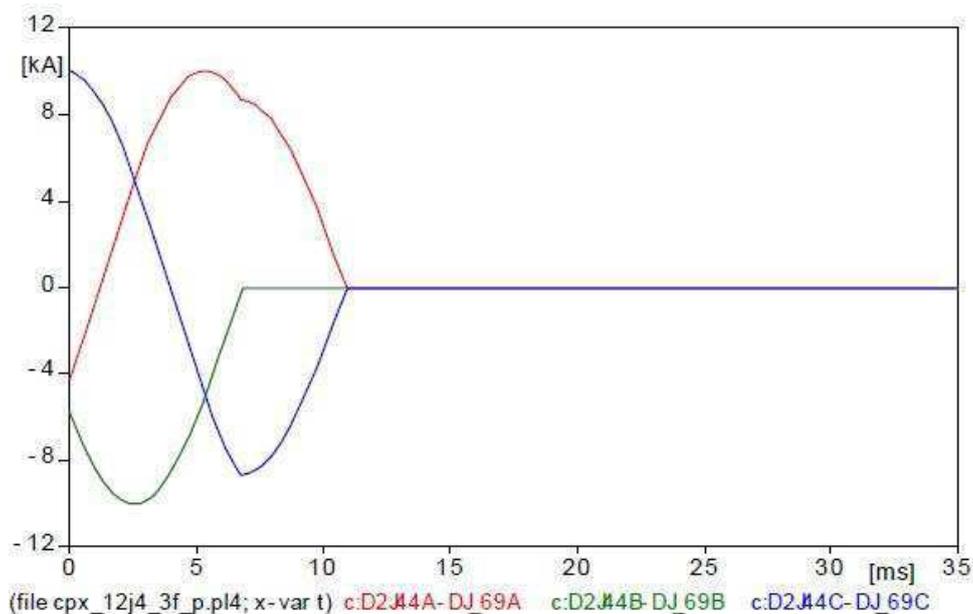


Figura 17 – Corrente de curto-circuito no disjuntor 12J4 – Falta trifásica não aterrada.

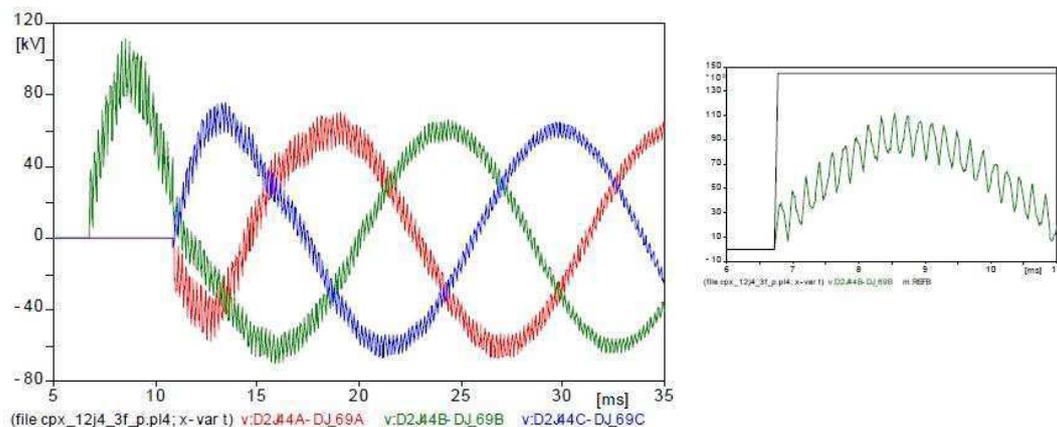


Figura 18 – Falta trifásica não aterrada no disjuntor 12J4 da subestação CPX.

Os resultados obtidos por simulação para os valores de pico e taxa de crescimento da TRT, diante análise de curto-circuito trifásico não aterrado nos terminais do disjuntor da subestação Cruz do Peixe, estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Resultados obtidos para os disjuntores de 69 kV da subestação Cruz do Peixe (CNI = 20 kA), para falta trifásica não aterrada.

Código	Resultados Obtidos em Simulação				Envoltória de Norma		Disjuntor Adequado ?
	Corrente Máxima (kA)	% CNI	TCTRT (kV/μs)	Uc (kV)	TCTRT (kV/μs)	E2 (kV)	
12B1	9,67	48,4	0,51	103,1	2,92	142,4	SIM
12J4	9,67	38,7	0,52	103,1	3,47	144,8	SIM

O disjuntor 12C1 da subestação Cruz do Peixe foi avaliado mediante falta monofásica quilométrica, com distâncias de 1, 2 e 3 km do disjuntor, com relação à linha de transmissão a jusante do mesmo. As correntes de falta quilométrica aplicada na fase A para as três distâncias especificadas acima são ilustradas na Figura 19.

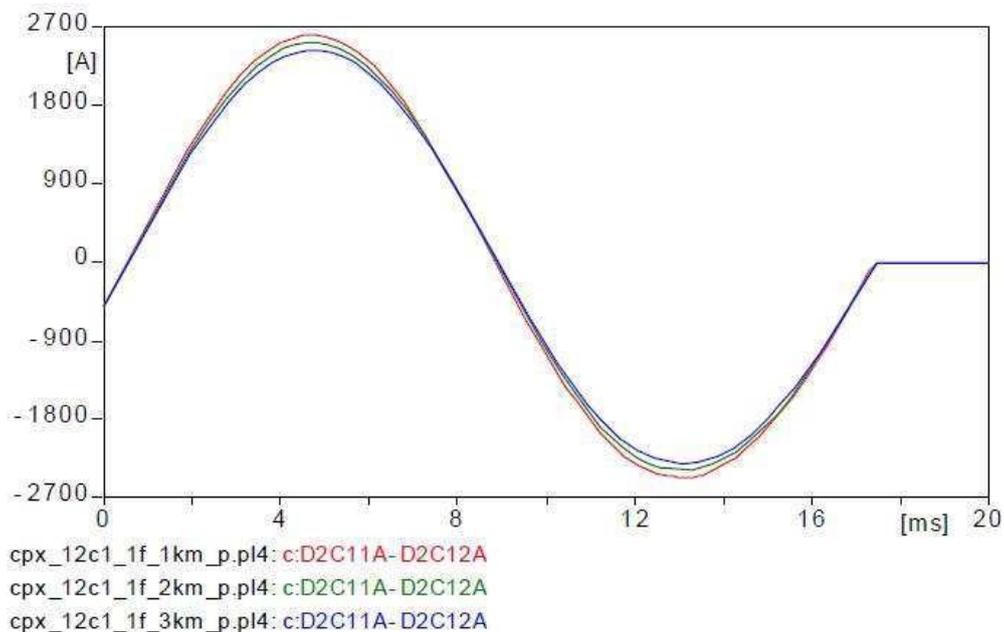


Figura 19 – Falta quilométrica aplicada na fase “A”, a 1, 2 e 3 km do disjuntor 12C1 da subestação CPX.

As formas de onda da TRT, adotando-se o fator de primeiro pólo igual a 1,0 para faltas quilométricas, segundo a norma IEC 62271-100 (2006), são ilustradas nas Figuras 20, 21 e 22, para as distâncias de 1, 2 e 3 km, respectivamente.

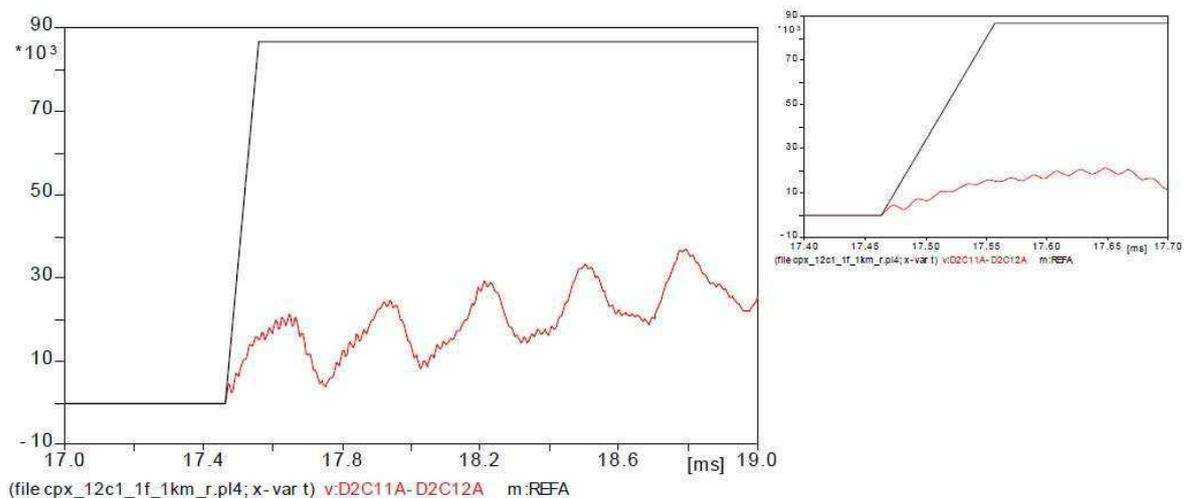


Figura 20 – Falta quilométrica a 1 km do disjuntor 12C1 da subestação CPX.

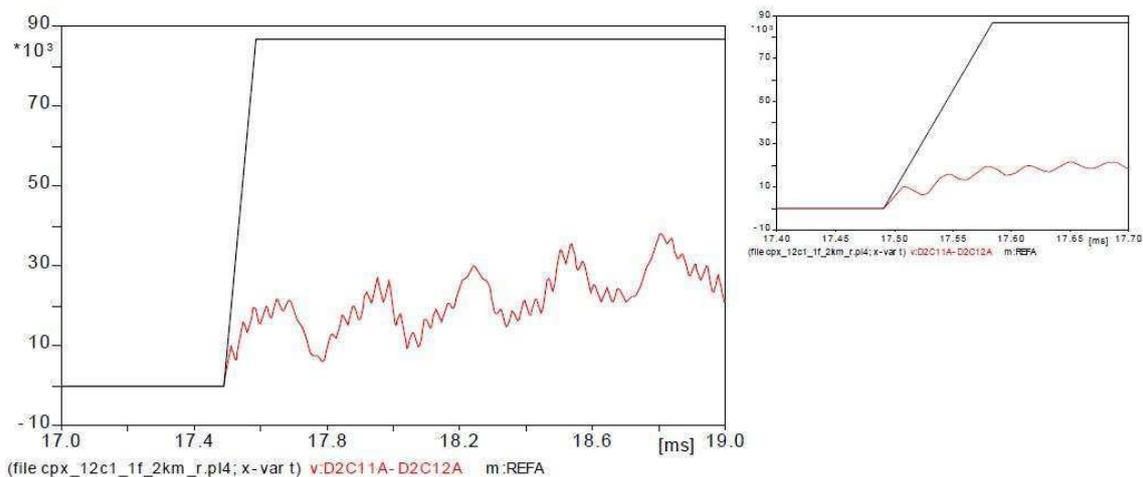


Figura 21 – Falta quilométrica a 2 km do disjuntor 12C1 da subestação CPX.

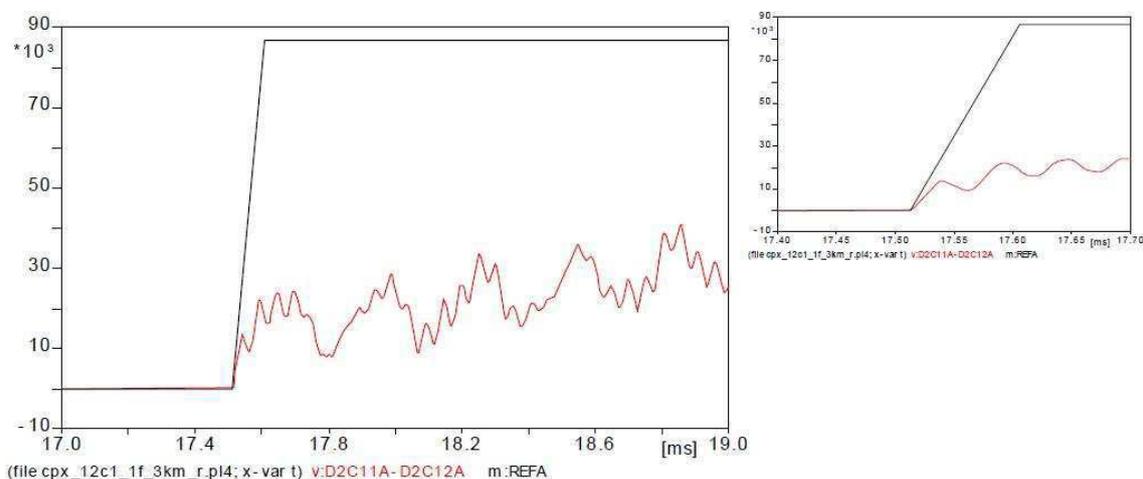


Figura 22 – Falta quilométrica a 3 km do disjuntor 12C1 da subestação CPX.

Os valores de pico da TRT e da taxa de crescimento (TCTRT) para o disjuntor 12C1 (CNI = 20 kA) são ilustrados na Tabela 7.

Tabela 7 – Resultados para o disjuntor 12C1- Falta Quilométrica.

Distância do Disjuntor ao ponto de Falta	Resultados Obtidos em Simulação				Envoltória de Norma		Disjuntor Adequado ?
	Corrente Máxima (kA)	% CNI	TCTRT (kV/μs)	Uc (kV)	TCTRT (kV/μs)	E2 (kV)	
1 km	2,51	12,6	0,53	68,1	0,930	86,8	SIM
2 km	2,43	12,2	0,61	68,1	0,930	86,8	SIM
3 km	2,35	11,8	0,55	70,0	0,930	86,8	SIM

Em relação ao estudo de falta trifásica não aterrada, para os disjuntores 12B1 e 12J4, e falta quilométrica aplicada no disjuntor 12C1, observa-se que os mesmos estão adequados às manobras relativas a estes tipos de ocorrências.

9 Conclusão

Análises com o aperfeiçoamento dos procedimentos propostos e modelos apropriados mostram boa compatibilidade quanto aos resultados de dimensionamento de disjuntores frente os requisitos previstos pelas normas técnicas de fabricação dos equipamentos.

A partir dos resultados obtidos, no domínio da frequência e do tempo, observa-se que o estudo do espectro de frequência das redes externas pode proporcionar bons indicativos para definir a delimitação das barras de fronteira do sistema de potência. Neste caso, a utilização de equivalentes de curto-circuito calculados a frequência fundamental a partir do local indicado apresenta resultados confiáveis.

10 Bibliografia

- Araújo, A. E. A., Neves W. L. A., *Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Energia*, Editora UFMG, 2005.
- Azevêdo, W. V. S., *Equivalentes de Redes Elétricas e Redução de Tensão de Restabelecimento Transitória*, Dissertação de Mestrado, UFCG, 2010.
- CCON – Comitê Coordenador de Operações Norte-Nordeste, *Metodologia e Critérios para a Análise de Adequação de Disjuntores quanto à Tensão de Restabelecimento Transitória*, Recife, junho 1991.
- Dommel, H. W., *EMTP Theory Book*. Department of Electrical Engineering – The University of British Columbia, Vancouver, 1996.
- Dufournet, D., Montillet, G. F., “Harmonization of TRVs in ANSI/IEEE and IEC Standards for High Voltage Circuit Breakers Rated less than 100 kV”, *Power Engineering Society General Meeting*, vol. 1, pp. 1019-1024, June 2005.
- Greenwood, A., *Electrical Transients in Power Systems*, New York: John Wiley & Sons INC., 1993.

- IEC 62271-100, *High Voltage Switchgear and Controlgear – Part 100: High-Voltage Alternating Current Circuit-Breaker*, Edition 1.2, October 2006.
- IEEE Working Group 3.4.17. “Impact of Shunt Capacitor Banks on Substation Surge Environment and Surge Arrester Applications”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, EUA, 11(4):1798-1809, 1996.
- Leuven EMTP Center, *ATP - Alternative Transients Program Rule Book*, Belgium, July 1987.
- Nobre, D. M., *Estudo de Adequabilidade de Disjuntores de Classe 15 kV às Solicitações de TRT*. Dissertação de Mestrado, UFPB, Campina Grande, 1999.
- ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico, *Procedimentos de Rede: Sub-módulo 23.3: Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos*, Resolução 1051/07 – 25/09/2007.
- Wang, X., Wilson, P., Zhou, J., Muthumuni, D., Kell, D., Lowie, K. W., “Transient Recovery Voltage Investigation of 15 kV Circuit Breaker Failure”, *IPST – International Conference on Power Systems Transients*, Montreal, Canada, June 2005.
- Zanetta Júnior, L. C., *Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência*, Editora da Universidade de São Paulo, 2003.