



Simulação de Falta Monofásica na Interligação Nordeste-Sudeste utilizando o ATPDraw: Validação da Manobra Monopolar.

Davi Franco Rêgo¹, Milton Elvis Zevallos²

¹Estudante de Engenharia Elétrica - IFBA., Bolsista FAPESB e-mail: davifr@gmail.com

²Doutorando em Engenharia Elétrica – UNICAMP, Professor de Eletrotécnica - IFBA. e-mail: miltonelvis@ifba.edu.br

Resumo: Este trabalho trata da simulação de faltas monofásicas nas linhas de transmissão da interligação Nordeste-Sudeste visando verificar o sucesso da manobra abertura/religamento monopolar. Para tal foi utilizada a interface gráfica do ATP denominada ATPDraw onde foi possível simular cada trecho do “linhão” utilizando o modelo de linha constante (LCC). Foi verificada a possibilidade de efetuar o religamento monopolar da linha, de forma a não ter que reduzir severamente a transmissão desse tronco importante do sistema elétrico brasileiro. Verificou-se que a manobra é bastante plausível e pode ser implementada. Estudos dinâmicos devem ser feitos sobre o assunto para que esta possa ser uma manobra totalmente validada.

Palavras-chave: Falta monofásica, Linha de transmissão, ATPDraw, Manobra monopolar, Reator de neutro.

1. INTRODUÇÃO

A simulação de sistemas de transmissão de energia elétrica é de grande importância para o correto dimensionamento dos componentes e avaliar as possibilidades de efetuar manobras com segurança. As descargas atmosféricas são responsáveis por grande parte das interrupções não programadas dos sistemas de transmissão de energia. Devido à alta incidência local destes defeitos, existe a necessidade de investigar a possibilidade de melhorar o desempenho das linhas sob condição faltosa.

A ocorrência de um defeito em uma linha é resolvido com o desligamento, desenergização e religamento (automático ou não) das três fases, não importando se mais de uma das fases foi atingida. Os defeitos atmosféricos acontecem, no entanto, na grande maioria dos casos, em apenas uma das fases. O religamento monofásico é dificultado pelo efeito do arco secundário que raramente se extingue por si só, exigindo o desligamento por completo da linha para que esta possa ser novamente re-energizada [1]. O desligamento das três fases pode ser desnecessário, a medida que apenas uma das fases foi atingida. Uma possível solução seria desenergizar e religar após um tempo mínimo denominado tempo morto apenas a fase faltosa de forma automática. Os defeitos atmosféricos acontecem com frequência elevada em todo o país. Este artigo analisa esta possibilidade através da simulação do transitório eletromagnético provocado pela manobra.

A manobra de religamento monopolar exige um sistema de potência pensado para que haja uma correta atenuação do fenômeno do arco secundário. A adição de compensadores de neutro distribuídos ao longo da linha é uma solução comprovada para o problema da redução do arco secundário.

Segundo os dados coletados pelas concessionárias Bonneville Power Administration, no período de 9 de Dezembro de 1967 e 30 de Junho de 1973, e pela Swedish State Power Board entre 1951 e 1975, para linhas de transmissão de 400kV e 200kV confirmam que as faltas monofásicas são largamente predominantes nos sistemas de potência (tabela 1). Os dados mostraram que 93% das faltas em redes 500kV da concessionária norte americana Bonneville Power Administration (BPA) foram monofásicas, enquanto 70% para 400kV e 56% para 200kV respectivamente, também foram monofásicas segundo o estudo da Swedish State Power Board [2]. Fica evidente a necessidade de estudar formas eficazes de realizar o religamento monopolar.

O programa ATP e a interface ATPDraw são largamente utilizados na indústria e centros de investigação para a realização de simulações de transitórios eletromagnéticos. O ATP utiliza para o processamento de dados o método de integração trapezoidal [3,4]. O seu pacote fornece modelos elaborados dos dispositivos elétricos necessários para a realização das simulações, e por isso, foi



escolhido para a realização deste trabalho. No ATPDraw o usuário pode construir um circuito elétrico utilizando o *mouse* e selecionando os componentes a partir dos menus, o programa então gera um arquivo que alimenta o ATP, para em seguida obter-se os gráficos que caracterizam o comportamento do sistema projetado.

O sistema de potência estudado é a linha de transmissão que se inicia na estação geradora de Serra de Mesa, em Goiás e passa pelos municípios de Rio das Éguas, Bom Jesus da Lapa, Ibicoára e Sapeaçu, na Bahia.

Tabela 1 – Estatística de incidência de falhas atmosféricas

	Bonneville Power Administration	Swedish State Power Board	
	500 kV	400 kV	200 kV
Faltas monofásicas para a terra	93%	70%	56%
Faltas bifásicas	4%	23%	27%
Faltas bifásicas com aterramento	2%		
Faltas trifásicas	1%	7%	17%

Fonte: Pamphlet RK 85-201 E Auto-reclosing Edition 1 ABB Relays

2. MATERIAL E MÉTODOS

O ATPDraw é uma ferramenta de programação gráfica que gera os códigos processados pelo ATP. De forma bastante eficiente, com ATPDraw é possível montar o sistema de potência que se deseja simular, executar as simulações modificando parâmetros quando necessário e extrair os resultados através dos gráficos, que traduzem a performance.

Os cálculos dos parâmetros das linhas foram realizados utilizando a ferramenta LCC (*Line/Cable Calculations*) do ATPDraw. O LCC é um bloco que recebe como parâmetros de entrada as características elétricas dos condutores da linha, separação entre fases, altura e separação entre sub-condutores de fase, etc. A Figura 2 explicita as alturas e distâncias dos condutores e pára-raios utilizados, assim como os dados geométricos dos sub-condutores dos feixes e que foram adicionadas ao modelo LCC do ATPDraw para que este realizasse os cálculos dos parâmetros elétricos automaticamente. Os feixes externos da linha alongados verticalmente correspondem a um arranjo não convencional que procura o aumento de potência transmitida e cuja análise não será abordada neste trabalho. Para o caso em questão, o modelo Bergeron [5,6] foi utilizado supondo que os parâmetros elétricos são constantes e distribuídos ao longo da linha. A linha foi considerada transposta, com efeito pelicular e com aterramento segmentado. No Quadro 1 são mostradas as características elétricas dos condutores e pára-raios fornecidos para o LCC. A resistividade do solo média simulada foi de 4000 Ωm e a frequência da rede 60Hz. Ao todo, foram utilizados quatro segmentos de blocos LCC, com distâncias distribuídas de acordo com Figura 1. O sistema de transmissão trifásico em 500 kV tem no total 1061,6 km.

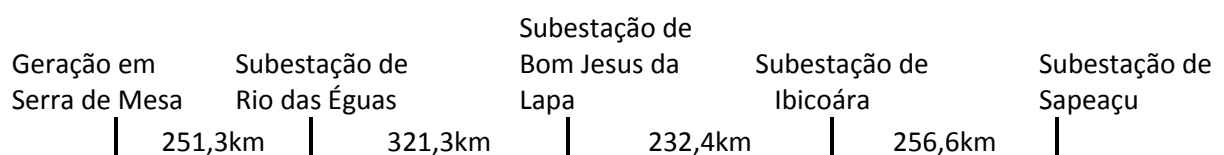


Figura 1 – Distribuição das linhas LCC ao longo da linha de transmissão de acordo com as subestações

Quadro 1 – Dados elétricos dos condutores e para-raios no sistema de transmissão utilizado.

Dados físicos do cabo pára-raios	
Tipo	Aço Galvanizado
Código	EHS 3/8" galvanização classe B
Diâmetro externo (mm)	9,144
Resistência CC a 25°C (Ω/km)	3,51

Dados físicos do cabo de fase	
Tipo	CAA
Código	RAIL
Diâmetro externo (mm)	29,59
Diâmetro interno (mm)	7,4
Resistência CC a 25°C (Ω/km)	0,06114

Na geração em Serra de Mesa, as três estações geradoras foram representadas por fontes ideais em série com cargas RL, que representam as características reais dos equipamentos de geração. Os parâmetros elétricos simulados foram $R = 0,00377\Omega$ e $L = 0,3436$ mH para as três fases dos três geradores. A tensão de geração foi ajustada para que se obtivesse o valor exigido pela ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico), ou seja, com a tolerância de $\pm 5\%$.

Em série com a geração foram posicionados os transformadores elevadores, cuja função é elevar a tensão da geração para os valores nominais dos sistemas de transmissão. No modelo de transformador utilizado, os dados de entrada reais utilizados foram, no primário 15 kV, resistência de enrolamento $0,003 \Omega$, indutância de enrolamento $0,2244$ mH com ligação em delta. No secundário, os parâmetros foram 288,67 kV, resistência de enrolamento $0,795 \Omega$, indutância de enrolamento $83,125$ mH com ligação em estrela.

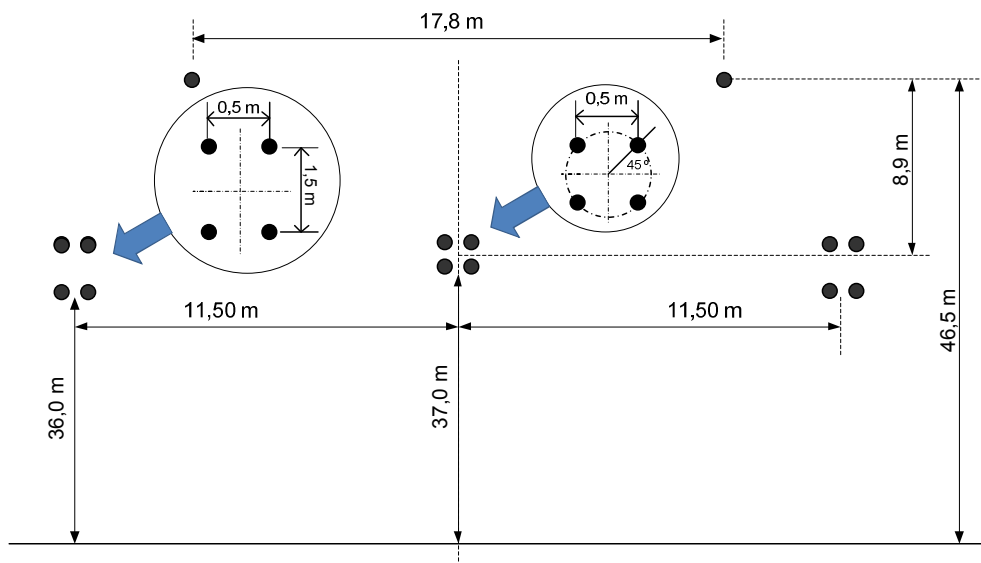


Figura 2 – Parâmetros geométricos da linha de transmissão utilizados para o cálculo dos parâmetros elétricos pelo bloco LCC

Chaves seccionadoras temporizadas foram utilizadas entre cada trecho da linha para simular uma eventual abertura de algum segmento. Conectados a essas chaves estavam as pontas de prova de medição de tensão, que fornecem os pontos de onde se obtém o sinal de tensão para análise. Os reatores de linha adicionados para atenuação do *efeito ferranti* foram inseridos também próximos às chaves seccionadoras. Os reatores foram distribuídos de forma a manter o nível de tensão dentro da faixa permitida pela norma. A correta disposição dos reatores pode ser verificada na Figura 3.

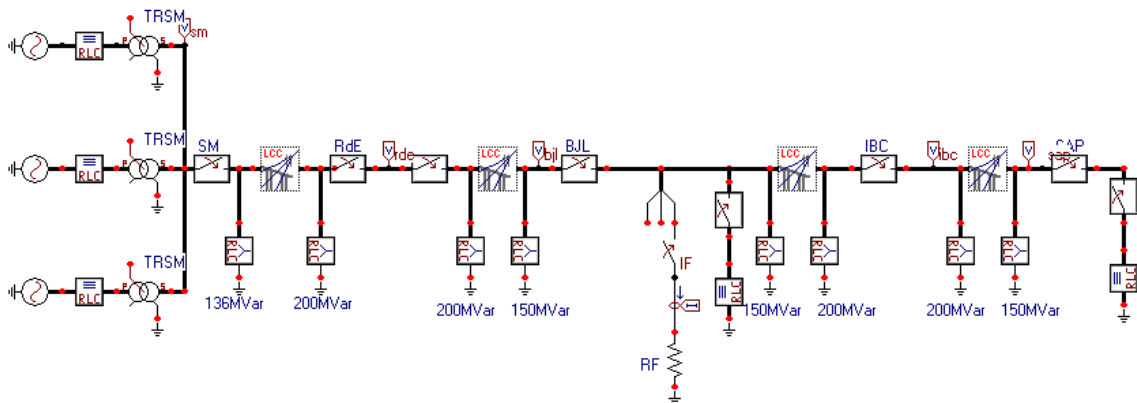


Figura 3 – Modelo do sistema de transmissão construído no ATPDraw com falta em Bom Jesus da Lapa

Foram utilizados bancos de compensação reativa em derivação trifásicos e distribuídos ao longo da linha com valores nominais de 136 Mvar, 150 Mvar e 200 Mvar e alocados nas subestações como mostrado na Figura 3. Para uma minimização da corrente de arco secundário foi instalado um reator para terra a partir do neutro dos reatores de fase ligados em estrela. Esse reator é denominado de Reator de Neutro. Os reatores de neutro instalados nos bancos de compensação reativa em derivação são calculados a partir da reatância de sequência positiva e zero dos parâmetros longitudinais da linha. Para este trabalho simulou-se o sistema de transmissão com o intuito de verificar a redução da corrente de arco secundário utilizando 3 considerações:

- Sistema de transmissão com bancos de compensação sem reator de neutro.
- Sistema de transmissão com bancos de compensação com reator de neutro $X_n = 106 \Omega$
- Sistema de transmissão com bancos de compensação com reator de neutro $X_n = 800 \Omega$

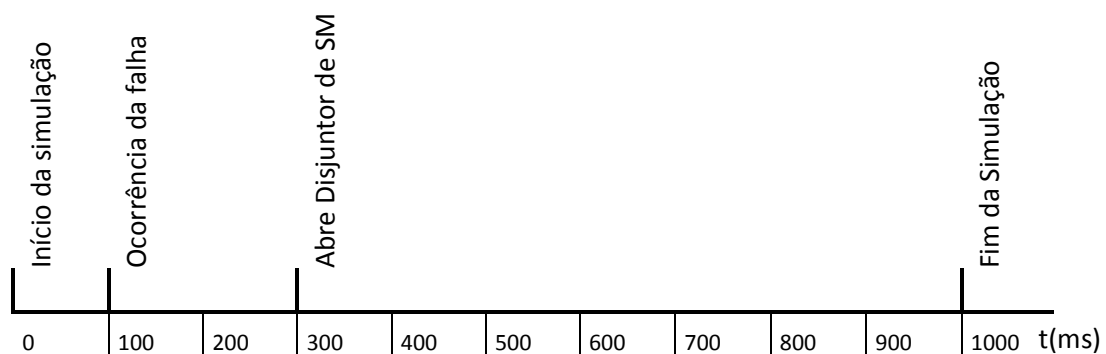


Figura 4 – Sequência temporal de eventos na simulação

As simulações foram realizadas obedecendo a sequência temporal mostrada na Figura 4, com a tensão no início da simulação com ângulo de fase zero. A falta na fase A acontece em 100 ms e o disjuntor da fase A de Serra de Mesa atua 200 ms após a ocorrência da falha. A falha foi simulada através de uma resistência ligada à terra, que teve seu valor variado para 1, 25, 50 e 100 Ω em diferentes simulações. A corrente residual que permanece sobre essa resistência no final da simulação é a corrente de arco secundário, que é uma aproximação satisfatória para este estudo preliminar.

O local de ocorrência da falta também é um fator importante a ser levado em consideração e por isso foram simuladas as situações em que a falta acontece nas seções do “linhão” próximos a Serra de Mesa, a Rio das Éguas, a Bom Jesus da Lapa, a Ibicoára e a Sapeaçu.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O sucesso da manobra monofásica depende do valor eficaz da corrente de arco secundário de forma que quanto maior este valor, menor é a chance de sucesso da manobra. A corrente de arco secundário deve ser baixa (menor que 50 A, segundo hipótese) para que exista uma alta probabilidade de auto-extinção [7]. Esta análise em regime permanente permite identificar o local onde a corrente de arco secundário se torna mais severa. Não foi abordada neste trabalho a análise de um modelo de arco mais exato mesmo porque ele depende de vários fatores aleatórios já que os arcos são formados no ar. Uma análise dinâmica com um modelo bem representado do arco secundário é um estágio posterior a este estudo.

O comportamento da corrente de arco secundário foi analisado através dos gráficos obtidos nos pontos indicados pelas pontas de provas nos segmentos de Serra de Mesa (SM), Rio das Éguas (RdE), Bom Jesus da Lapa (BJL), Ibicoara (IBC) e Sapeaçu (SAP). A corrente eficaz do arco secundário é obtida medindo-se os valores de pico no momento em que se tentaria o religamento, ao término da simulação (em torno de 670 ms após a abertura da fase). É a partir de gráficos como o da Figura 5, que mostra como a corrente de falta se comporta ao longo da simulação, que se obtém a corrente de arco secundário.

A falta foi aplicada nos diversos segmentos do “linhão”, como indicado no exemplo do esquema de simulação da Figura 3 e através do resistor de falta (RF). O sistema foi simulado sem carga (disjuntores de distribuição de SAP em aberto) e com os eventos e manobras ocorrendo de acordo com a sequência temporal exibida na Figura 4.

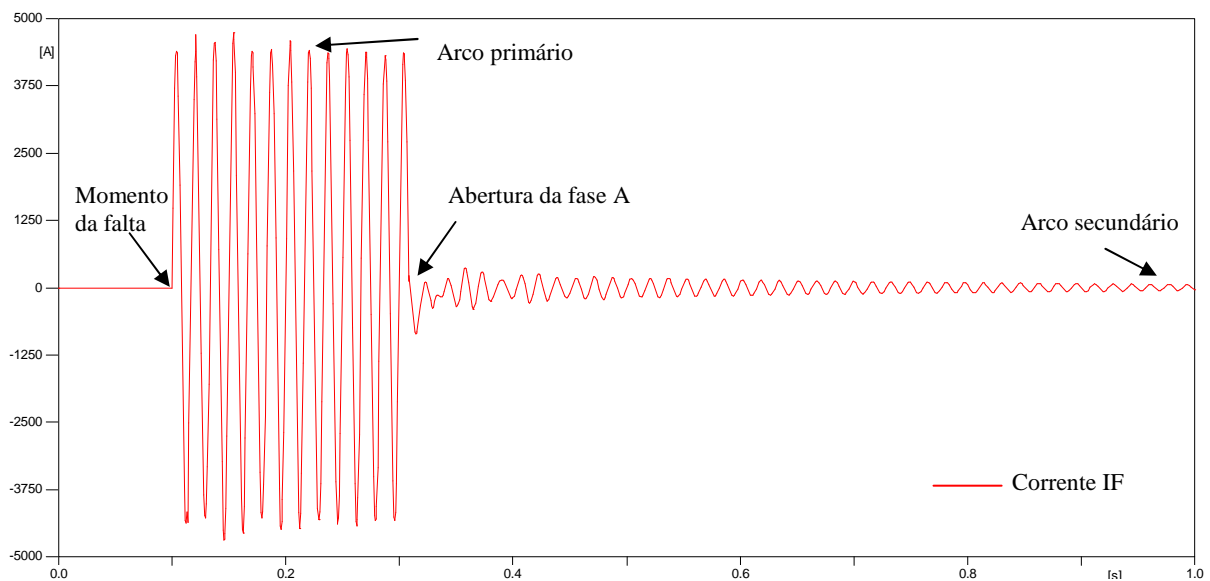


Figura 5 – Gráfico resultante da simulação com falta em SM, $R_f = 50\Omega$ e $X_n = 106\Omega$.

Foram realizadas simulações variando o local da falta cinco vezes, a resistência de falta quatro vezes e a compensação reativa em derivação sem reator de neutro e com reator de neutro, o que resultou em sessenta simulações. Os dados obtidos permitem avaliar o comportamento da corrente de arco secundário ao variar estes parâmetros. As tabelas mostram que existe uma tendência da corrente de arco secundário abaixar com o aumento da resistência de falta, porém pode haver exceções, como no caso de uma falta acontecer em SM com reatores de 106 Ω , neste caso a corrente foi menor para $R_F = 25 \Omega$. Em comparação feita para todos os casos em que a resistência de falta simulada foi de 1 Ω , observa-se uma significativa redução da corrente de arco secundário quando existe um reator de neutro, no melhor dos casos, a corrente caiu de 138 A para 41,6 A e assim possibilitando o religamento monopolar considerando a hipótese de que existe alta probabilidade de extinção para correntes menores que 50 A.

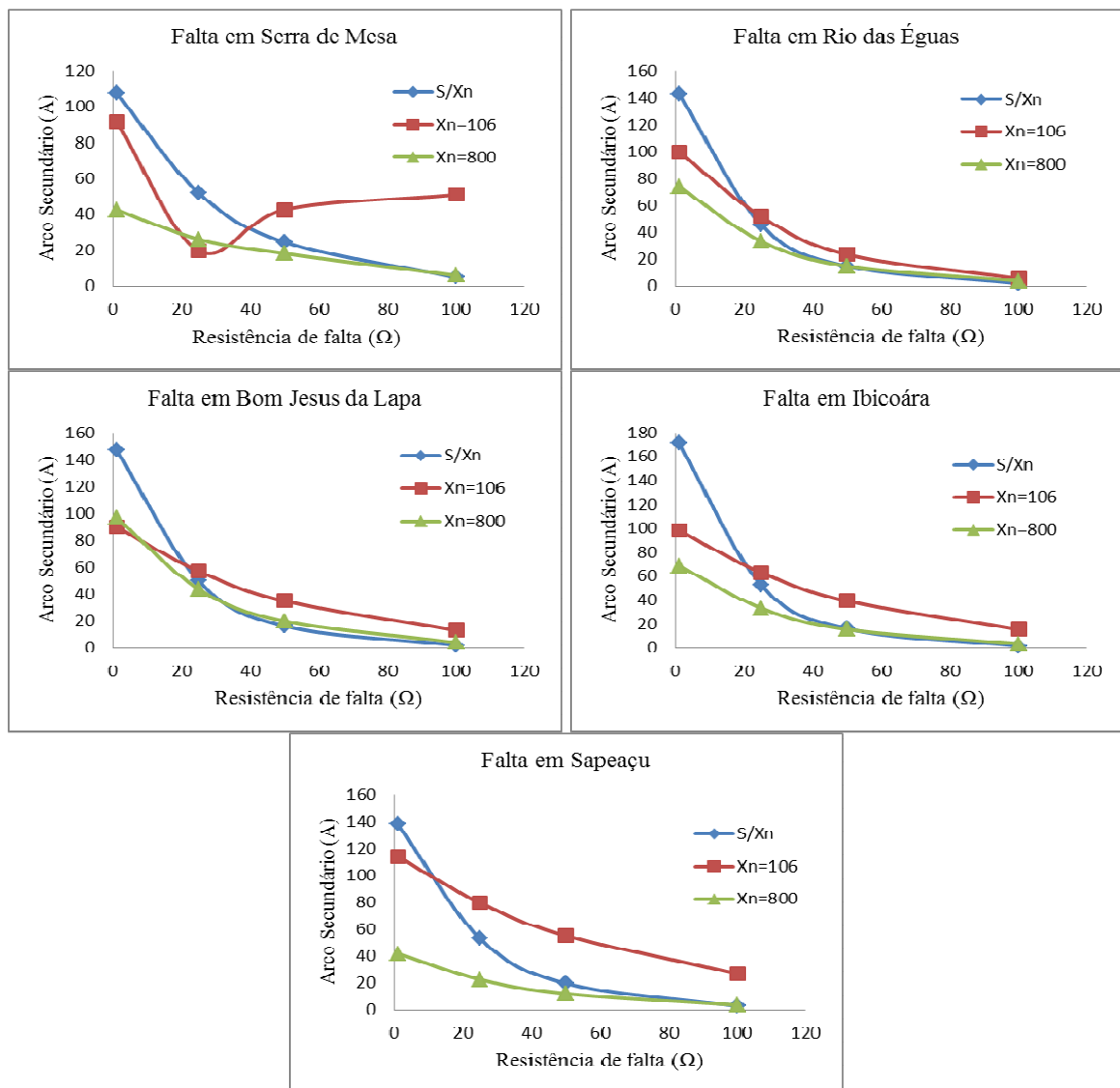


Figura 6- Gráficos das correntes de arco secundário em cada subestação ao variar a resistência de falta e reatância de neutro



4. CONCLUSÕES

Através dos dados apresentados obtidos por meio de simulação é possível concluir que a inserção de reatores de neutro reduz significativamente a severidade do arco secundário. Nestes casos, a presença dos reatores de neutro distribuída ao longo da linha reduziu a corrente de arco secundário a um nível que possibilita o sucesso da manobra de religamento monopolar.

A análise da manobra foi considerada em regime permanente já que a corrente de arco secundário é mantida pelo acoplamento eletromagnético das fases sãs energizadas em frequência fundamental e a fase com defeito.

Os resultados demonstraram que a representação de um modelo de arco é importante para definir valores de corrente de arco secundário mais perto do real, principalmente para uma posterior análise dinâmica do sistema.

A representação da falta através de uma resistência simples permitiu conhecer os valores de corrente de arco secundário nos casos de faltas monofásicas simuladas em cinco trechos da linha. Essas simulações são importantes principalmente para um estágio a priori da projeção e operação de qualquer linha de transmissão.

O ATPDraw foi uma ferramenta ótima para o que se pretendeu, já que a interface gráfica ajudou muito quanto à construção do sistema utilizado.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às instituições Fapesb pelo apoio financeiro e IFBa pela concessão da infraestrutura física para a realização das atividades relacionadas ao projeto.

REFERÊNCIAS

- [1] Single phase tripping and auto reclosing of transmission lines Committee Report, **Transactions on Power Delivery**, Vol. 7 No.1, 182-192, Janeiro 1992
- [2] ABB Relays, **Folheto Informativo RK 85-201 E Auto-reclosing** Ed 1 1979, 127-132
- [3] Dommell, H. W. **Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single and Multiphase Networks**, IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-88, pag. 388-395, abril, 1969.
- [4] Dommell, H. W.; Meyer, W. S. **Computation of Electromagnetic Transients**, Proc. IEEE, Vol. 62, pag. 983-993, junho, 1974.
- [5] Barthold, L.O. and Carter, G. K. **Digital travelling-wave solutions 1-Single-phase equivalents**, AIEE Transactions, Vol. 80(pt. III):pp. 812-820, December 1961.
- [6] Frey, W and Althammer, P. **The calculation of transients on lines by means of a digital computer**, Brown Boveri Rev., vol. 48, pp. 334-355, May/June 1961.
- [7] Zevallos, M. E., Tavares, M. C. **Redução das correntes de arco secundário em sistemas de transmissão típicos**. Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica, Vol. 20 No. 3, 373-382. 2009