

2. METODOLOGIA E MODELAGEM

2.1 INTRODUÇÃO

A primeira parte desse capítulo apresenta o algoritmo simplificado desenvolvido para a formação de anel entre dois alimentadores, supridos por diferentes subestações de energia. Esse algoritmo, representado através do fluxograma da Figura 2.1, tem o propósito de aperfeiçoar o algoritmo desenvolvido por (SANTOS, 2008).

Com esse novo algoritmo é possível notar a praticidade e flexibilidade empregada nas manobras em caráter de urgência ou situações emergentes em tempo real, além das manobras realizadas em atendimento das programações de serviços na rede de distribuição, manobras essas, que são coordenadas pelos centros de operação dos agentes de distribuição de energia.

Na segunda parte, é apresentado um novo método de paralelismo entre dois alimentadores de distribuição envolvendo subestações de transmissão. Este novo método é baseado em valores de tensão e corrente em regime permanente e nos transitórios eletromagnéticos envolvidos nas manobras de fechamento em anel através de seccionadoras monopolares.

A validação da metodologia descrita na última parte deste trabalho – que está representada de forma detalhada no capítulo 3; concretizou-se através da modelagem dos equipamentos e componentes elétricos no software ATP (Alternative Transients Program) e também da instalação de dois medidores de qualidade de energia, com a finalidade de adquirir as grandezas elétricas no momento das manobras de paralelismos realizadas em campo.

2.2 METODOLOGIA

Como o objetivo principal do trabalho é estabelecer condições de segurança aos eletricitistas de campo, bem como aos equipamentos envolvidos no fechamento em anel, fez-se necessário criar um fluxograma simplificado, visando balizar as ações a serem tomadas pelos técnicos de operação de tempo real. O fluxograma mostrado na Figura 2.1, confeccionado através da metodologia desenvolvida neste trabalho, aborda diretamente manobras de fechamento em anel entre dois alimentadores de diferentes estações transformadoras de distribuição, supridas por diferentes subestações de energia.

Inicialmente, o fluxograma mostra as cargas e as tensões dos alimentadores, onde, por premissa de operação, um deles deve ser capaz de atender a somatória das cargas dos dois alimentadores envolvidos no fechamento em anel, pois, no momento da manobra, caso um dos alimentadores venha a se desligar, não haverá interrupção das cargas envolvidas.

No caso de um dos alimentadores não suportar o carregamento total das cargas envolvidas, o técnico de operação deverá abortar a formação do anel, postergando a manobra para outro período de menor carregamento dos alimentadores.

Outra restrição considerada é a diferença de potencial nos terminais das seccionadoras monopolares manobráveis. O valor da diferença de potencial considerado seguro para a realização das manobras em redes aéreas classe 15 kV, não deve ultrapassar 1.000 V, medidos entre os terminais a montante e a jusante da mesma seccionadora. Caso a diferença de potencial supere este valor, a manobra deve ser tratada considerando, localmente, o estado físico e operacional da seccionadora a ser operada.

Com as condições acima atendidas, o próximo passo é o bloqueio dos relés de religamentos automáticos dos alimentadores envolvidos, a fim de se evitar a reenergização dos alimentadores na ocasião de uma falta provocada pela execução da manobra de fechamento ou abertura do anel.

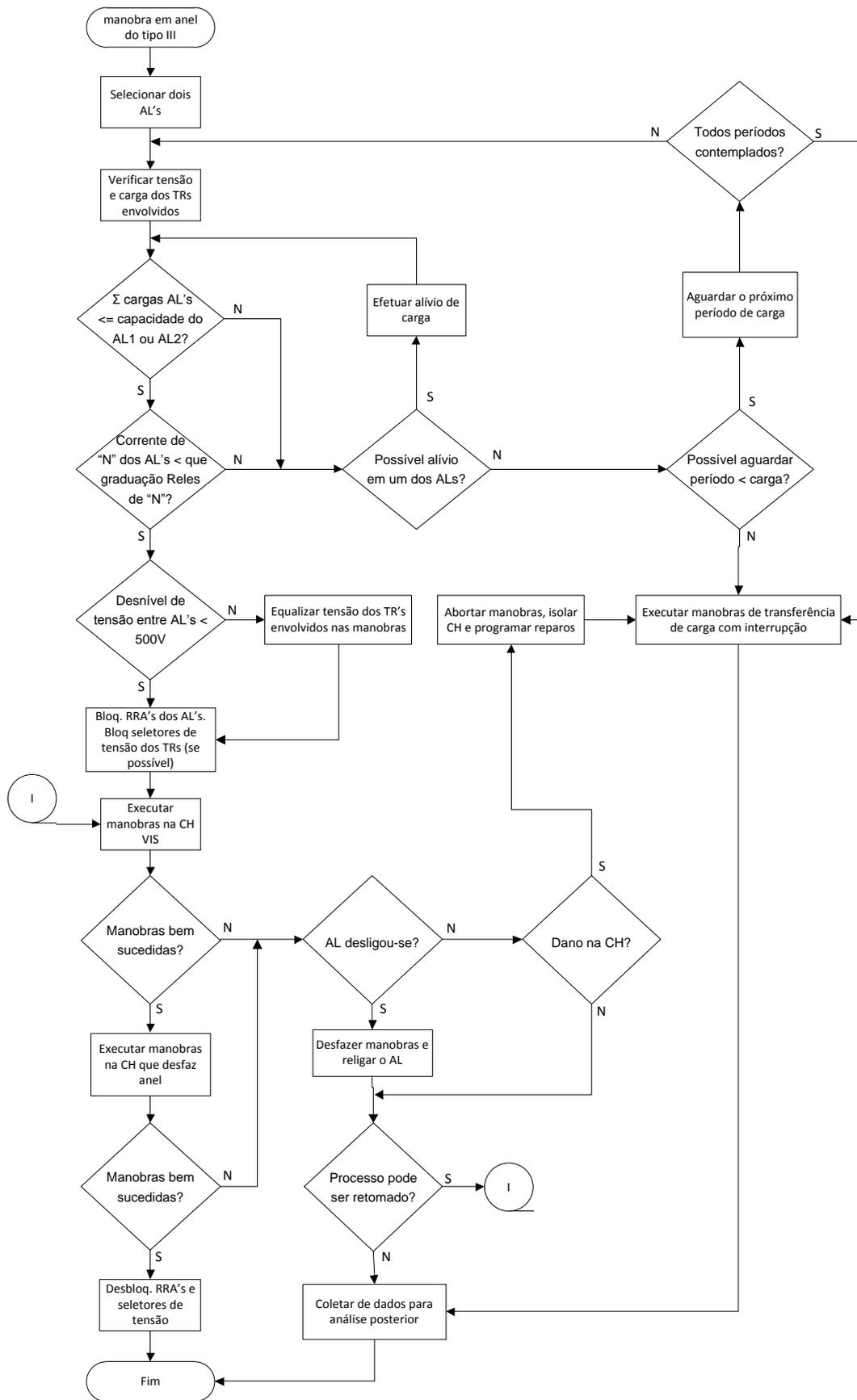


Figura 2.1 – Algoritmo para fechamento em anel entre dois alimentadores.

Após o bloqueio dos relés de religamentos automáticos (RRA), inicia-se o processo de formação do anel entre os alimentadores, efetuando-se o fechamento da seccionadora de vis-à-vis, 43286 e, posteriormente, a abertura do anel através da seccionadora 40343.

No momento inicial das manobras de fechamento em anel, quando o eletricitista de rede inicia o processo de fechamento da seccionadora monopolar selecionada, eventos indesejáveis poderão ocorrer, provocando condições emergenciais de operação ou, até mesmo, anomalias em equipamentos. No caso de danos em equipamentos, as manobras deverão ser abortadas e o técnico de operação deverá retornar os alimentadores para seus estados iniciais de operação.

Em função das características particulares de formação do anel, premissa deste trabalho, houve a necessidade da seleção de duas subestações de transmissão de energia do sistema interligado nacional.

As estruturas elétricas selecionadas para a formação do anel foram as subestações de energia Edgard de Souza e Anhanguera, de responsabilidade operativa da Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista - ISA CTEEP.

O passo seguinte foi a escolha das linhas de subtransmissão aéreas, onde, para este quesito, a restrição seria atender a capacidade de carga firme da estação transformadora de distribuição candidata, somada à sua própria carga. As linhas de subtransmissão aéreas selecionadas foram:

- LTA Edgard de Souza – Mutinga 1 e 2 de 88 kV, e:
- LTA Anhanguera – Mutinga 1 e 2 de 88 kV.

Finalmente, houve a necessidade da seleção dos alimentadores aéreos e suas respectivas estações transformadoras de distribuição.

Dentro do melhor cenário para esta situação, foram selecionados os alimentadores BRU-109 e TAM-114, ambos de 13,8 kV. O BRU-109 é suprido pela estação transformadora de distribuição Barueri, conectada na linha de subtransmissão aérea Edgard de Souza – Mutinga 1 e 2. Já o TAM-114 é suprido pela estação

transformadora de distribuição Tamboré que está conectada na linha de subtransmissão aérea Anhanguera – Mutinga 1 e 2.

A Figura 2.2 mostra a configuração das subestações de energia Edgard de Souza e Anhanguera, das linhas de subtransmissão Edgard de Souza – Mutinga e Anhanguera – Mutinga, bem como das estações transformadoras de distribuição Barueri e Tamboré.

O diagrama unifilar apresentado abaixo contempla somente as estações transformadoras envolvidas nas manobras de fechamento em anel, onde, por simplicidade, as demais cargas dessas linhas aéreas não foram apresentadas nesse diagrama.

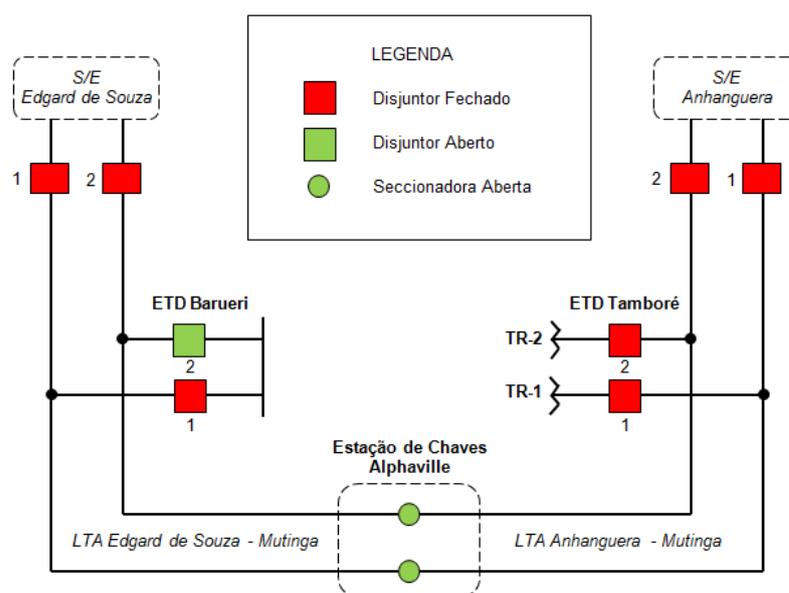


Figura 2.2 – Diagrama unifilar das S/Es, LTAs e ETDs.

A linha de subtransmissão aérea Edgard de Souza – Mutinga, circuitos 1 e 2, é suprida pela subestação de energia Edgard de Souza. Já a linha Anhanguera – Mutinga, circuitos 1 e 2, é suprida pela subestação Anhanguera, ambas de responsabilidade operativa da ISA CTEEP. A subestação Edgard de Souza possui quatro bancos de transformadores de 230/88 kV. Os bancos de transformadores,

que são ligados em paralelo, quando somados, fornecem ao Sistema Interligado um total de 550 MVA. A Figura 2.3 mostra em detalhes a configuração dos equipamentos instalados na subestação Edgard de Souza, juntamente com as linhas de subtransmissão aéreas, de responsabilidade operativa da distribuidora de energia local AES Eletropaulo.

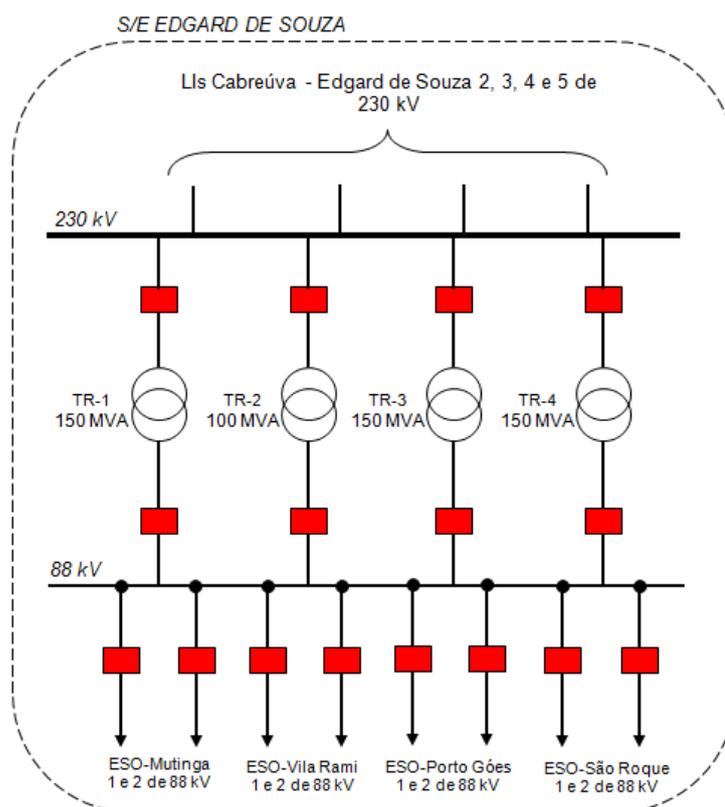


Figura 2.3 – Diagrama unifilar da S/E Edgard de Souza.

Devido às diferenças nas características elétricas dos transformadores de potência, somando-se ao fato que os transformadores são os principais ativos de uma subestação, sofisticados sistemas de proteção são instalados para proteger esses equipamentos, protegendo-os de curtos-circuitos ou outro tipo de falta. A subestação de energia Anhanguera, inaugurada recentemente, possui três bancos de transformadores de 345/88 kV ligados em paralelo, onde juntos, fornecem ao sistema interligado um total de 1200 MVA.

A Figura 2.4 mostra a configuração dos equipamentos dessa subestação.

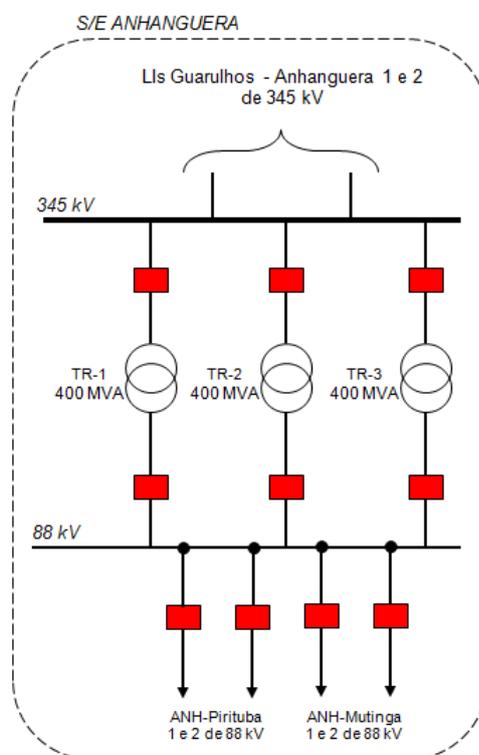


Figura 2.4 – Diagrama unifilar da S/E Anhanguera.

Com a continuidade da análise das duas subestações envolvidas nas manobras de paralelo, focando o comportamento das cargas envolvidas no fechamento em anel, faz-se necessário o estudo dos carregamentos dos secundários dos transformadores das subestações Edgard de Souza e Anhanguera.

A Figura 2.5 mostra o comportamento das cargas das subestações de transmissão. Ficam evidentes as diferenças nas amplitudes das cargas, porém, pequenas e com as mesmas tendências temporais.

Os valores das cargas nas barras de Edgard de Souza e Anhanguera não inibem o processo de paralelismo. As duas subestações são capazes de suportar as cargas das linhas de subtransmissão, caso as manobras de fechamento em anel resultem algum problema técnico-operacional nas estações transformadoras envolvidas.

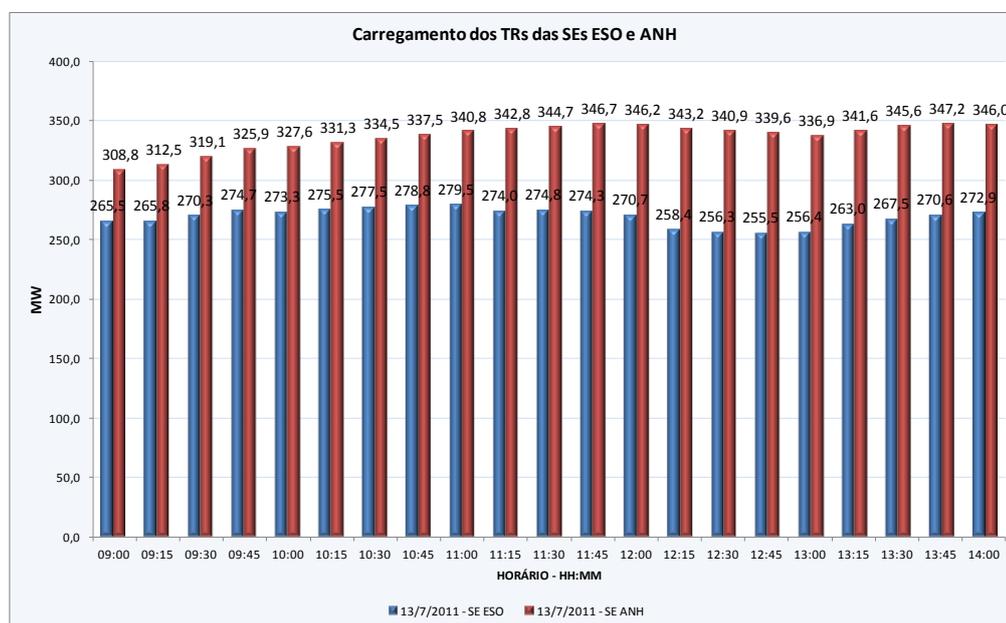


Figura 2.5 – Carregamentos secundários dos transformadores das S/Es Edgard de Souza e Anhanguera.

Fonte: AES Eletropaulo.

Contudo, com a confirmação da capacidade firme das subestações da ISA CTEEP, o passo seguinte é a análise das configurações das estações transformadoras de distribuição.

A Figura 2.6, separada em dois diagramas, mostra a estação transformadora de distribuição Barueri, uma das mais modernas estações da AES Eletropaulo.

A estação transformadora Barueri é suprida pelo disjuntor do circuito 1 de 88 kV da linha de subtransmissão Edgard de Souza - Mutinga. O disjuntor do circuito 2 de 88 kV fica habilitado no sistema de transferência automática, fazendo com que a estação transformadora seja restabelecida neste circuito quando faltar tensão no circuito 1 por problemas internos na subestação Edgard de Souza, ou mesmo quando este circuito apresentar algum defeito ou falta.

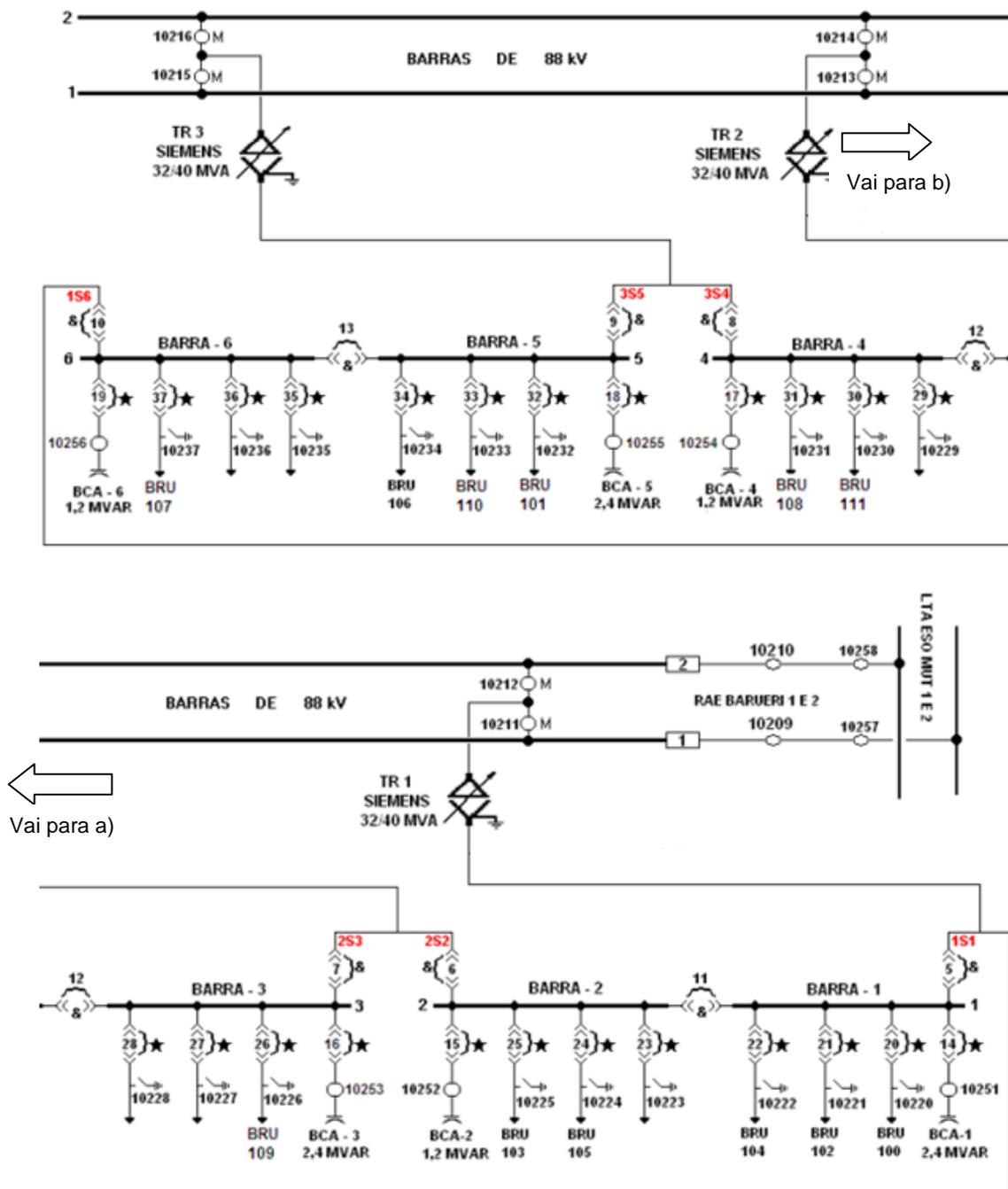
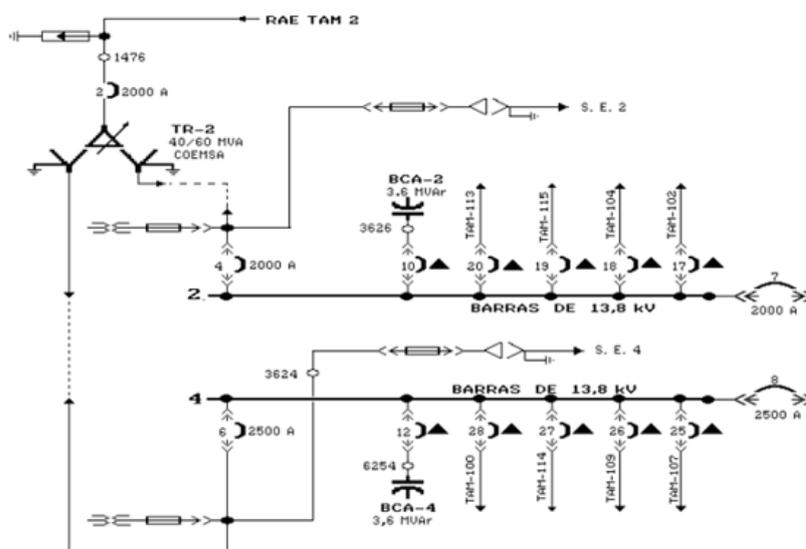


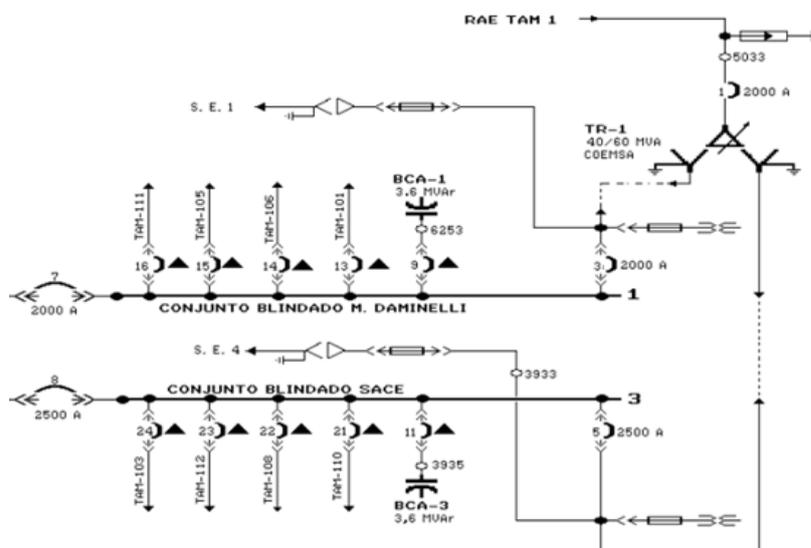
Figura 2.6 – Diagrama unifilar da ETD Barueri.

Fonte: AES Eletropaulo.

A outra estação transformadora de distribuição selecionada para a formação do anel, envolvendo as subestações de transmissão Edgard de Souza e Anhanguera, foi a ETD Tamboré, conforme apresentado na Figura 2.7.



(a)



(b)

Figura 2.7 – Diagrama unifilar da ETD Tamboré: a) Transformador 2, alimentando barras 2 e 4 de 13,8 kV; b) Transformador 1, alimentando barras 1 e 3 de 13,8 kV .

Fonte: AES Eletropaulo.

Diferente da configuração da estação transformadora distribuição Barueri, a ETD Tamboré está na configuração conhecida como “Padrão 76”. Essa configuração possui dois transformadores ligados em carga, um em cada ramal da linha de subtransmissão de 88 kV e, curiosamente, possui este nome pois o projeto construtivo dessa configuração foi desenvolvido em 1976.

Cada um dos dois transformadores da estação transformadora Tamboré alimenta duas barras secundárias de distribuição na tensão de 13,8 kV, onde cada barra secundária possui 4 alimentadores aéreos primários de distribuição. Cada secundário está limitado a 30 MVA, aproximadamente 1255 A, conseqüentemente, o transformador de potência, com capacidade de 60 MVA, atende um carregamento de até 2500 A.

O sistema de transferência automática da estação transformadora de distribuição Tamboré está implantado nos disjuntores 7 e 8 – interligação das barras 1/2 e 3/4. Esse sistema de transferência entra em operação quando há falta de tensão em um dos circuitos de 88 kV, ou mesmo quando um dos transformadores entra em falta. Nesse instante, os disjuntores 7 e 8 são fechados, automaticamente, após a abertura dos disjuntores primário e secundários do transformador em falta, alimentando as barras desenergizadas devido a atuação do sistema de proteção, ou simplesmente desenergizadas por falta de tensão na linha de subtransmissão aérea.

Focando os efeitos transitórios e em regime permanente, provocados por manobras de fechamento em anel entre subestações de energia, o tópico seguinte aborda a modelagem dos alimentadores e subestações, a fim de comprovar a viabilidade desse tipo de condição operacional, considerando o arranjo do tipo IX, mostrado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Possibilidades de manobras de paralelismos entre alimentadores.

Fonte: (SANTOS, 2008).

Configuração Tipo do arranjo	Alimentadores da mesma ETD?	Alimentadores supridos pelo mesmo TR?	TRs de mesma capacidade em MVA?	ETDs supridas pela mesma Linha de Subtransmissão?		Mesma S/E?
				S	N	
I	S	S	N	X		S
II	S	S	S		X	S
III	N	S	S	X		S
IV	N	S	S		X	S
V	N	S	S		X	S
VI	N	S	N	X		S
VII	N	S	N		X	S
VIII	N	S	S		X	N
IX	N	N	N		X	N

2.3 MODELAGEM

A modelagem do sistema elétrico envolvido nos estudos para a formação do anel, juntamente com a determinação do cenário de manobras dos equipamentos, demandaram análises mais detalhadas e criteriosas.

Utilizando-se do formato das classificações de (DURK; LATEEF; BAGHZOUZ; 2004), os alimentadores foram modelados e estudados no software Cymdist (Distribution System Analysis), da CYME International T&D, bem como no programa de transitório eletromagnético ATP (Alternative Transient Program).

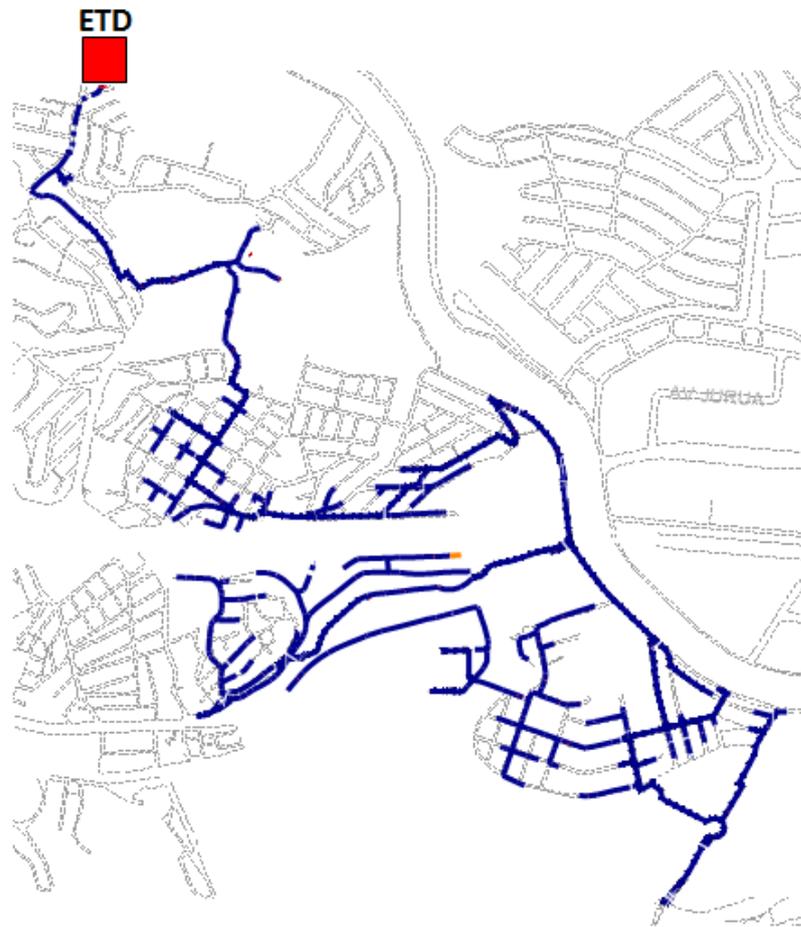
No caso do aplicativo da CYME, que analisa as redes em regime permanente, os alimentadores foram estudados a fim de se entender o comportamento do fluxo de carga na configuração radial e em anel fechado. Segundo (PFITSCHER, et al, 2012), os estudos de fluxo de carga devem preceder as formações de paralelismo, pois os limites dos equipamentos envolvidos devem ser resguardados.

Já na ferramenta ATP, que permite a simulação de transitórios eletromagnéticos em redes polifásicas com configurações arbitrárias, através de matrizes de admitâncias de barras, o objetivo foi estudar os transitórios eletromagnéticos estabelecidos no momento do fechamento e abertura das chaves seccionadoras manobradas.

Toda a modelagem realizada nos aplicativos citados anteriormente, considerando os equipamentos da AES Eletropaulo e ISA CTEEP, demandaram parâmetros elétricos e dados técnicos que podem ser consultados no anexo deste trabalho.

A Figura 2.8, a seguir, mostra a configuração e trajeto real dos alimentadores BRU-109 e TAM-114, ambos de 13,8 kV.

A representação gráfica da Figura 2.8 se dá através do aplicativo xOMINI Maps, desenvolvido pela AES Eletropaulo com o intuito de oferecer aos técnicos de operação a visão do trajeto real dos alimentadores de distribuição em ruas e avenidas. O aplicativo xOMINI Maps utiliza como camada de fundo para a plotagem dos alimentadores as ferramentas Google Maps e Street View, da Google®.



(a)



(b)

Figura 2.8 – Diagrama unifilar dos alimentadores vistos no xOMINI Maps: a) BRU-109, e; b) TAM-114.

Fonte: AES Eletropaulo.

Os alimentadores aéreos primários de distribuição da AES Eletropaulo possuem configurações e arranjos distintos e não padronizados.

As características desses alimentadores aéreos primários são determinadas no momento do planejamento e confecção de seu projeto executivo, que muitas vezes acompanha o planejamento e projeto de uma estação transformadora de distribuição que será sua supridora.

Além dos trajetos, das características físicas regionais e geográficas, das características das cargas supridas, constata-se ainda uma grande variação nos comprimentos e bitolas dos condutores primários e secundários dos alimentadores. A Tabela 2.2 apresenta os dados construtivos dos circuitos BRU-109 e TAM-114.

Tabela 2.2 – Comprimentos dos cabos condutores dos alimentadores BRU-109 e TAM-114.

Fonte: AES Eletropaulo.

<i>Trecho/Tipo</i>	<i>Comprimento (km)</i>	
	<i>BRU 109</i>	<i>TAM 114</i>
Primário Aéreo	22,06	8,2
Primário Subterrâneo	0,52	0,69
Secundário Aéreo	17,1	7,49
Iluminação Pública - Aéreo	21,85	9,56
Secundário Subterrâneo	7,42	0
TOTAL	68.95	25.94

De acordo com as características construtivas dos alimentadores citados acima é possível constatar uma grande diferença nos comprimentos dos trechos aéreos primários. As diferenças dos comprimentos são determinantes no comportamento em regime permanente – como fluxo de carga e curto-circuito; e pelos transitórios eletromagnéticos, provenientes das manobras nas chaves monopolares.

Com o objetivo de interpretar os efeitos físicos em regime permanente de forma clara, objetiva e rápida, os alimentadores foram modelados no aplicativo Cymdist, escolhido para a realização dos cálculos elétricos pela facilidade na elaboração e

plotagem dos diagramas unifilares dos alimentadores. Esse software realiza a leitura dos dados cadastrais de equipamentos e componentes dos alimentadores diretamente do GIS (Geographic Information Systems), não dependendo de interface para a extração, pois possui seu próprio extrator de dados.

O GIS é utilizado por concessionárias de energia para cadastro de equipamentos e componentes de sistemas e redes de distribuição.

A Figura 2.10 apresenta o trajeto, em coordenadas geográficas, extraído do GIS, bem como o carregamento do circuito BRU-109, obtido pelo cálculo do fluxo de carga, através do Cymdist.

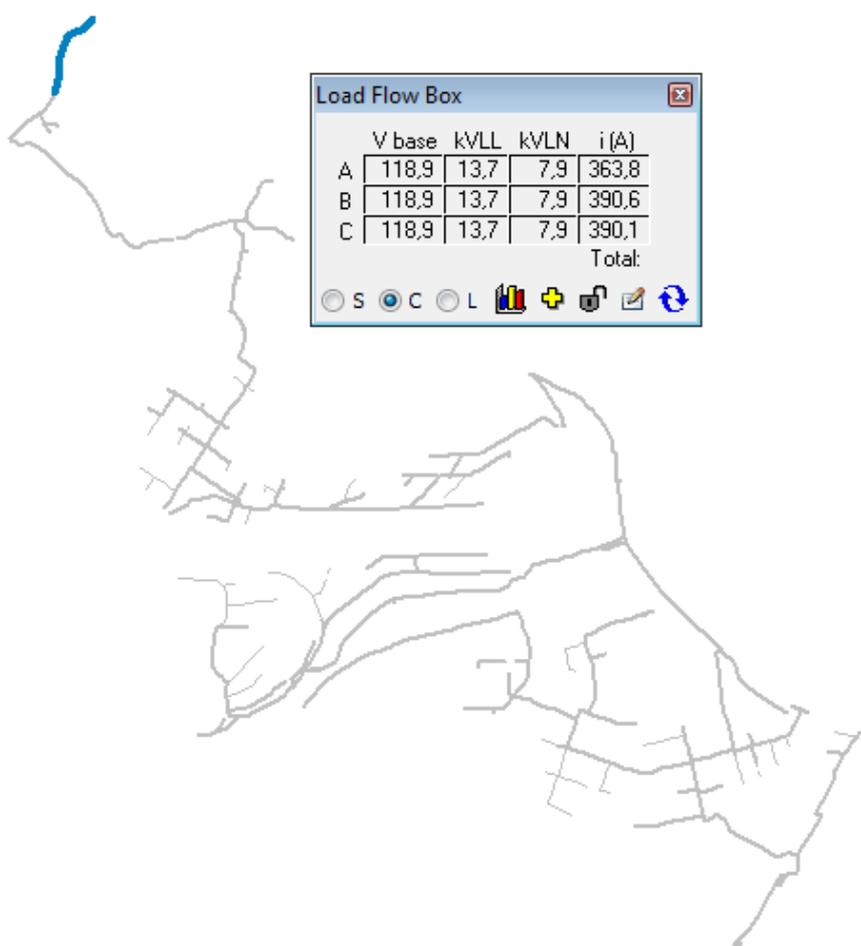


Figura 2.10 – Carregamento do alimentador BRU-109 – Dados do Cymdist.

Fonte: AES Eletropaulo.

Semelhantemente ao realizado para o BRU-109, através da Figura 2.11 é possível verificar os dados resultantes do cálculo do fluxo de carga do alimentador TAM-114, realizado pelo aplicativo Cymdist.

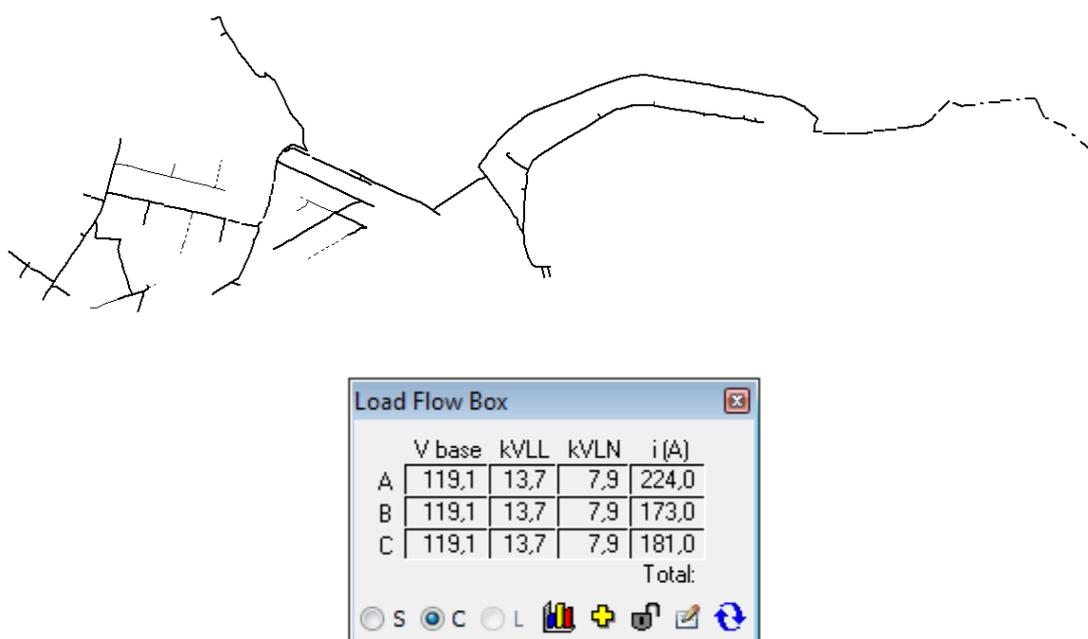


Figura 2.11 – Carregamento do alimentador TAM-114 – Dados do Cymdist.

Fonte: AES Eletropaulo.

Os cabos subterrâneos de saída dos alimentadores, componente que interliga o disjuntor do alimentador à chave seccionadora no início do trecho aéreo, quando da elaboração dos projetos executivos, são dimensionados para capacidades de condução entre 400 e 720A, considerando tensão de operação de 13,8 kV.

Nos estudos de fluxo de potência nos circuitos primários BRU-109 e TAM-114, com capacidades de 600 e 400 A, respectivamente, o principal ponto a ser observado é a capacidade de condução dos cabos, pois estes, por não possuírem ventilação natural, não permitem sobrecargas, gerando um grande limitante operacional para as manobras de tempo real.

Devido essa importante limitação operacional, outro ponto de atenção é o local de

abertura do anel, visto que a carga total de um alimentador, somada ao trecho a ser socorrido do outro alimentador, deve ser menor ou igual à máxima capacidade dos cabos subterrâneos do circuito primário supridor.

Portanto, a previsão de carregamento para o BRU-109, em consequência de alimentar trecho do TAM-114, é de assumir um excedente de 102 A, além de seu próprio carregamento, ou seja, terá um carregamento total de 492 A, atingindo aproximadamente 83% de sua capacidade nominal. A Figura 2.12 ilustra o carregamento do trecho do alimentador TAM-114, além chave seccionadora 40343, que será alimentado pelo BRU-109.

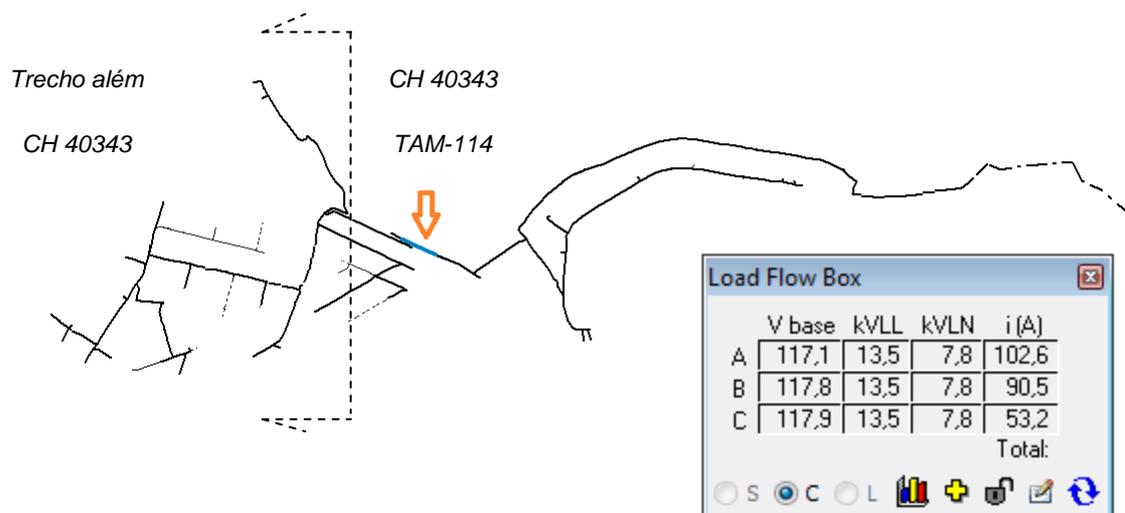


Figura 2.12 – Carregamento de trecho do TAM-114, além seccionadora 40343 – Cymdist.

Fonte: AES Eletropaulo.

Para a simulação da transferência de carga foram considerados os carregamentos dos alimentadores envolvidos, das estações transformadoras de distribuição (ETs), das estações primárias supridoras de consumidores de média tensão (EPs), bem como das estações de iluminação pública (IPs), admitindo-se o período de carga pesada, entre 18 e 20 horas.

Tabela 2.3 – Carregamento dos alimentadores calculados pelo software Cymdist.

<i>Carregamento (A)</i>	<i>CYMDIST</i>	<i>Capacidade (A)</i>
BRU-109	390,6	600
TAM-114	224,0	400

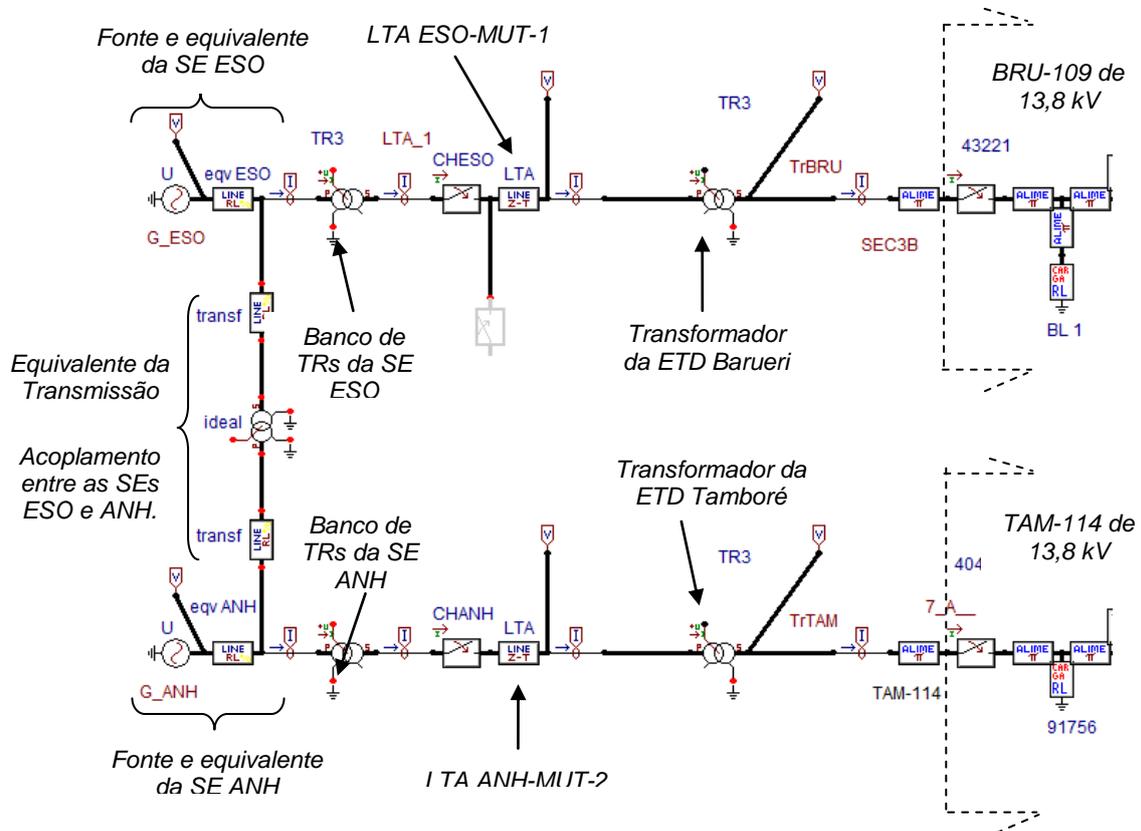
Com os resultados das simulações em regime permanente validados, devido não haver superação dos limites de capacidades de equipamentos e componentes das redes aéreas primárias, outra questão teve de ser considerada: a necessidade da realização dos cálculos de curto-circuito dos dois alimentadores. As condições de curto-circuito dos alimentadores aéreos primários também devem ser analisadas em função dos ajustes dos dispositivos de proteção, pois é importante conhecer as limitações e capacidades de equipamentos como disjuntores e seccionadoras.

Visto que as manobras são momentâneas e que as faltas não são previsíveis, os cálculos de curto-circuito para os alimentadores envolvidos foram realizados através do aplicativo Sinap T&D (Sistema de Análise Integrada AT/MT/BT) e encontram-se no anexo deste trabalho.

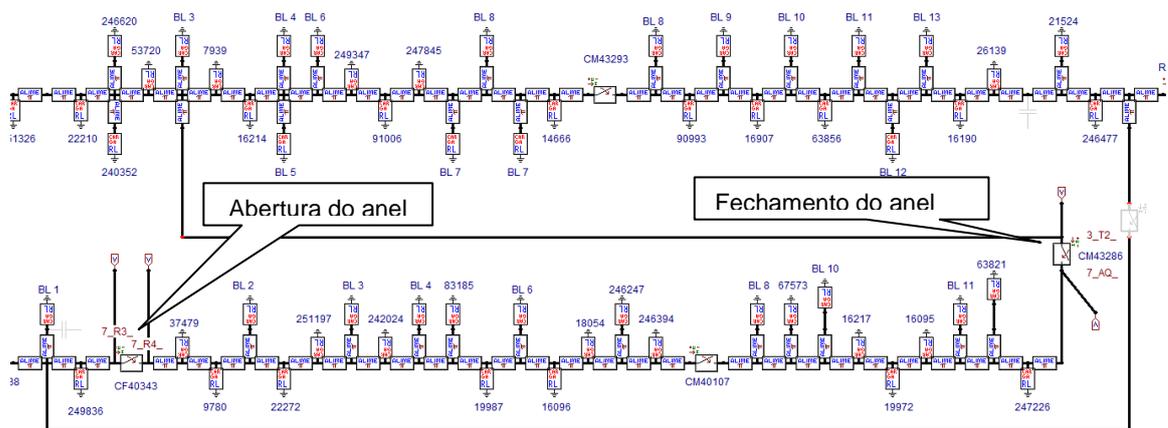
Com o término da avaliação das condições técnicas em regime permanente para os alimentadores modelados, não se exclui a necessidade de testar a reação e resposta do sistema frente aos transitórios eletromagnéticos. Tais efeitos transitórios surgem no momento da abertura do anel entre os dois alimentadores aéreos primários e, para tal, foi selecionado para estudá-los o aplicativo ATP, através de sua interface gráfica Atpdraw. No caso dos estudos e simulações envolvendo os alimentadores BRU-109 e TAM-114, a separação do anel foi realizada através da seccionadora 40343, instalada no TAM-114, distante de 2,31 km da estação transformadora de distribuição Tamboré.

A modelagem realizada no ATP foi criteriosa e atendeu todos os quesitos técnicos citados anteriormente. Todos os parâmetros e ajustes dos equipamentos instalados nas estações transformadoras de distribuição e envolvidos nas manobras foram inseridos no software para a correta modelagem. Esses dados podem ser

encontrados no anexo deste trabalho. A Figura 2.13 mostra a representação gráfica dos alimentadores, transformadores e fontes de alimentação no ATP.



(a)



(b)

Figura 2.13 – Modelagem dos alimentadores BRU-109 e TAM-114 no ATP: a) Representação das S/Es, ETDs e modelo do acoplamento entre as S/Es; b) Seccionadoras de fechamento e abertura do anel entre as S/Es.

Cada um dos equivalentes das fontes de tensão, representados no circuito como fontes geradoras, possuem diferentes níveis de tensão no primário, similarmente aos encontrados nas subestações de energia Edgard de Souza e Anhanguera.

Os alimentadores foram modelados de forma que os modelos dos cabos condutores tenham as mesmas características técnicas destes componentes instalados em campo, inclusive os reais comprimentos dos trechos dos cabos foram inseridos no modelo π -nominal empregado.

Essa configuração é considerada a mais complexa e criteriosa existente na categoria dos paralelismos formados por chaves seccionadoras monopolares. A partir dessa evolução, a Figura 2.14 apresenta o diagrama esquemático da configuração tipo IX.

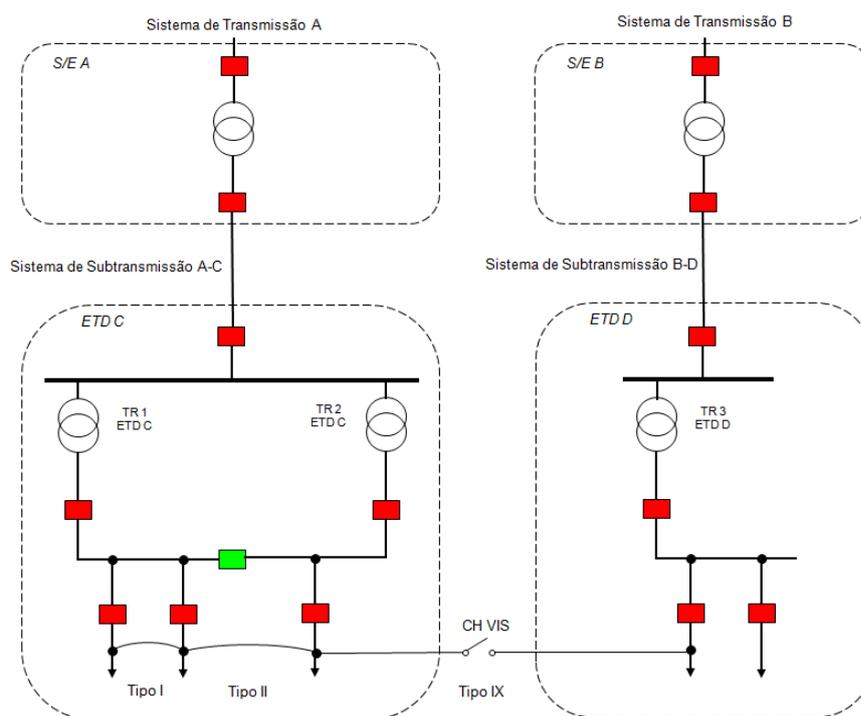


Figura 2.14 – Esquema simplificado de fechamento em anel do tipo IX, entre dois alimentadores.