

3. SIMULAÇÕES E RESULTADOS EM CAMPO

Neste capítulo são apresentados os resultados das simulações realizadas no aplicativo ATP, contemplando todas as condições de manobras de fechamento em anel entre os alimentadores.

A fim de melhorar a apresentação dos dados gerados no aplicativo ATP, optou-se por utilizar sua própria interface gráfica para a representação de elementos e gráficos gerados nas simulações, o aplicativo é conhecido como Atpdraw.

As simulações realizadas, para os modelos desenvolvidos no ATP, utilizaram o conceito da nova metodologia desenvolvida neste trabalho, onde é possível verificar os valores obtidos em campo como resultado das manobras de fechamento em anel entre as subestações de energia Anhanguera e Edgard de Souza, tendo como os principais motivadores os dados apresentados no capítulo dois deste trabalho.

Foram instalados dois medidores de qualidade de energia nos alimentadores BRU-109 e TAM-114, visando o registro das grandezas elétricas em regime permanente e também o registro dos transitórios eletromagnéticos no momento das manobras de fechamento em anel. A Figura 3.1 apresenta o medidor de qualidade de energia Blackbox G4500, que possui alto desempenho na aquisição das grandezas elétricas, visto as altas taxas de amostragens de tensão e corrente desse equipamento, como pode ser verificado na Tabela 3.1.



Figura 3.1 – Medidor de qualidade de energia G4500 Blackbox da ELSPEC®.

Fonte: ELSPEC.

Tabela 3.1 – Dados de sincronização e amostragem do medidor de qualidade de energia.

<i>Sincronização e amostragem</i>	
Fonte sincronizada-PLL	42.5 à 69Hz
Frequência de amostragem	Tensão: 1024 mostras/ciclo Corrente: 256 amostras/ciclo Fonte auxiliar de tensão DC: 200ms

Os medidores foram parametrizados de acordo com dados reais de operação dos alimentadores, das estações transformadoras de distribuição, bem como das linhas de subtransmissão envolvidas nas manobras, inclusive considerando os diferentes níveis de tensão das fontes supridoras. Os demais dados técnicos do medidor de qualidade de energia podem ser encontrados no anexo desse trabalho.

3.1 SIMULAÇÃO NO ATP

Para o modelo desenvolvido no aplicativo ATP, envolvendo os alimentadores BRU-109 e TAM-114, por características nativas desse software, foi necessário definir os valores dos tempos de abertura e fechamento das chaves seccionadoras envolvidas nas simulações, a fim de parametrizar corretamente os componentes do modelo elétrico.

Como o aplicativo tem o objetivo de fornecer os resultados dos transitórios no momento da simulação do chaveamento da rede, considerando pequenos períodos de tempo, não é necessário ajustá-lo com os mesmos tempos gastos por uma manobra real na rede de distribuição.

A Tabela 3.2 apresenta os tempos ajustados no aplicativo ATP, visando simular o fechamento e abertura das seccionadoras envolvidas na formação do anel entre as subestações Edgard de Souza e Anhanguera, através dos alimentadores BRU-109 e TAM-114.

Para a configuração do aplicativo ATP, foram adotados tempos para fechamentos das fases da seccionadora de vis-à-vis 43286 entre 20 e 60 milissegundos. Para a simulação de abertura da seccionadora 40343, foram utilizados tempos entre 85 e 115 milissegundos. Estes valores são suficientes para que a simulação no aplicativo ATP saia do período transitório e entre em regime permanente.

Tabela 3.2 – Tempos de abertura e fechamento das chaves seccionadoras 43286 e 40343, utilizados na parametrização do aplicativo ATP.

<i>Atributos das Seccionadoras</i>		
<i>Dados</i>	<i>Seccionadora 40343 (TAM-114)</i>	<i>Seccionadora 43286 (vis-à-vis)</i>
	<i>Tempo (ms)</i>	<i>Tempo (ms)</i>
Fechamento fase A	-1000	20
Abertura fase A	85	1000
Fechamento fase B	-1000	40
Abertura fase B	100	1000
Fechamento fase C	-1000	60
Abertura fase C	115	1000

A seguir são apresentados os resultados das simulações realizadas no ATP para os modelos dos alimentadores aéreos primários de distribuição BRU-109 e TAM-114, de responsabilidade operativa da AES Eletropaulo. As análises foram realizadas com base nas classificações de todos os elementos, componentes ou equipamentos com algum grau de criticidade operacional, desde a subestação de energia até a chave seccionadora no tronco do alimentador aéreo de distribuição.

3.1.1 Análise das tensões

A tensão elétrica é uma das principais grandezas envolvidas nas manobras de formação de anel ou paralelismo entre estruturas elétricas. Pela sua importância, a tensão possui papel fundamental nas configurações da rede elétrica, onde seus efeitos e comportamentos devem ser estudados profundamente, levando-se em consideração todos os pontos críticos e restritivos à realização dessas manobras.

Como exemplo dos valores das simulações extraídas do ATP, a Figura 3.2 mostra a tensão máxima por fase para o secundário do transformador 2 da estação transformadora de distribuição Tamboré.

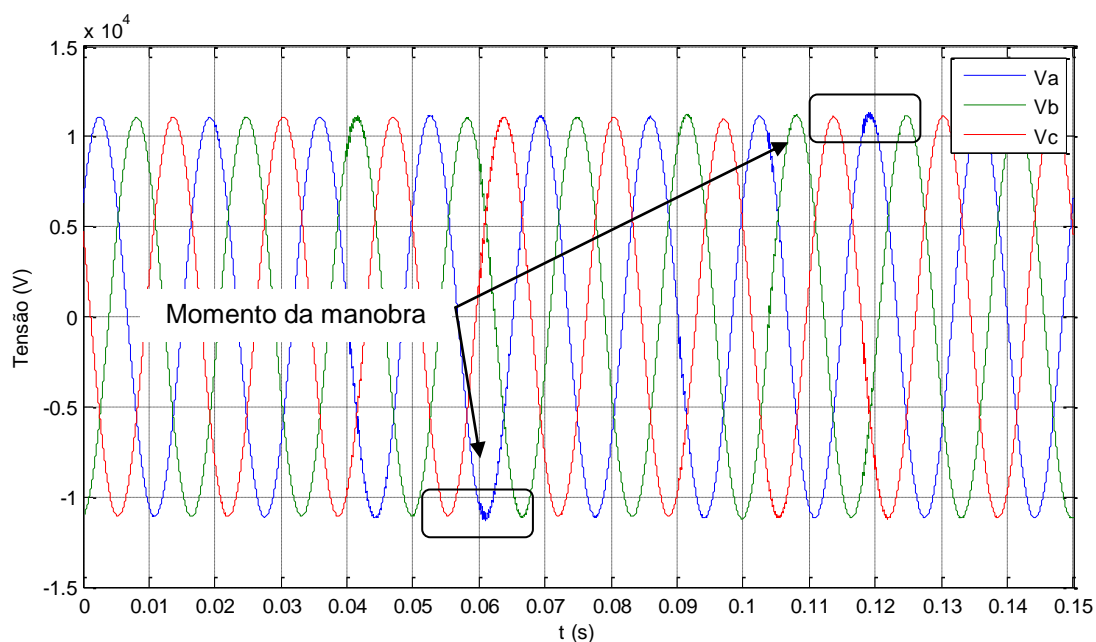


Figura 3.2 – Tensão de fase no transformador 2 da ETD Tamboré – ATP.

Visando facilitar a interpretação dos gráficos do ATP, os dados seguintes estão na base nominal dos equipamentos modelados. Para a tensão máxima “Va” da Figura 3.2, com valor de pico por fase de 11,4 kV, com a mudança proposta esta grandeza elétrica passará para 13,99 kV, agora como tensão de linha eficaz, ou seja:

$$U_{Linha} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} U_{Fase} = 1,2247 \times 11423 = 13990(V) \quad (3.1)$$

A Figura 3.3 ilustra a tensão de fase mostrada na Figura 3.2, modificada para tensão de linha eficaz, visando maior agilidade e facilidade nas interpretações dos gráficos gerados pelo aplicativo ATP.

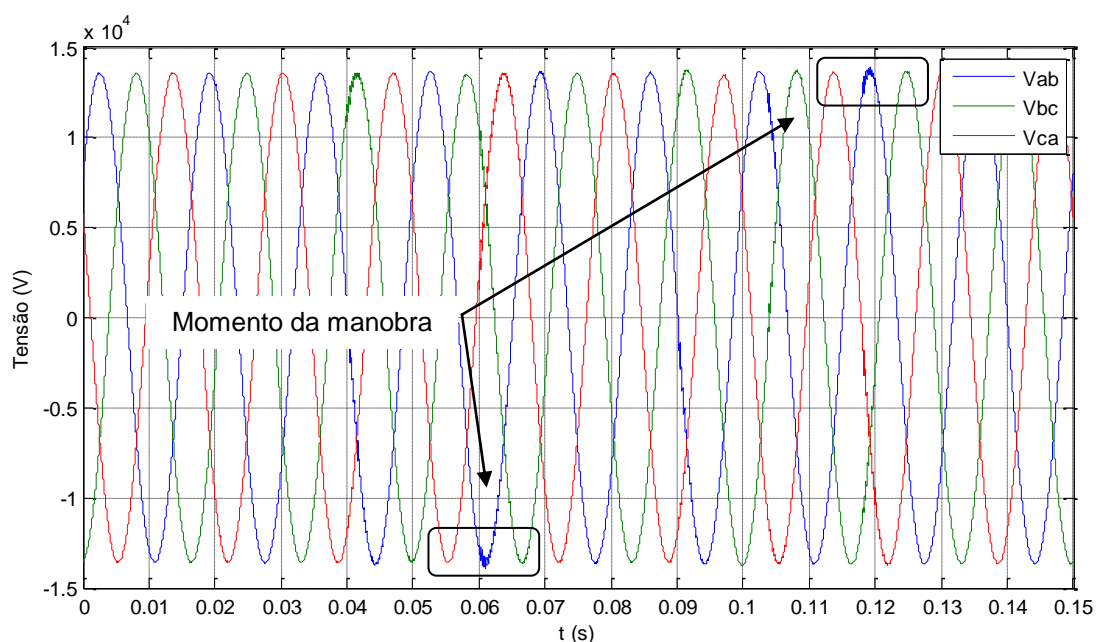


Figura 3.3 – Tensão de linha no transformador 2 da ETD Tamboré – ATP.

Com os envoltórios das subestações de energia Edgard de Souza e Anhanguera – que por serem alimentadas por diferentes fontes, possuem tensões primárias distintas; houve a necessidade de conhecer detalhadamente o comportamento das

tensões primárias e secundárias dos bancos de transformadores frente às manobras de fechamento em anel. Essa configuração demandou uma atenção especial no modelo, pois (CHEN, et al, 2004) e (DURK, et al, 2004) consideram impossível a formação de anel entre subestações de energia com diferentes níveis de tensão.

Mas, como pode ser verificado na Figura 3.4, as tensões de entrada das subestações de energia Edgard de Souza e Anhanguera não foram afetadas pelas simulações de fechamento em anel, mantendo-se estáveis e sem perturbações transitórias. Este efeito é atribuído ao amortecimento causado pelos enrolamentos dos transformadores de potência das subestações de energia.

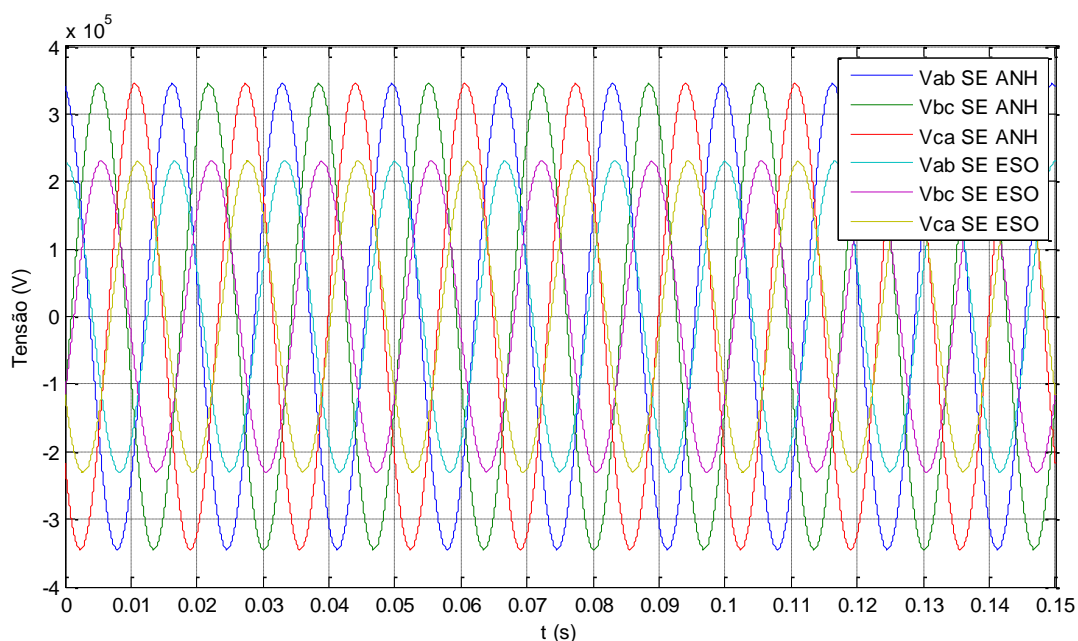


Figura 3.4 – Tensões de linha nos primários dos bancos de transformadores das S/Es Edgard de Souza e Anhanguera – ATP.

Evidentemente que a propagação dos efeitos eletromagnéticos provocados pelas manobras de fechamento do anel não afetam as subestações de energia (S/Es), pois os chaveamentos das seccionadoras foram realizados em pontos distantes das estações transformadoras de distribuição (ETDs).

Ao longo do trajeto há um conjunto de impedâncias, caracterizadas pelas bitolas dos cabos dos alimentadores e das linhas de subtransmissão, pelos transformadores de potência das estações transformadoras, com valores de reatâncias girando em torno de 25 a 45%, além das impedâncias dos bancos de transformadores das subestações de energia, entre 12 e 24%.

A afirmação acima é comprovada pela Figura 3.5, onde as tensões não sofrem atenuações pelos efeitos transitórios provocados pelas manobras.

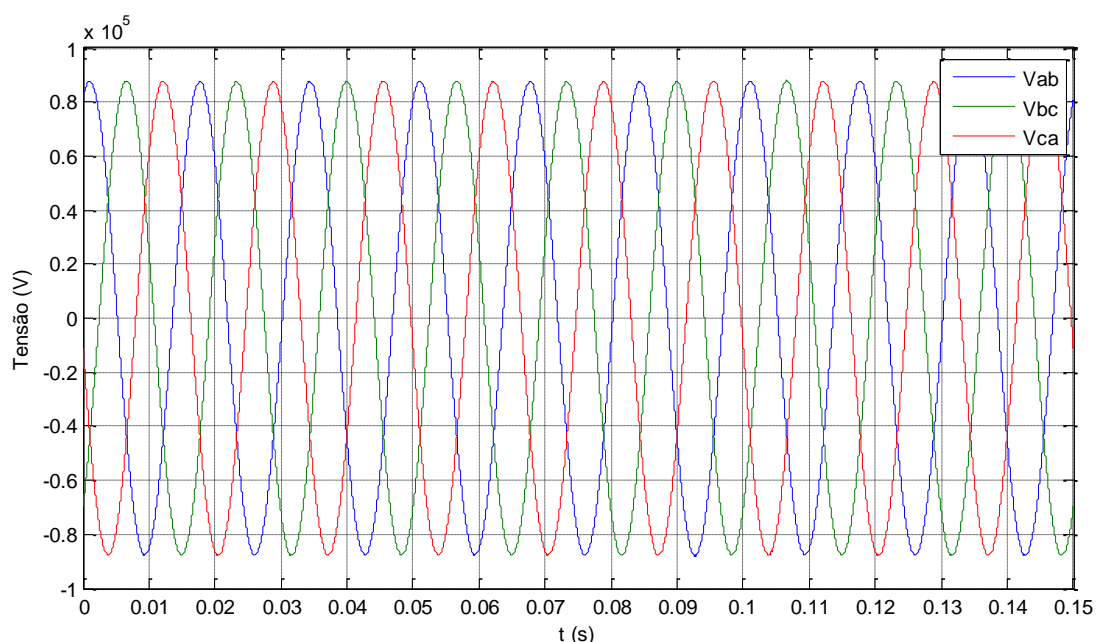


Figura 3.5 – Tensão de linha no primário do transformador 2 da ETD Barueri – ATP.

De posse desses dados, as análises são direcionadas para os transformadores de potência, bem como para os alimentadores e seus componentes e acessórios.

Seguindo as análises, agora com foco nos resultados das simulações para a estação transformadora Tamboré, que possui o alimentador de menor comprimento, é possível constatar que a tensão não foi afetada pelos transitórios de manobras, mantendo-se estável durante os chaveamentos das seccionadoras monoplares.

A Figura 3.6 mostra a estabilidade da tensão primária do transformador 2 da ETD Tamboré. Portanto, a ausência dos efeitos transitórios permitiu a continuidade das manobras de paralelismo entre as subestações de energia.

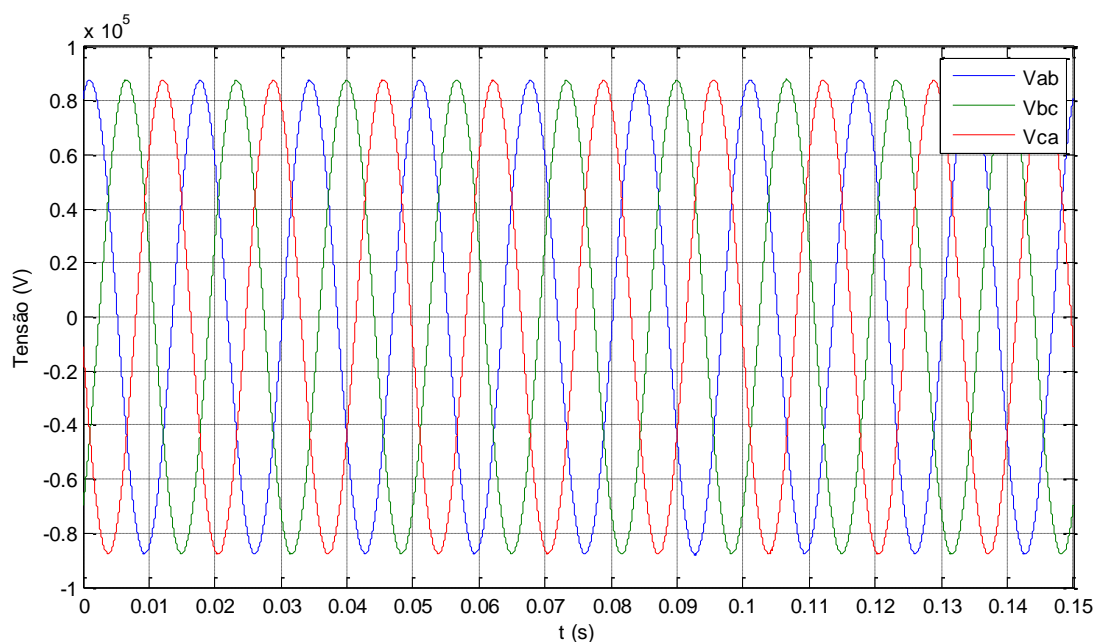


Figura 3.6 – Tensão de linha no primário do transformador 2 da ETD Tamboré – ATP.

Com a intenção da validação das manobras de fechamento em anel, o passo seguinte é a análise das tensões nos secundários dos transformadores das estações transformadoras de distribuição, antecedendo, obviamente, as análises nos pontos das manobras.

Os transformadores são os principais equipamentos de estruturas elétricas como S/Es ou ETDs. Sendo os equipamentos de maior valor dentro de uma subestação, os transformadores necessitam de maior atenção nos estudos e, conseqüentemente, possuem sofisticados sistemas de proteção.

Os investimentos em transformadores de potência instalados em estações transformadoras de distribuição (ETDs), dependendo de suas capacidades, giram em torno de algumas dezenas de milhões de reais. No caso desses equipamentos

possuírem dispositivos reguladores de tensão, os investimentos na composição dos projetos aumentam significativamente.

Por exemplo, um transformador de potência de 20 MVA, sem regulador de tensão acoplado ao equipamento principal, tem seu valor estimado em torno de 6 milhões de reais. No caso desse mesmo equipamento de transformação ser adquirido com um dispositivo regulador de tensão acoplado, o preço aumentará e passará dos 10 milhões de reais.

As concessionárias de distribuição de energia, em função das regulamentações impostas pelos órgãos reguladores e fiscalizadores, normalmente, adquirem os transformadores de potência com os reguladores de tensão acoplados, visando os ajustes automáticos de tensão nas estações transformadoras de distribuição.

A AES Eletropaulo possui uma grande variedade de transformadores instalados em seu parque de distribuição, diferenciados por suas potências nominais construtivas. A Tabela 3.3 descreve as capacidades dos transformadores e cita se o equipamento possui regulador de tensão.

Tabela 3.3 – Transformadores utilizados nas estações da AES Eletropaulo com ou sem reguladores de tensão.

<i>Transformador</i>	<i>Sem Regulador de Tensão</i>	<i>Transformador</i>	<i>Com Regulador de Tensão</i>
<i>Potência (MVA)</i>	7,5/9,375	<i>Potência (MVA)</i>	15/20
	9,6/12		32/40
	10/12,5		40/60
	12/15		-----
	20/25		-----

Através das simulações realizadas no ATP é possível notar o comportamento das tensões nos secundários dos transformadores das estações transformadoras de distribuição Barueri e Tamboré.

Inicialmente, através da Figura 3.7, é possível notar a estabilidade da tensão no secundário do transformador 2 da estação transformadora de distribuição Barueri, que, por sinal, possui a mesma tendência da tensão do lado primário, como apresentado na Figura 3.5.

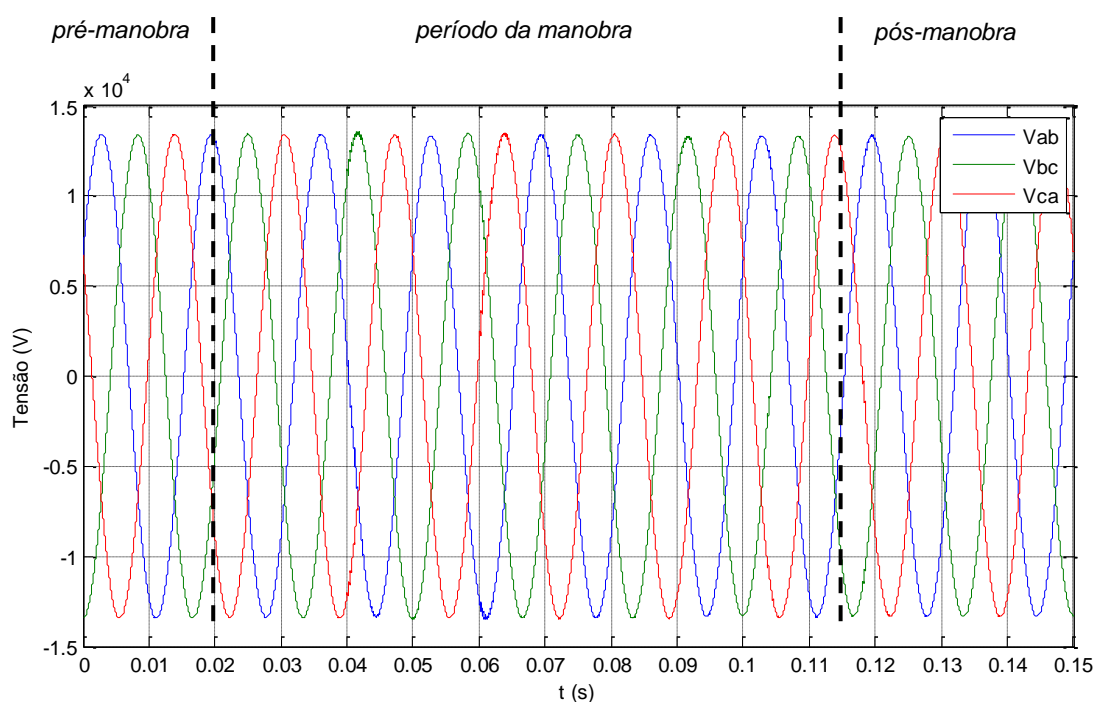


Figura 3.7 – Tensão de linha no secundário do transformador 2 da ETD Barueri – ATP.

Posteriormente, ao avaliar a tensão no secundário do transformador 2 da estação Tamboré, como mostra a Figura 3.8, constatou-se que essa grandeza também acompanha a tendência da tensão do lado primário do mesmo transformador.

A afirmação anterior pode ser confirmada através dos valores apresentados na Figura 3.6, porém, neste caso, com um pequeno transitório na tensão “Vab”, no momento das manobras.

É evidente o efeito filtrante provocado pelos transformadores nos transitórios eletromagnéticos aparentes em consequência das manobras. A Figura 3.8 mostra a evidência do filtro que os enrolamentos dos transformadores empregam nos transitórios.

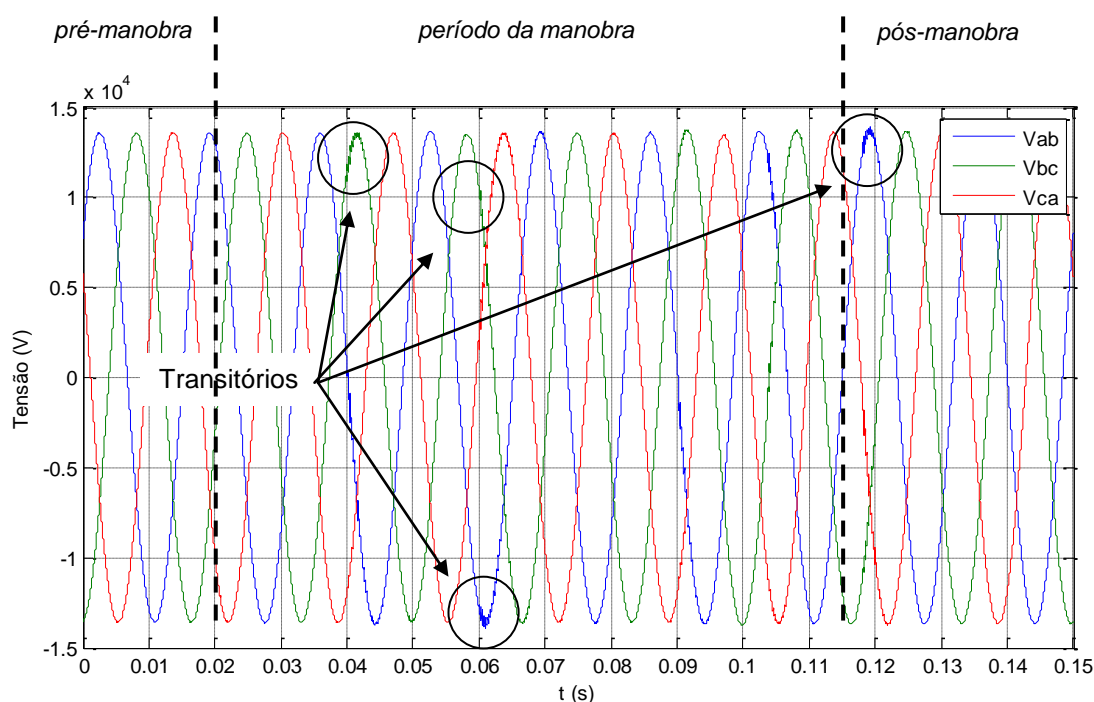


Figura 3.8 – Tensão de linha no secundário do transformador 2 da ETD Tamboré – ATP.

O alimentador de menor comprimento imprime maior transitório no arranjo formado, porém, seu próprio transformador filtra quase que na totalidade esse efeito físico.

Ainda, do ponto de vista das análises das tensões, as figuras seguintes apontam o comportamento dessa grandeza nas seccionadoras dos alimentadores, ou seja, o efeito que realmente há nos pontos das manobras quando do fechamento das subestações de energia em anel.

As seccionadoras, por serem equipamentos monopolares e de menor robustez, necessitam de maior atenção no momento efetivo das manobras, pois é inadmissível que as premissas de segurança sejam violadas nesses equipamentos.

A Figura 3.9 ilustra o comportamento das tensões no momento do fechamento e abertura do anel entre as subestações de energia Edgard de Souza e Anhanguera. Inicialmente, a seccionadora de vis-à-vis 43286 é fechada formando o anel e,

posteriormente, a seccionadora 40343 é aberta, desfazendo o anel entre as subestações de energia.

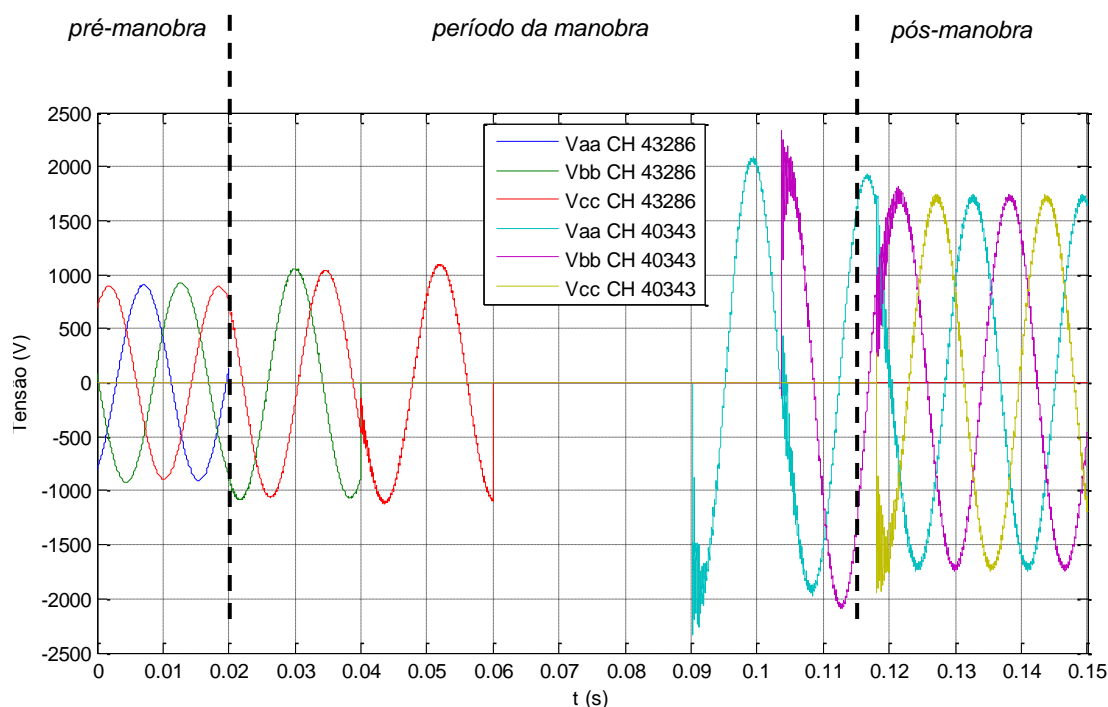


Figura 3.9 – Tensões nos terminais das seccionadoras 43286 e 40343 – ATP.

É possível constatar que o transitório se acentua no momento da abertura do anel, agravado pelo fato da manobra ser realizada por uma seccionadora monopolar.

O transitório apontado na figura anterior foi provocado pela característica física da seccionadora, porém, este efeito, além de não provocar danos aos equipamentos manobrados, não é fato determinante para impedir a execução das manobras de formação do anel.

A tensão nos terminais da seccionadora de vis-à-vis, antes do início das manobras de fechamento em anel, é mostrada na Figura 3.10, onde pode ser constatado um degrau de aproximadamente 900 V, classificado como a diferença de potencial entre os terminais da mesma fase.

A sobretensão pós-manobra atinge cerca de 2,1 kV ($1,2\text{kV} \times 1,732$). Os níveis de

tensão citados são atribuídos à característica, distribuição e densidade de carga, bem como ao comprimento e bitola dos cabos dos alimentadores.

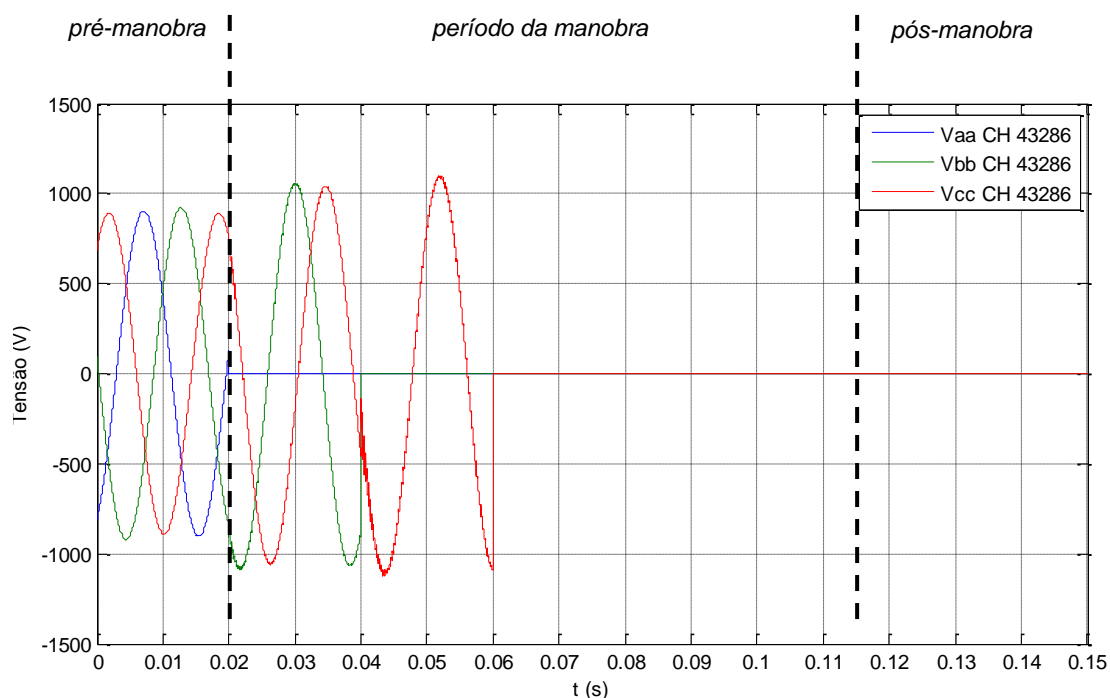


Figura 3.10 – Tensões máximas nos terminais da seccionadora de vis-à-vis 43286 antes do fechamento – ATP.

No momento do fechamento da seccionadora de vis-à-vis 43286, a tensão eficaz em regime permanente, entre os terminais da mesma fase, é de aproximadamente 650 V, como mostra a Figura 3.11.

A figura seguinte mostra também a tensão “Vcc”, simulada entre os terminais da terceira fase manobrada (classificada de fase “c”), onde esta atinge aproximadamente 800 V.

A amplitude da tensão, registrada através das simulações realizadas no aplicativo ATP, não é considerada como impeditivo à realização das manobras de fechamento em anel entre subestações de energia, onde os limites de operação das chaves seccionadoras que formam o anel foram observados e respeitados, conforme dados técnicos apresentados na Tabela 3.4.

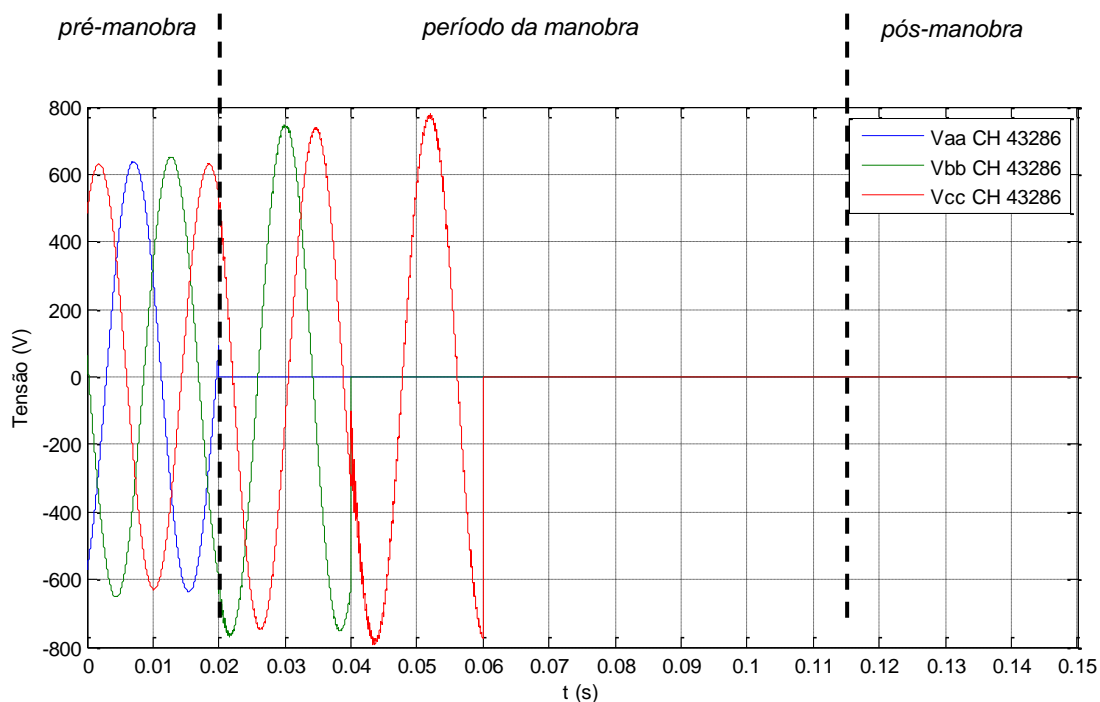


Figura 3.11 – Tensões eficazes nos terminais da seccionadora de vis-à-vis 43286 no momento do fechamento – ATP.

A chave seccionadora é capaz de suportar uma diferença de potencial maior que o valor simulado no ATP. Na maioria dos casos de restabelecimentos de trechos de alimentadores aéreos primários, os centros de operação das concessionárias distribuidoras de energia realizam manobras em chaves monopolares com a finalidade de reenergizar cargas interrompidas, tanto para serviços programados, como para serviços emergenciais.

Tabela 3.4 – Características elétricas das seccionadoras de distribuição classe 15 kV.

Tensão máxima do equipamento (kV eficaz)		15	
Corrente nominal em serviço contínuo (A eficaz)		400	630
Tensão suportável sob frequência industrial, a seco e sob chuva, em kV (1 minuto)	Entre polos e à terra	34	34
	Entre contatos abertos	38	38
Tensão suportável de impulso atmosférico, em kV (1,2×50µs)	Entre polos e à terra	95	95
	Entre contatos abertos	110	110
Corrente suportável de curta duração, em kA eficaz	Durante 1 segundo	12,5	16
	Durante 3 segundos	7,2	9,2

Com os valores aceitáveis das tensões pré-manobra nos terminais da seccionadora de vis-à-vis 43286, considerando o momento do fechamento do anel, a análise seguinte é realizada em busca do comportamento da tensão no momento da abertura do anel, realizado através da chave seccionadora 40343, instalada no tronco do alimentador TAM-114.

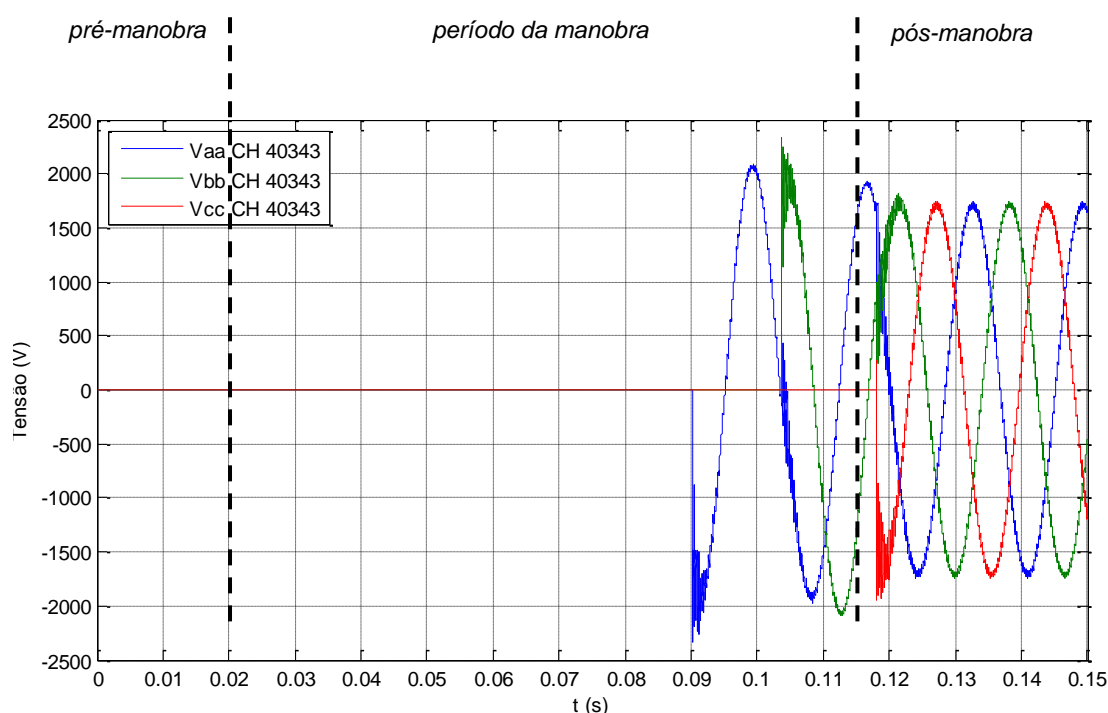


Figura 3.12 – Tensões pré-manobra de abertura nos terminais da seccionadora 40343 – ATP.

A diferença de potencial “V”, resultante entre os terminais da mesma fase da seccionadora monopolar 40343, é de aproximadamente 2,3 kV (3,98 kVpico), valor esse que não impede a finalização da manobra de abertura do anel, conforme já analisado e mencionado anteriormente.

Portanto, os limites e capacidades da chave seccionadora monopolar 40343 não são superados, preservando as condições de segurança para o equipamento e, principalmente, para o operador que a opera localmente.

Para as manobras de fechamento e abertura de anel, o momento considerado mais crítico é o da abertura do paralelo entre as fontes distintas, onde, nesta separação, emprega-se o uso dos bastões do tipo Loadbuster® para auxiliar a extinção do arco voltaico formado na abertura em carga das chaves seccionadoras monopolares.



Figura 3.13 – Chave LoadBuster para manobra de seccionadoras sob carga.

No momento em que dois alimentadores estão sendo manobrados com a finalidade de colocá-los na configuração de anel fechado, pontua-se como possível problema o fato de que as seccionadoras estão sendo operadas manualmente por um eletricista de rede, que pode operá-la inadequadamente, dependendo de sua capacitação e habilidade, das condições meteorológicas no momento da manobra e, também, das condições dos equipamentos envolvidos (bastão de manobra e seccionadoras monopolares).

Também, deve-se levar em consideração o estado dos equipamentos de proteção, individuais e coletivos, utilizados pelos eletricistas de rede para a execução dessas manobras.

A Figura 3.14 apresenta as tensões de fase na chave seccionadora 43286, antes e depois da manobra de fechamento dos alimentadores em anel.

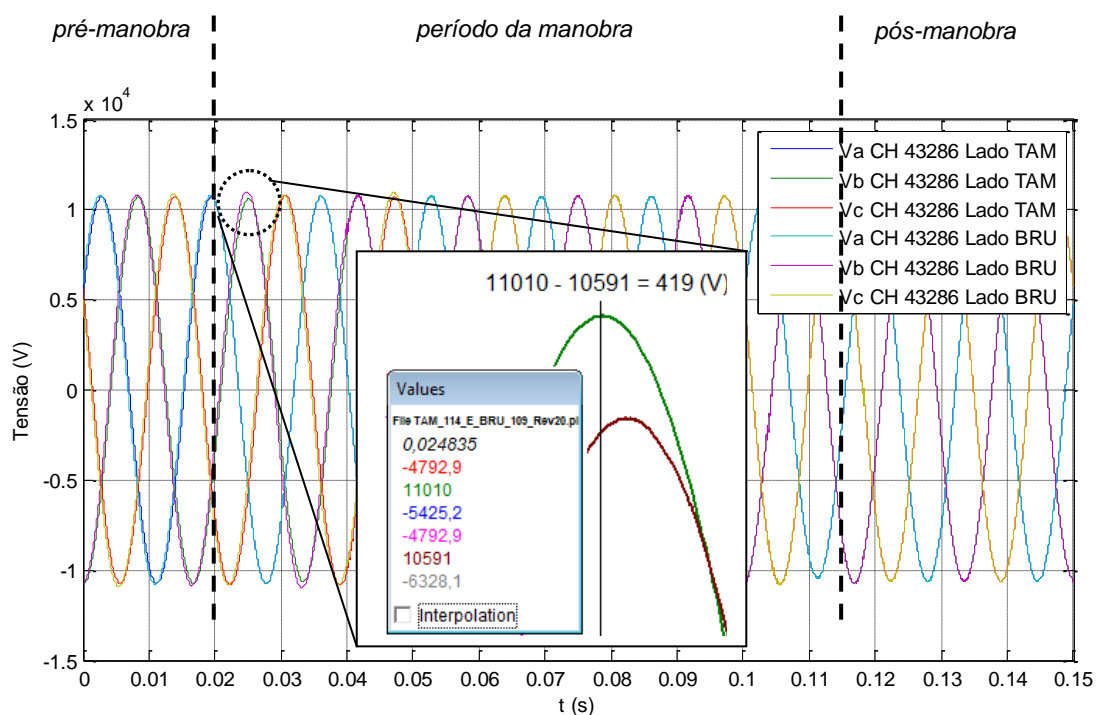


Figura 3.14 – Tensões de fase pré-manobra de fechamento da seccionadora de vis-à-vis 43286 – ATP.

Efetivamente, a simulação mostra que a diferença de potencial entre os terminais da seccionadora de vis-à-vis 43286, antes da manobra de fechamento em anel, é de aproximadamente 500 V.

Conseqüentemente, com o sucesso no fechamento da seccionadora monopolar de vis-à-vis, a tensão em seus terminais é idêntica, considerando a medição de tensão entre os terminais da mesma fase.

A Figura 3.15 apresenta o transitório de tensão nos terminais da chave seccionadora 40343, no momento da simulação de manobra neste equipamento. Imediatamente após a simulação de abertura do anel, o valor de tensão constatado na chave seccionadora, citada anteriormente, atinge valores na ordem de 2,3 kV.

O valor de tensão citado é classificado como a diferença de potencial entre os terminais da chave seccionadora 40343, provenientes das duas estações transformadoras de distribuição estudadas nesse trabalho, ETDs Barueri e Tamboré.

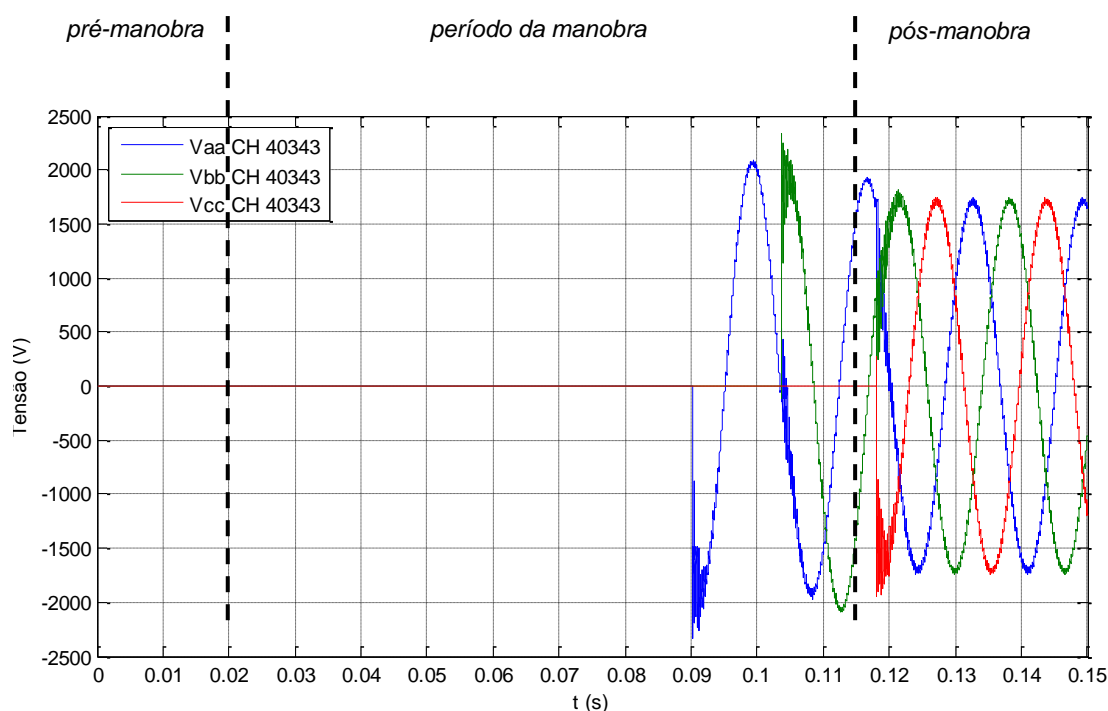


Figura 3.15 – Tensões pós-manobra de abertura da seccionadora 40343 – ATP.

A Figura 3.16 mostra os casos em que as simulações são realizadas com base nos valores de fase, onde as tensões assumem patamares de aproximadamente 320 V e 1040 V, respectivamente.

É notório que os valores resultantes das simulações realizadas no aplicativo de transitórios ATP, verificados para a tensão, não geram situações impeditivas à realização das manobras reais de fechamento em anel.

Visando maior clareza na interpretação deste efeito transitório, a Figura 3.16 mostra os valores das tensões efetivas no secundário do transformador 2 da estação transformadora de distribuição Tamboré, bem como no terminal a jusante da chave seccionadora 40343, onde é possível notar o valor da máxima diferença de tensão, aproximadamente 350 V, que pode ser observado antes da manobra de fechamento do anel.

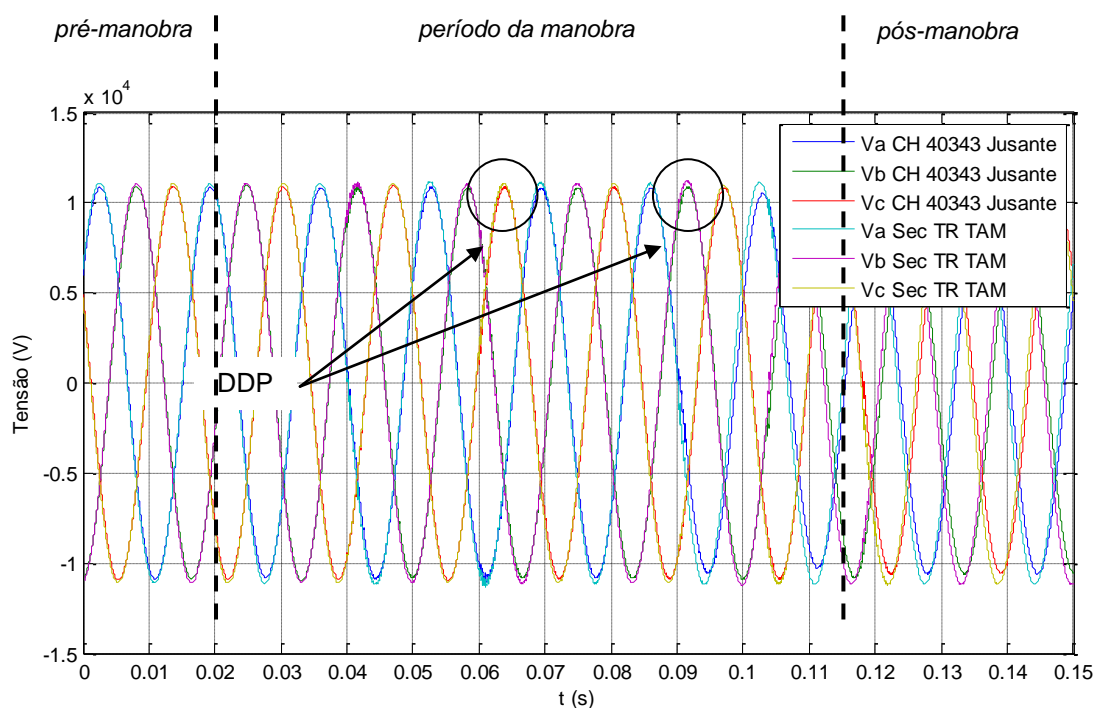


Figura 3.16 – Tensões pré e pós manobras de fechamento em anel, a jusante da seccionadora 40343 e do secundário do transformador 2 da ETD Tamboré – ATP.

Com os dados das simulações apresentados através dos gráficos anteriores, que focaram as tensões máximas nos equipamentos e componentes dos alimentadores, das estações transformadoras de distribuição, bem como das subestações de energia, foi possível constatar que as amplitudes apresentadas não superaram as capacidades e limites previamente estabelecidos para a operação ideal.

A corrente elétrica é outra grandeza que carece de grande atenção para este tipo de arranjo, onde sua amplitude tem relação direta com as limitações e capacidades dos equipamentos e componentes envolvidos nas manobras. Como o montante de carga envolvido nas manobras não é consideravelmente grande, considerando as capacidades das estações transformadoras de distribuição, das linhas de transmissão aéreas e das subestações de energia, a análise foca diretamente os transformadores de potência instalados nas estações transformadoras de distribuição, bem como os equipamentos e componentes dos alimentadores envolvidos na formação do anel.

Para atingir o objetivo principal do trabalho, que é a análise dos efeitos provocados pelos transitórios eletromagnéticos, a fim de garantir a segurança operacional dos eletricitistas de campo, faz-se necessário considerar a transferência de carga entre os alimentadores envolvidos. Essa transferência é efetivada com o circuito BRU-109 alimentando parte da carga do TAM-114 que, por sua vez, possui comprimento e carregamento inferior, conforme apresentado na Tabela 2.2 e Figuras 2.10 e 2.11.

3.1.2 *Análise das correntes*

Os equipamentos elétricos que compõem o sistema elétrico de potência são especificados visando o atendimento e suprimento das cargas nos mais variados níveis de tensão. São projetados para permanecer a maior parte do tempo em operação, justificando os custos de aquisição e instalação desses equipamentos no Sistema Elétrico de Potência.

A análise da capacidade de equipamentos e componentes do Sistema Elétrico de Potência é extremamente importante quando da formação de anel entre subestações de energia ou estações transformadoras de distribuição.

Tal consideração exige maior complexidade nas avaliações das capacidades em função das cargas dependentes, além de diminuir a tolerância à sobrecarga nos equipamentos.

Em consequência dos fatos citados acima e pela relevância do assunto, os gráficos a seguir apresentam uma análise detalhada das cargas modeladas no ATP, onde o objetivo principal é avaliar se há extrapolação das capacidades dos principais equipamentos e componentes envolvidos no fechamento em anel.

A Figura 3.17 descreve o comportamento do carregamento do modelo desenvolvido no ATP para o alimentador BRU-109 de 13,8 kV, onde o gráfico apresentado pode ser separado em três momentos:

- *Antes do fechamento do anel:* A carga do alimentador registrou valores próximos a 480 A.

- *Durante a formação do anel:* Nesse momento é possível constatar a atenuação sofrida pela carga do circuito BRU-109, fato associado à menor impedância e comprimento do alimentador TAM-114.
- *Após a abertura do anel:* É possível verificar que o carregamento do alimentador BRU-109 tem uma elevação em função do bloco de carga recebido do TAM-114.

Semelhante ao método empregado na avaliação das tensões estudadas anteriormente, os gráficos seguintes apresentam as cargas no formato de corrente eficaz, por fase dos alimentadores BRU-109 e TAM-114.

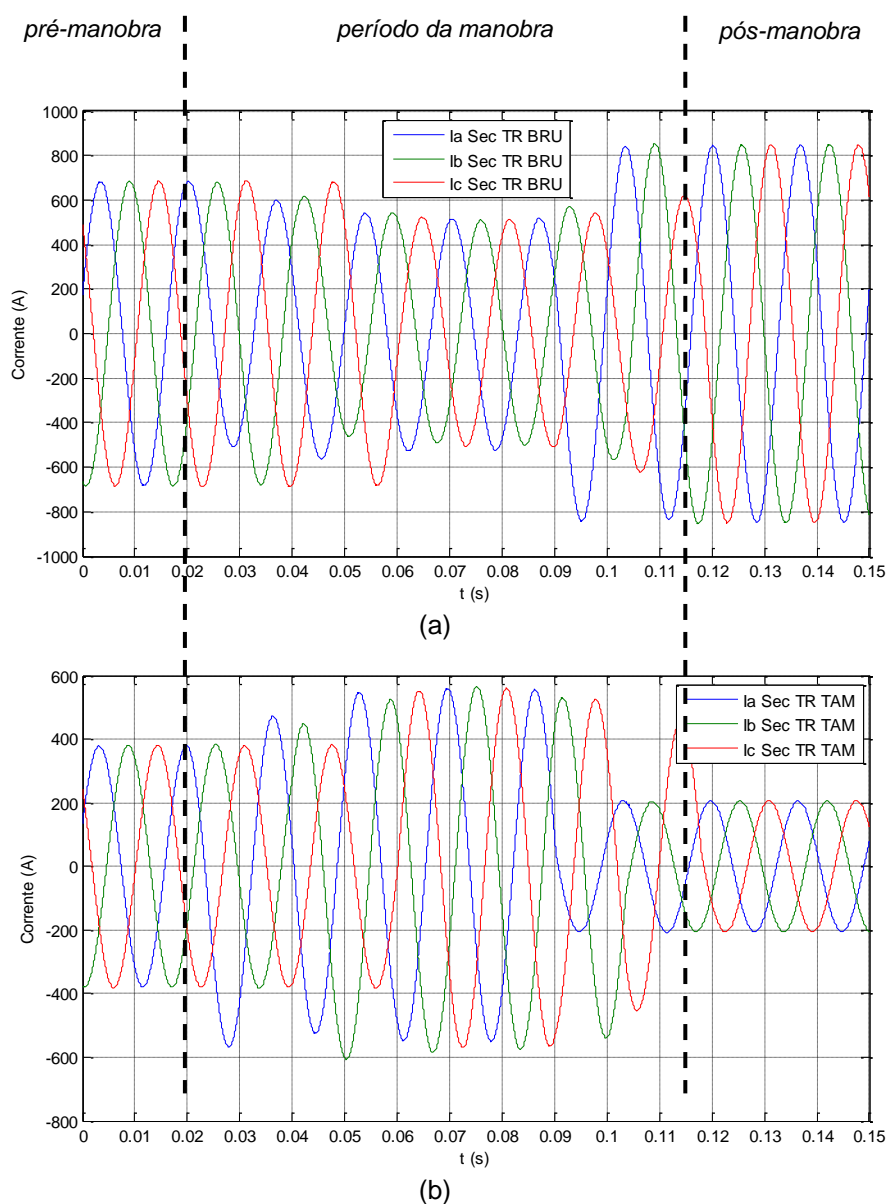


Figura 3.17 – Carregamentos dos alimentadores: a) BRU-109, e; b) TAM-114, de 13,8 kV – ATP.

O carregamento do alimentador TAM-114 tem comportamento inverso do BRU-109, como mostra a Figura 3.17.

O fato importante constatado neste modelo foi a não superação dos limites dos cabos dos alimentadores envolvidos nas manobras, tanto os subterrâneos como os aéreos, considerando, obviamente, os valores descritos na Tabela 2.3.

É comum, na operação em tempo real, operar os alimentadores aéreos de distribuição com tolerância à sobrecarga em seus cabos condutores da rede aérea primária.

O limitante para esta metodologia de operação se dá pela capacidade dos cabos subterrâneos de saída dos alimentadores, que normalmente possuem ampacidades diferenciadas dos condutores utilizados na rede aérea primária. Estes cabos conectam o disjuntor do alimentador, instalado no conjunto blindado da estação transformadora de distribuição, à rede aérea primária de distribuição.

Em condições emergenciais, algumas empresas distribuidoras de energia operam seus alimentadores aéreos primários com até 20% de sobrecarga, ou seja, para um alimentador que possui um cabo de bitola #300 mm², com capacidade nominal de 600 A, esse poderá ser submetido a um carregamento de até 720 A.

Os limites térmicos dos cabos, por serem determinados pelas características construtivas desse componente, devem ser controlados pelos carregamentos admissíveis e carecem de total atenção dos técnicos de operação, que despacham dos centros de operação das empresas distribuidoras de energia.

O papel da operação de tempo real é controlar os carregamentos desses equipamentos para que não superem suas capacidades em condições normais de operação, pois há uma relação direta entre o período ao qual o mesmo é submetido à sobrecarga versus a vida remanescente dos condutores. Atualmente, sistemas de operação como EMS, OMS e DMS, utilizados para controle do sistema de potência em tempo real, informam sobre possíveis superações de valores e limites, pré-estabelecidos, de equipamentos e componentes, oferecendo a oportunidade de ações de intervenções rápidas na rede elétrica.

Pode-se verificar nas figuras seguintes que as simulações de manobras de fechamento em anel não geraram transitórios eletromagnéticos nas linhas aéreas de subtransmissão da AES Eletropaulo, tampouco nas subestações de energia da ISA CTEEP, reforçando a tese de que os transitórios são atenuados ao encontrarem as impedâncias dos cabos dos alimentadores, bem como as impedâncias dos transformadores das estações transformadoras de distribuição.

Outro ponto que merece ser citado é o comportamento da rede de transmissão, no tocante ao acoplamento elétrico existente entre as subestações Anhanguera e Edgard de Souza, conforme modelo apresentado na Figura 2.13, quando da ocorrência de um curto-circuito em uma linha de subtransmissão.

Visando a correta interpretação do comportamento elétrico supracitado, simulou-se a ocorrência de uma falta na linha de subtransmissão aérea Anhanguera-Mutinga de 88 kV. Esta falta simulada, representada no simulador ATP através de um aterramento com diferentes valores de impedâncias, possibilitou a interpretação do comportamento do equivalente elétrico entre as subestações Anhanguera e Edgard de Souza, bem como dos seguintes equipamentos:

- Transformadores das subestações de energia e estações transformadoras de distribuição;
- Linhas de subtransmissão e distribuição aéreas.

Os resultados obtidos através das simulações realizadas no ATP não apontaram restrições ou superações nos limites operacionais ou construtivos dos equipamentos e componentes envolvidos na nova configuração.

A análise contemplou os momentos transitório, subtransitório e em regime, onde foi simulada a abertura do disjuntor da linha de subtransmissão próxima à falta. Verificou-se que, em regime permanente, a corrente circulante atravessou os alimentadores de distribuição em direção à SE Edgard de Souza, porém sua amplitude foi atenuada em função das impedâncias relatadas anteriormente. Os carregamentos dos alimentadores aéreos de distribuição simulados, referidos aos primários dos bancos de transformadores das subestações de energia Anhanguera e Edgard de Souza, podem ser verificados na Figura 3.18.

Nesta figura estão representadas somente as cargas referidas dos dois alimentadores aéreos de distribuição estudados, onde, por simplicidade, não foram representadas as demais cargas conectadas nas linhas de subtransmissão, além da não representação das demais linhas conectadas nos barramentos das duas subestações de energia.

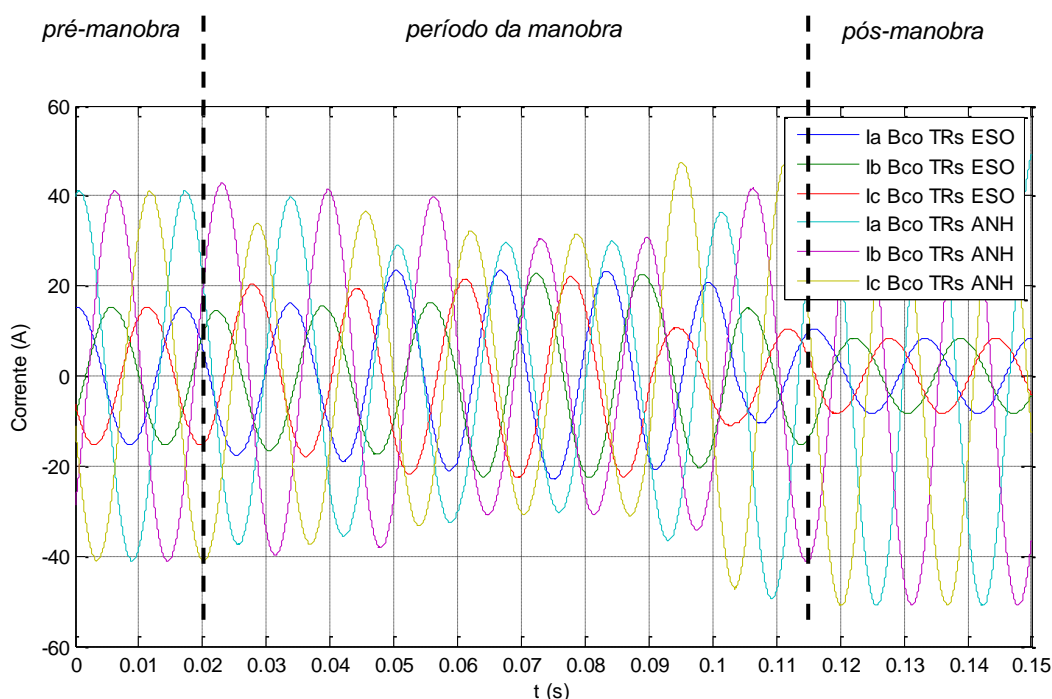


Figura 3.18 – Carregamentos dos alimentadores BRU-109 e TAM-114 referidos ao primário dos bancos de transformadores das S/Es Anhanguera e Edgard de Souza – ATP.

A Figura 3.19 apresenta as formas de onda dos carregamentos dos alimentadores BRU-109 e TAM-114, referidos nas linhas de subtransmissão de 88 kV. As linhas de subtransmissão aéreas são de responsabilidade operativa da AES Eletropaulo, porém, alimentadas pelas subestações de transmissão da ISA CTEEP.

Neste caso, também não há constatação de transitórios eletromagnéticos nas linhas de subtransmissão aéreas em função das simulações de manobras de fechamento em anel. As cargas modeladas e inseridas no ATP, conectadas nos modelos das

linhas de subtransmissão, contemplam somente as duas estações transformadoras de distribuição supridoras dos alimentadores BRU-109 e TAM-114.

As demais cargas conectadas nestas linhas não foram representadas, onde a não representação das cargas adicionais não geram prejuízos à análise proposta nesse trabalho.

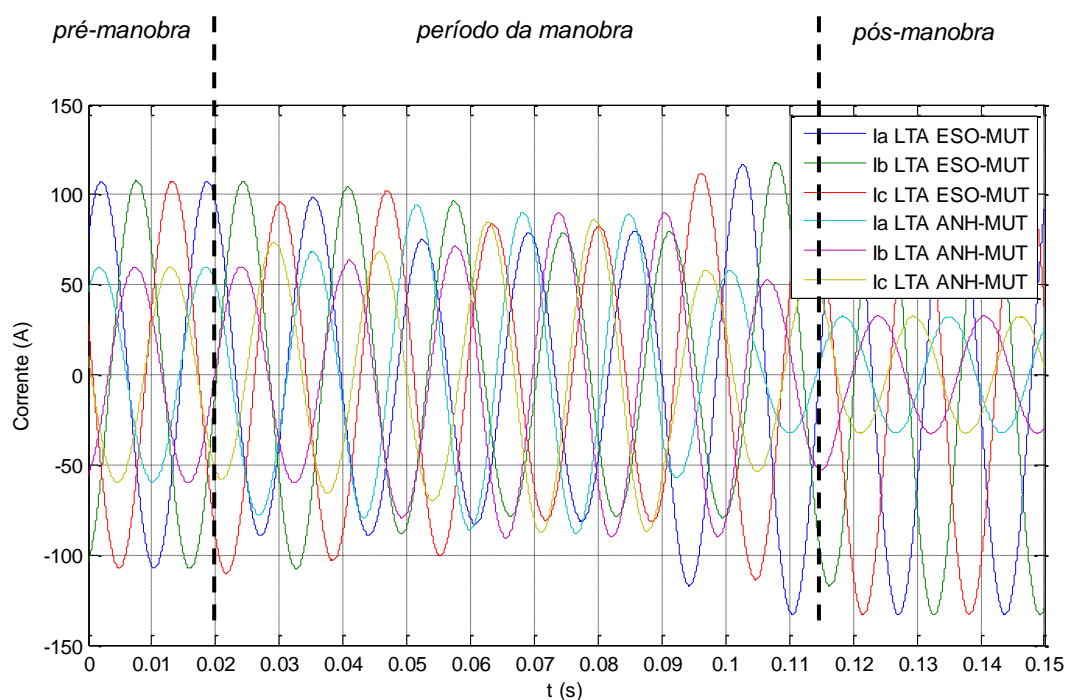


Figura 3.19 – Carregamentos dos alimentadores BRU-109 e TAM-114 referidos nas LTAs Anhanguera-Mutinga e Edgard de Souza-Mutinga de 88 kV – ATP.

Devido à ausência dos efeitos transitórios nas subestações de energia e linhas de subtransmissão aéreas, comumente provocados por manobras de natureza semelhante, o direcionamento das análises, a partir de agora, será para os equipamentos que efetivamente são chaveados para o fechamento e abertura do anel. A atenção recai novamente sobre as limitações e capacidades dos equipamentos manobráveis, que neste caso são as chaves seccionadoras monopulares 43286 e 40343. A evolução da análise sugere o detalhamento da corrente elétrica no ponto de manobra, a fim de constatar se os limites da

seccionadora de vis-à-vis não são superados pelos transitórios eletromagnéticos, ou mesmo pelo fluxo passante. O trecho do alimentador TAM-114 transferido para o BRU-109, como apresentado na Figura 2.13, possui pouco mais de 100 A em regime permanente, logo, a seccionadora 43286 é totalmente capaz de suportar este fluxo sem sofrer qualquer tipo de dano ou avaria.

A Figura 3.20 comprova o fluxo de carga apresentado pelo aplicativo CYMDIST, descrito no capítulo 2, que registrou pouco mais de 103 A no trecho a ser manobrado sobre o BRU-109, de 13,8 kV. A diferença encontrada entre o modelo construído no ATP – onde foi possível constatar aproximadamente 113 A (160/1,4142); com o aplicativo CYMDIST, utilizado para calcular o fluxo de carga dos alimentadores, foi de aproximadamente 9,7%.

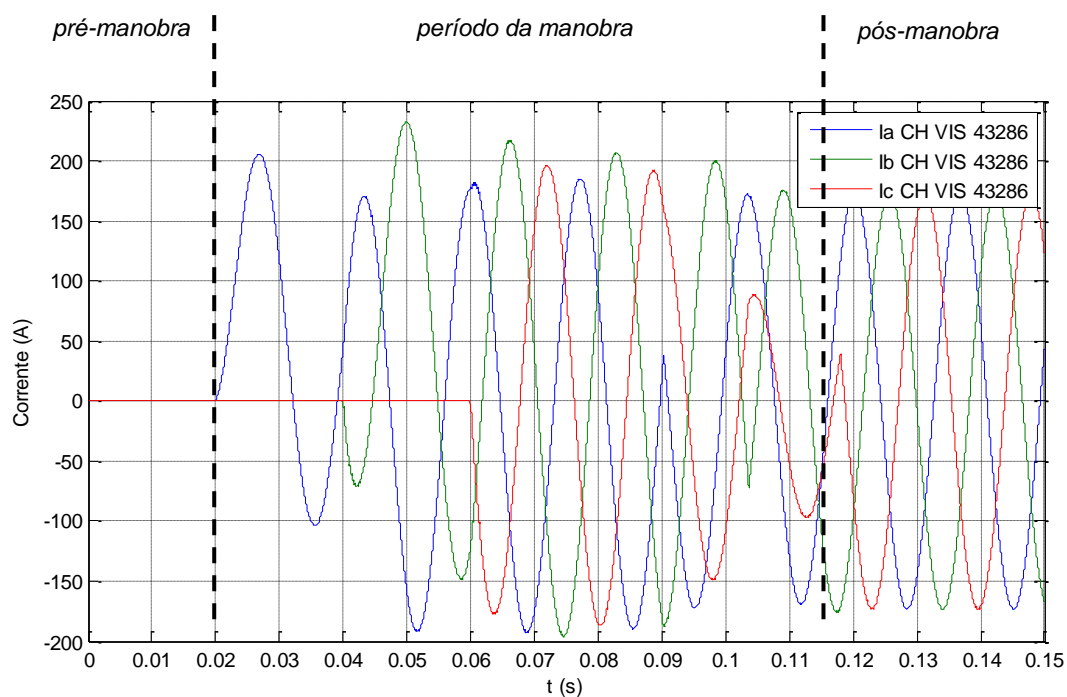


Figura 3.20 – Correntes pré e pós manobras de fechamento da chave de vis-à-vis 43286 – ATP.

Essa diferença percentual é aceitável em função dos valores das medições reais disponibilizadas na data das manobras, comparadas aos limites das capacidades dos equipamentos envolvidos na formação do anel entre as subestações de energia.

Em complemento aos dados dos medidores de qualidade de energia, as medições mostradas na figura seguinte foram realizadas nas estações transformadoras de distribuição, através dos medidores Kron modelo Multi-K-Plus. A Figura 3.21 mostra o carregamento dos disjuntores dos alimentadores BRU-109 e TAM-114, medidos através dos instrumentos instalados nas estações transformadoras de distribuição.

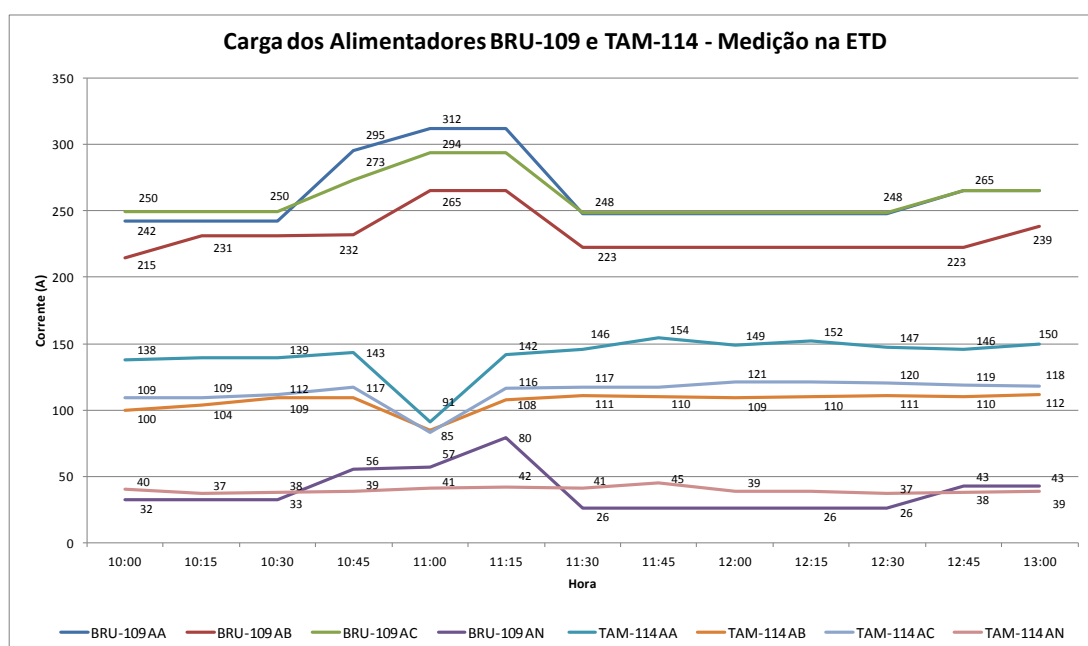


Figura 3.21 – Correntes pré e pós manobras das seccionadoras 43286 e 40343 – Medições nas estações transformadoras de distribuição.

De posse dos resultados obtidos até aqui e sem a constatação de nenhuma restrição para a realização desta configuração, o passo seguinte é a análise da corrente elétrica no ponto de separação do anel entre as subestações Anhanguera e Edgard de Souza, formado pelos alimentadores BRU-109 e TAM-114.

Após o fechamento da seccionadora de vis-à-vis 43286 é possível verificar, através da Figura 3.22, o desequilíbrio sofrido pela corrente no momento da abertura da seccionadora monopolar 40343. Note que a corrente sofre uma pequena, porém perceptível alteração em seus valores antes de sua eliminação com a abertura da seccionadora.

A alteração da carga na seccionadora 40343 se dá no momento inicial do fechamento da seccionadora de vis-à-vis 43286, ou seja, quando se inicia o processo de fechamento em anel, há um fluxo de corrente nas fases à medida que elas são fechadas.

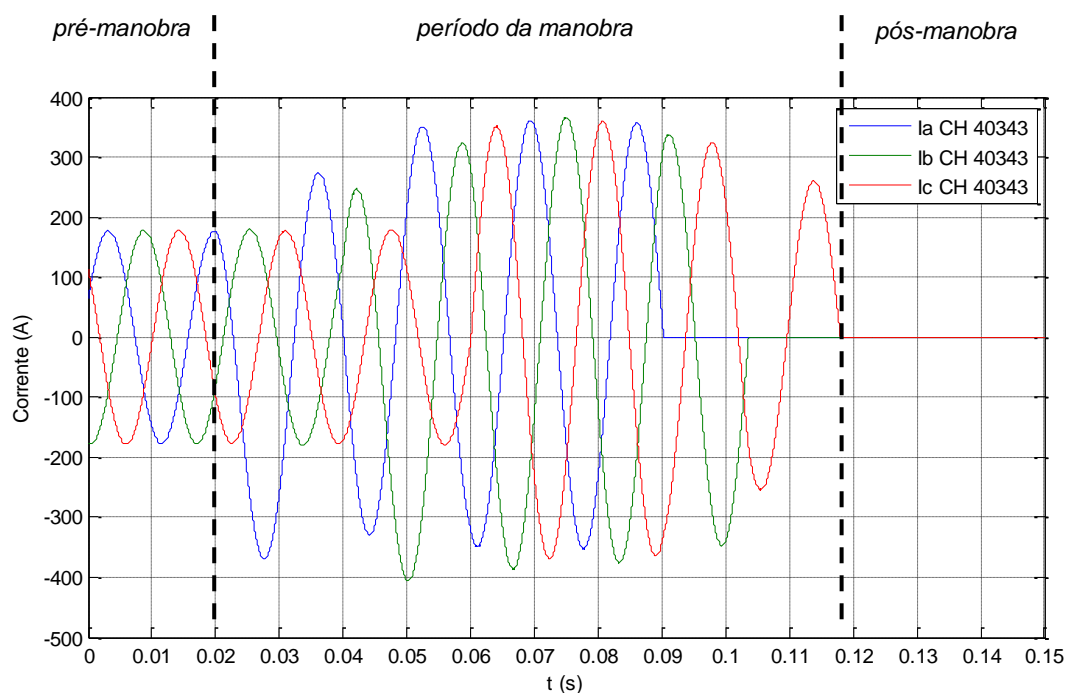


Figura 3.22 – Corrente pré e pós manobras de abertura da seccionadora monopolar 40343 – ATP.

O montante de carga, embora a Figura 3.22 apresente um valor relativamente elevado quando comparado com os valores em regime permanente da Figura 3.21, não coloca em risco a operação do equipamento, tampouco o eletricitista de rede que opera esta chave seccionadora, mantendo as condições de segurança dentro dos limites estabelecidos para operação no sistema de potência. Ainda que a capacidade das seccionadoras monopolares instaladas na rede seja de 600 A, seus limites e capacidades somente seriam superados se um dos alimentadores se desligasse no momento das manobras de fechamento do anel, mas esta hipótese não deve ser considerada para esta condição de operação temporária, pois a manobra é tratada de forma controlada e a probabilidade de ocorrer um curto-circuito neste momento é muito baixa, visto o histórico de ocorrências na rede.

Contudo, se esta situação ocorrer e um dos alimentadores se desligar no momento da formação do anel, a seccionadora não será danificada devido à atuação da proteção do disjuntor do alimentador remanescente. O sistema de proteção atua quando o alimentador entrar em condição de sobrecarga, enviando comando de desligamento para o disjuntor a fim de proteger, principalmente, os cabos subterrâneos de saída, instalados entre o disjuntor do circuito e o trecho aéreo do alimentador primário de distribuição.

3.2 MEDIÇÕES REAIS DAS MANOBRAS REALIZADAS

Os resultados obtidos nas simulações realizadas no ATP foram totalmente satisfatórios. Em nenhum momento os valores obtidos sinalizaram restrições técnicas ou operacionais que impedissem a realização das manobras reais de fechamento em anel entre as subestações de energia da ISA CTEEP.

Contudo, devido às similaridades dos valores observados no software de cálculo elétrico CYMDIST, com os valores obtidos no simulador ATP, foi possível concluir que o modelo confeccionado no simulador de transitórios eletromagnéticos foi totalmente satisfatório, atendendo todas as expectativas técnicas, operacionais e de segurança.

Portanto, com a validação do modelo utilizado no simulador ATP, que focou os efeitos transitórios na tensão e corrente, foi possível evoluir para a realização efetiva das manobras reais na rede aérea primária, colocando as subestações de energia Anhanguera e Edgard de Souza em paralelo através do anel formado pelos alimentadores BRU-109 e TAM-114, ambos de 13,8 kV.

As manobras reais se concretizaram no período da manhã, entre 10h30 e 12h00, tomando-se como base o patamar de carga média do sistema de potência da AES Eletropaulo.

Em função dos resultados obtidos nas simulações realizadas no aplicativo ATP, além dos cálculos de fluxo de carga realizados para os alimentadores através do Cymdist, o planejamento necessário para a execução das manobras reais de fechamento em anel deve contemplar algumas verificações importantes e seguir alguns passos como os listados abaixo.

Cargas dos Alimentadores Aéreos Primários

Recomenda-se que as cargas dos dois alimentadores envolvidos nas manobras, quando somadas, não ultrapasse a capacidade de um deles, considerando o alimentador de menor capacidade.

Esta recomendação, mesmo parecendo conservadora, não impede a realização das

manobras para os casos onde as cargas, quando somadas, superam a capacidade de um dos alimentadores candidatos ao fechamento do anel.

Tanto não é restritiva que no momento da manobra real, a carga total dos alimentadores BRU-109 e TAM-114, objetos de estudo deste trabalho, totalizou 405A, conforme valores apresentados na Tabela 3.5, superando em 1,25% a capacidade em regime do TAM-114, que é o alimentador de menor capacidade para este arranjo.

O objetivo dessa recomendação, que é manter a integridade dos alimentadores durante e após a mudança de configuração, visa atingir os setores de programação da operação e operação de tempo real, facilitando a análise e tomada de decisão na realização das manobras.

Outros fatores como importância das cargas, localidade do desligamento, indicadores técnicos de qualidade e continuidade, etc, também são avaliados no momento da aprovação e validação da manobra a ser realizada.

Tabela 3.5 – Cargas dos alimentadores TAM-114 e BRU-109 no momento das manobras – SSC.

<i>Equipamentos</i>	<i>CARGA (A)</i>		
	<i>Ia</i>	<i>Ib</i>	<i>Ic</i>
BRU - 109	260	230	250
TAM - 114	145	110	110
Total	405	340	360

Cargas dos Transformadores de Potência

As cargas dos transformadores de potência também são de suma importância, visto que esses equipamentos são os principais ativos de uma subestação.

A avaliação a ser feita, neste caso, é se os transformadores são capazes de atender a carga do alimentador que está sendo suprido por outra estação transformadora de distribuição, também envolvida na manobra, ou seja, no caso do desligamento de um dos alimentadores no momento do fechamento da seccionadora de vis-à-vis, o

transformador supridor do alimentador remanescente alimentará na totalidade as cargas dos dois alimentadores, além de sua própria carga, onde para esta condição, os valores não devem extrapolar as condições técnicas e operacionais dos equipamentos envolvidos.

Equalização das Tensões dos Transformadores de Potência

Para os casos onde as estações transformadoras de distribuição estejam sob supervisão de equipes técnicas, as tensões dos transformadores de potência podem ser equalizadas, a fim de manter equilibrados os níveis de tensão nos pontos das manobras. Cada transformador possui seu próprio seletor de tensão e cada seletor pode excursionar entre 16 posições, 8 posições aumentando e 8 posições diminuindo a tensão, tendo como referência a tensão nominal. O chaveamento pode variar a tensão em aproximadamente 0,75% do valor nominal, em cada chaveamento, totalizando 12% de variação total, sendo 6% de acréscimo e 6% de decréscimo na tensão nominal.

Com os ajustes propostos para as tensões, admitindo-se maior controle nos pontos de fechamento e abertura do anel entre os alimentadores, os seletores são manobrados para o nível ideal de tensão e, em seguida, os sistemas automáticos de operação deste equipamento são bloqueados. A intenção é manter o equilíbrio das tensões nas chaves seccionadoras, bem como a não comutação do seletor quando as chaves monopolares estiverem sendo operadas.

Bloqueio dos Relés de Religamentos Automáticos

Os bloqueios dos relés de religamentos automáticos dos alimentadores tem a finalidade de assegurar algumas condições de segurança dentro do cenário de formação de anel.

Este sistema visa manter a segurança operacional de equipamentos e, principalmente, a segurança pessoal do eletricitista de rede.

Com o relé de religamento automático bloqueado, no momento da formação ou abertura da configuração em anel, caso haja alguma falha de operação ou defeito em equipamento e um dos alimentadores venha a se desligar, o eletricitista de rede

ou o equipamento não sofrerão os efeitos transitórios da tensão ou corrente com o religamento do disjuntor do alimentador, que está fisicamente instalado na estação transformadora de distribuição.

Com os cuidados e premissas iniciais atendidas, o planejamento das manobras reais para a configuração de fechamento em anel entre as subestações de energia pôde ser iniciado.

Os seletores de tensão dos transformadores das ETDs Barueri e Tamboré foram manobrados e bloqueados, com o propósito de manter as tensões de operação desses equipamentos próximas a 13,7 kV, onde os seletores permaneceram operando nessa condição durante a realização das manobras de fechamento e abertura do anel, formado através dos alimentadores BRU-109 e TAM-114.

Esta operação tem o objetivo de diminuir o degrau de tensão nos pontos de manobras, tanto no fechamento do anel, através da seccionadora de vis-à-vis monopolar 43286, como na abertura, através da seccionadora monopolar 40343.

A Tabela 3.6 apresenta as tensões e correntes dos secundários dos transformadores de potência, após os bloqueios dos seletores de tensão.

Tabela 3.6 – Tensões e correntes dos transformadores das estações transformadoras de distribuição.

<i>Equipamento ETD Tamboré</i>	<i>TAP</i>	<i>CARGA (A)</i>			<i>TENSÃO (kV)</i>		
		<i>I_a</i>	<i>I_b</i>	<i>I_c</i>	<i>V_{ab}</i>	<i>V_{bc}</i>	<i>V_{ca}</i>
TR – 2S2	0	690	660	700	13,6	13,6	13,6
TR – 2S4	0	860	860	860	13,6	13,6	13,6

<i>Equipamento ETD Barueri</i>	<i>TAP</i>	<i>CARGA (A)</i>			<i>TENSÃO (kV)</i>		
		<i>I_a</i>	<i>I_b</i>	<i>I_c</i>	<i>V_{ab}</i>	<i>V_{bc}</i>	<i>V_{ca}</i>
TR – 2S2	11	770	840	870	13,8	13,8	13,7
TR – 2S3	11	250	220	250	13,9	13,7	13,8

As diferenças aceitáveis entre as tensões secundárias dos transformadores das estações transformadoras foram descritas no tópico 3.1.1 deste capítulo, porém, em

função dos comprimentos, impedâncias e bitolas dos cabos condutores, é razoável uma diferença de aproximadamente 500 V entre as tensões secundárias dos transformadores envolvidos no fechamento do anel, onde esta diferença atenderá e ficará aquém dos limites restritivos em função das capacidades das chaves seccionadoras manobráveis.

O aplicativo ATP, utilizado para as análises das tensões nos pontos das manobras de fechamento e abertura de anel, recebeu máxima atenção em função dos modelos confeccionados em sua base de desenvolvimento, visando os componentes e equipamentos do sistema de potência.

Para este estudo não foi necessário manobrar os seletores dos transformadores das subestações de energia da ISA CTEEP, visto que os ajustes nas tensões foram realizados nas estações transformadoras de distribuição. A Figura 3.23 apresenta as tensões médias nas barras de 88 kV das S/Es Anhanguera e Edgard de Souza.

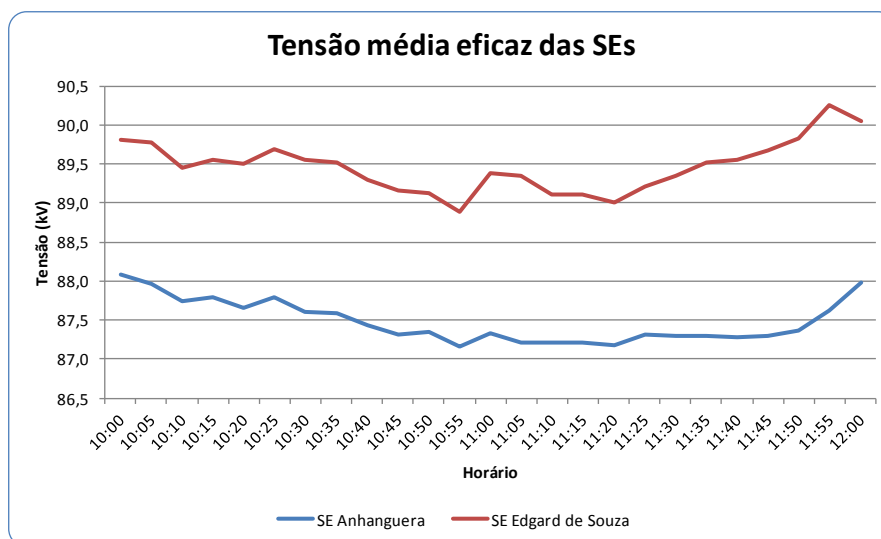


Figura 3.23 – Tensão nas barras das S/Es Anhanguera e Edgard de Souza.

É possível notar que em alguns momentos a diferença de tensão atinge valores acima de 2 kV. Essa diferença não é tratada como anormalidade, pois há outros fatores correlacionados com essa condição de operação, como por exemplo, o nível

de tensão contratual dos clientes supridos pelo sistema de subtransmissão, comprimento das linhas aéreas, densidade e distribuição de cargas, entre outros.

Outra avaliação necessária é sobre a capacidade do alimentador frente aos desligamentos emergenciais no momento das manobras, onde, através da Tabela 3.7, é possível notar a limitação estabelecida pela capacidade do alimentador TAM-114 que, neste caso, é de 9,56 MVA, em função dos cabos condutores instalados entre o disjuntor e a seccionadora monopolar de saída, que faz a transição dos cabos subterrâneos para os cabos aéreos do alimentador.

Tabela 3.7 – Carregamentos e capacidades dos alimentadores BRU-109 e TAM-114.

<i>Equipamentos</i>	<i>CARGA (A)</i>			<i>CARGA (MVA)</i>	<i>CAPACIDADE MÁX</i>	
	<i>Ia</i>	<i>Ib</i>	<i>Ic</i>		<i>MVA</i>	<i>A</i>
BRU - 109	260	230	250	6,21	14,34	600
TAM - 114	145	110	110	3,47	9,56	400
Total	405	340	360	9,68	23,90	1000

Como a superação na fase “a” do TAM-114 é de apenas 1,25%, ou seja, caso o alimentador BRU-109 se desligue na ocasião das manobras, o alimentador TAM-114 teria sua capacidade nominal superada em 5 A, passando seu carregamento de 145 para 405 A. Mas, não sendo esta superação impeditiva à realização das manobras.

Sem limitações impostas pelos componentes e acessórios dos alimentadores, a avaliação das restrições dos equipamentos foca, a partir de agora, os transformadores de potência das estações transformadoras de distribuição.

O transformador 2 da estação transformadora de distribuição Barueri possui um secundário com duas saídas, onde cada saída alimenta uma barra de distribuição de energia, conforme representado na Figura 2.6, que, em tese, drena 50% dos 40 MVA de sua capacidade total, limitando, portanto, a barra 3 de 13,8 kV em 20 MVA. Essa capacidade depende também das limitações dos cabos e conexões secundárias do transformador.

Diferentemente da configuração da estação transformadora de distribuição Barueri, a ETD Tamboré possui transformadores com dois secundários, onde cada um deles contribui com potência máxima de 30 MVA ao sistema de distribuição, como pode ser verificado na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Carregamentos e capacidades dos transformadores das ETDs Barueri e Tamboré.

<i>Equipamentos</i>	<i>CARGA (A)</i>			<i>CARGA (MVA)</i>	<i>CAPACIDADE MÁX</i>	
	<i>Ia</i>	<i>Ib</i>	<i>Ic</i>		<i>MVA</i>	<i>A</i>
Sec 3 (BRU)	250	220	250	5,98	20,00	837
Sec 4 (TAM)	860	860	860	20,56	30,00	1255
Total	1110	1080	1110	26,53	50,00	2092

Contudo, admitindo que qualquer um dos transformadores envolvidos no fechamento do anel seja capaz de alimentar as cargas dos dois alimentadores, não se constata sobrecarga que coloque em risco esses equipamentos. De acordo com a Tabela 3.8, o transformador 2 da estação transformadora de distribuição Barueri, ao alimentar os dois alimentadores ficará com 48,4% de sua capacidade nominal. Já o transformador 2 da estação transformadora de distribuição Tamboré, para a mesma condição de alimentação, terá 89,2% de sua capacidade comprometida. Portanto, esta condição também não ofereceu nenhuma restrição à realização das manobras de fechamento dos alimentadores em anel.

Tendo em vista a necessidade de se obter valores mais confiáveis das medições nas estações transformadoras de distribuição, até mesmo para confrontar com os dados extraídos do Sistema de Supervisão e Controle (SSC), as grandezas provenientes das manobras de fechamento e abertura do anel entre as subestações de energia Anhanguera e Edgard de Souza são analisadas com base nos dados do medidor de qualidade de energia, conforme modelo apresentado na Figura 3.1.

As figuras seguintes representam, efetivamente, os resultados obtidos em consequência dos testes reais realizados na rede aérea primária de distribuição. As grandezas são comentadas em cada etapa da manobra, tanto no fechamento,

quanto na abertura do anel, considerando os efeitos em regime permanente, bem como os efeitos transitórios. Sem restrições impostas pelos transformadores de potência das duas estações transformadoras, a manobra de fechamento em anel prossegue com a equalização das tensões secundárias dos transformadores e com os bloqueios dos relés de religamentos automáticos dos alimentadores.

A Figura 3.24 mostra as tensões secundárias dos transformadores durante as manobras de fechamento em anel. É possível notar o momento da equalização das tensões com os bloqueios dos seletores de tensão e, posteriormente, os desbloqueios após o término das manobras. As demais oscilações que são verificadas estão relacionadas aos demais estágios da manobra de fechamento e abertura do anel e a transferência de carga do TAM-114 para o BRU-109.

No ponto “A”, em destaque na Figura 3.24, é possível constatar o momento do fechamento da seccionadora monopolar de vis-à-vis 43286, formando o anel entre os dois alimentadores. No ponto “B” é possível notar o momento da separação do anel através da seccionadora monopolar 40343, instalada e operando no tronco do alimentador TAM-114.

Após a conclusão desta etapa, inicia-se o processo de normalização dos alimentadores, portanto, o ponto “C” mostra o momento do fechamento da chave seccionadora 40343, formando novamente o anel entre os alimentadores. Em seguida, é possível notar através do ponto “D” a abertura da chave seccionadora de vis-à-vis 43286, desfazendo novamente o anel formado pelos alimentadores e subestações de energia. Criou-se uma especial atenção no comportamento das correntes *rms* no momento do fechamento da seccionadora monopolar 43286, visto que esta configuração de anel entre subestações de energia jamais havia sido formada.

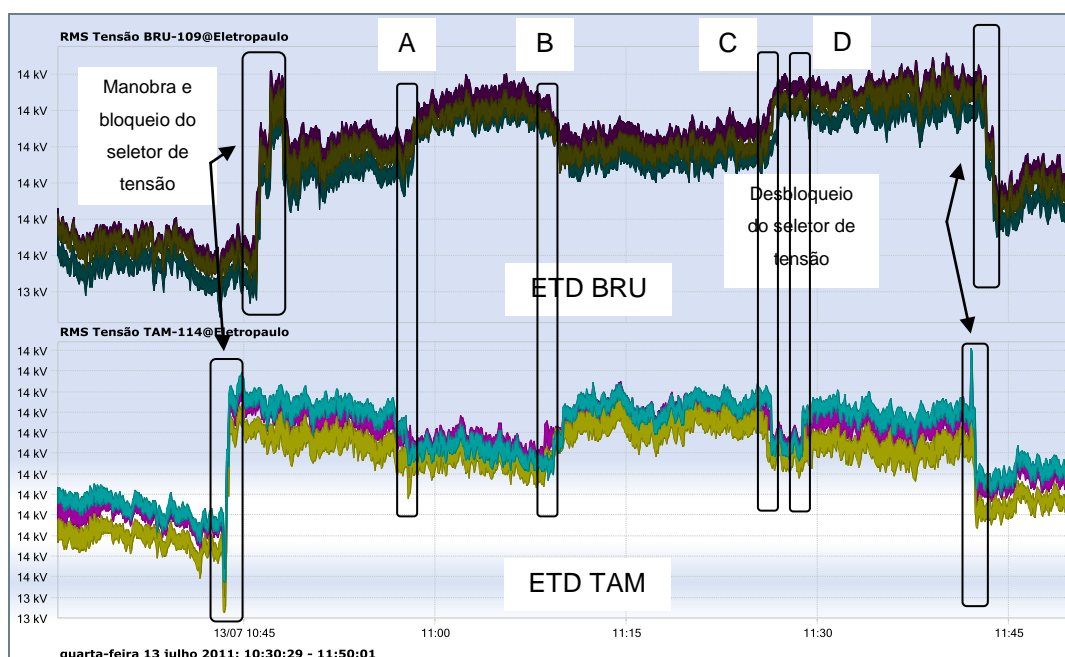


Figura 3.24 – Tensões rms dos secundários dos transformadores das ETDs Barueri e Tamboré durante as manobras de fechamento e abertura do anel.

Analisando a Figura 3.25 é possível constatar o comportamento das correntes em regime permanente. Imediatamente após a formação do anel, o alimentador BRU-109 troca parte de sua carga com o TAM-114, fato comprovado pelas oscilações iniciais dessa grandeza. Semelhantemente a análise realizada para a tensão, o gráfico das correntes mostra o ponto “A”, em destaque na Figura 3.25, onde é possível constatar o momento do fechamento da seccionadora monopolar de vis-à-vis 43286, formando o anel entre os dois alimentadores. No ponto “B” é possível notar o momento da separação do anel através da seccionadora monopolar 40343, do alimentador TAM-114.

Após a conclusão desta etapa, inicia-se o processo de normalização dos alimentadores, portanto, o ponto “C” mostra o momento do fechamento da chave seccionadora 40343, formando novamente o anel entre os alimentadores.

Em seguida, é possível notar através do ponto “D” a abertura da seccionadora de vis-à-vis 43286, desfazendo novamente o anel formado pelos alimentadores e subestações de energia.

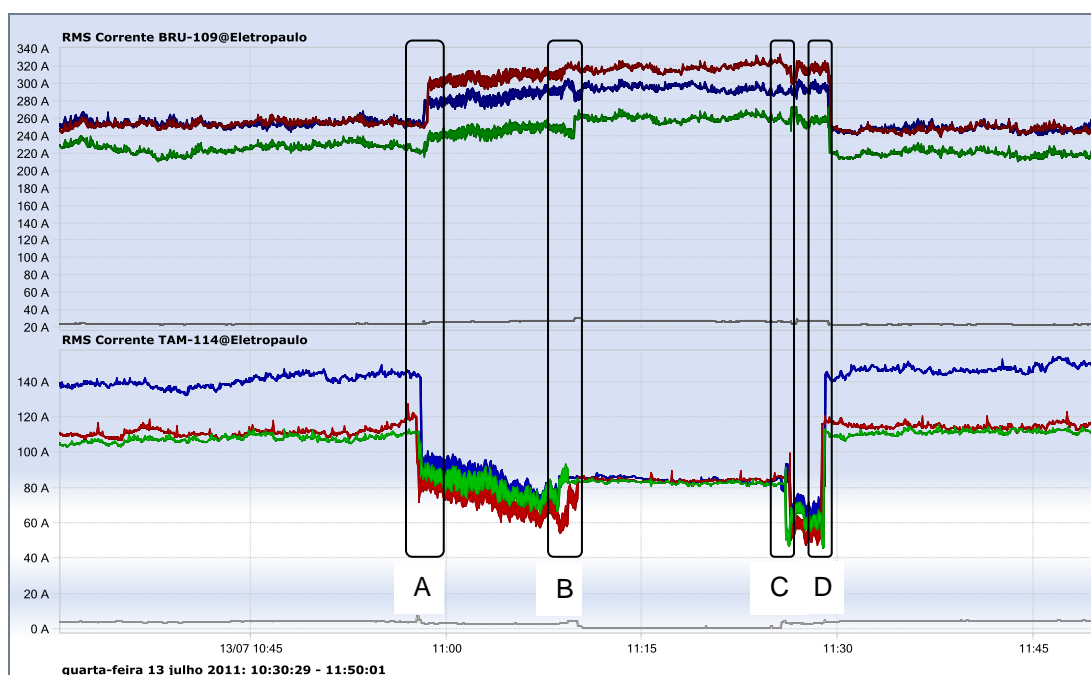


Figura 3.25 – Correntes rms dos alimentadores BRU-109 e TAM-114 durante as manobra de fechamento e abertura do anel.

Portanto, como pode ser verificado nas figuras anteriores, não se constatou nenhum transitório que inviabilizasse este tipo de operação, tanto nas análises das tensões, como nas análises das correntes, confirmando o sucesso esperado pelas simulações realizadas no ATP.

A Figura 3.26 aponta as variações das correntes e tensões, simultaneamente, à medida que as manobras são realizadas. Note que as oscilações registradas não ferem os critérios técnicos pré-estabelecidos para os indicadores de qualidade descritos no Prodist módulo 8, da ANEEL.

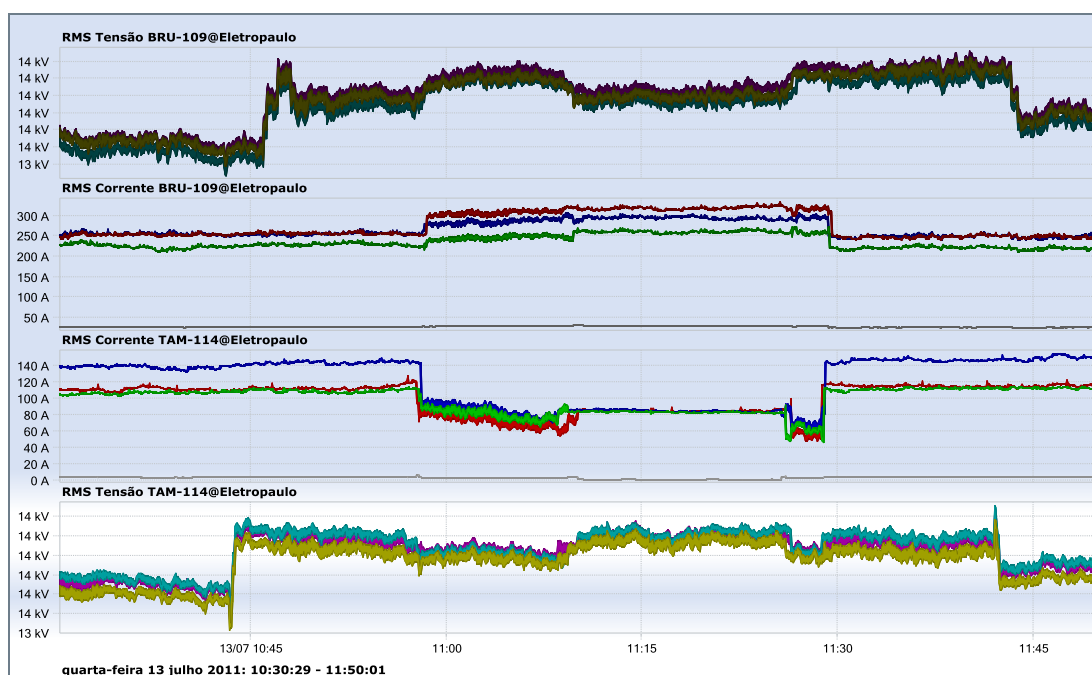


Figura 3.26 – Tensões e correntes rms para os secundários dos transformadores e para os alimentadores envolvidos nas manobras de fechamento em anel.

Outro ponto importante a ser observado é a forma de onda das grandezas envolvidas e registradas no fechamento e abertura do anel entre os alimentadores, como mostra a Figura 3.29, a Figura 3.28 e a Figura 3.29.

As correntes instantâneas são apresentadas separadamente, por fase, em função de suas características e tendências, conforme apresentadas e descritas nas figuras e nomeadas como L1, L2 e L3.

Devido às seccionadoras serem monopolares e suas fases manobradas separadamente, no momento de fechamento ou abertura de cada polo, o sistema elétrico envolvido reage à nova configuração, absorvendo os efeitos transitórios das manobras e entrando novamente em regime, antes do fechamento (ou abertura) da próxima fase. Portanto, após o período transitório provocado por cada manobra, o sistema se estabiliza de forma quase que imediata.

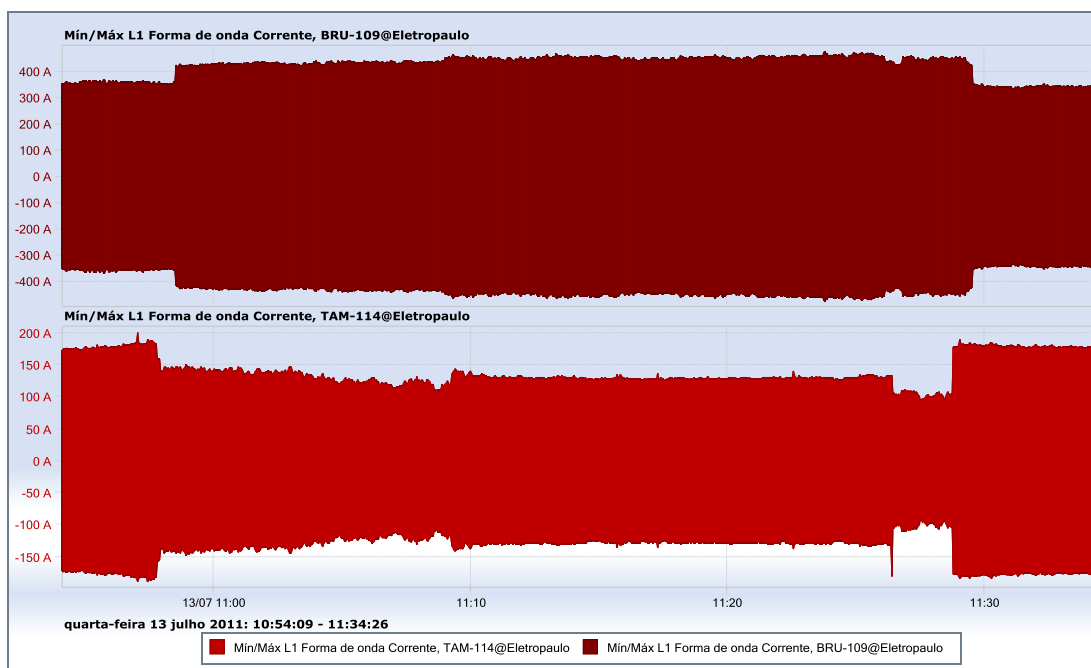


Figura 3.27 – Forma de onda com os mínimos e máximos das correntes dos alimentadores BRU-109 e TAM-114, Fase 1.

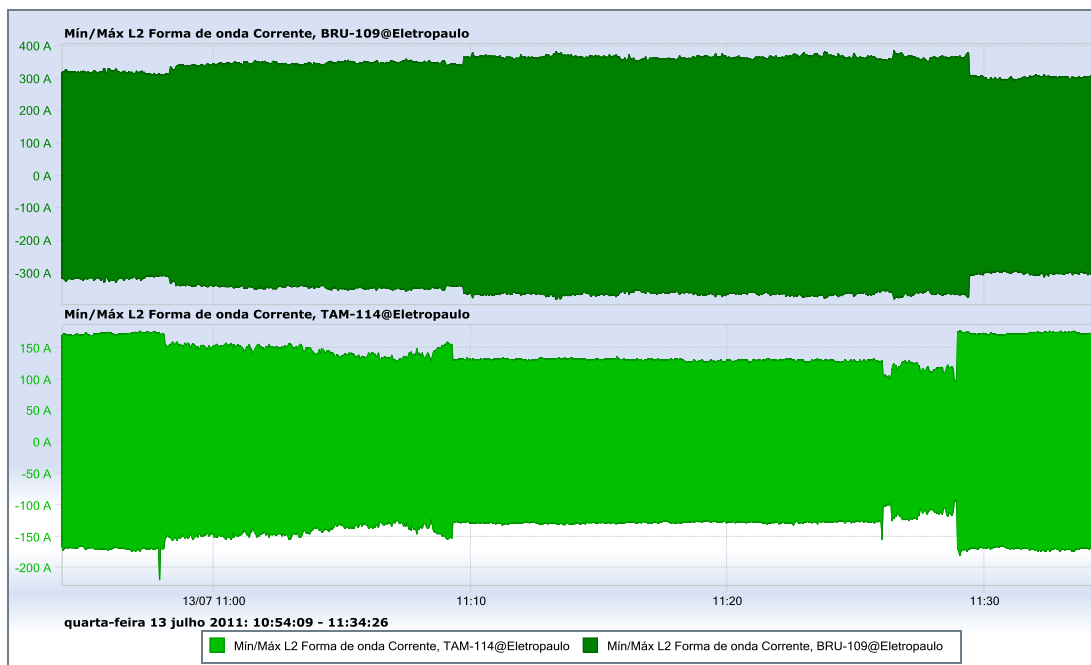


Figura 3.28 – Forma de onda com os mínimos e máximos das correntes dos alimentadores BRU-109 e TAM-114, Fase 2.

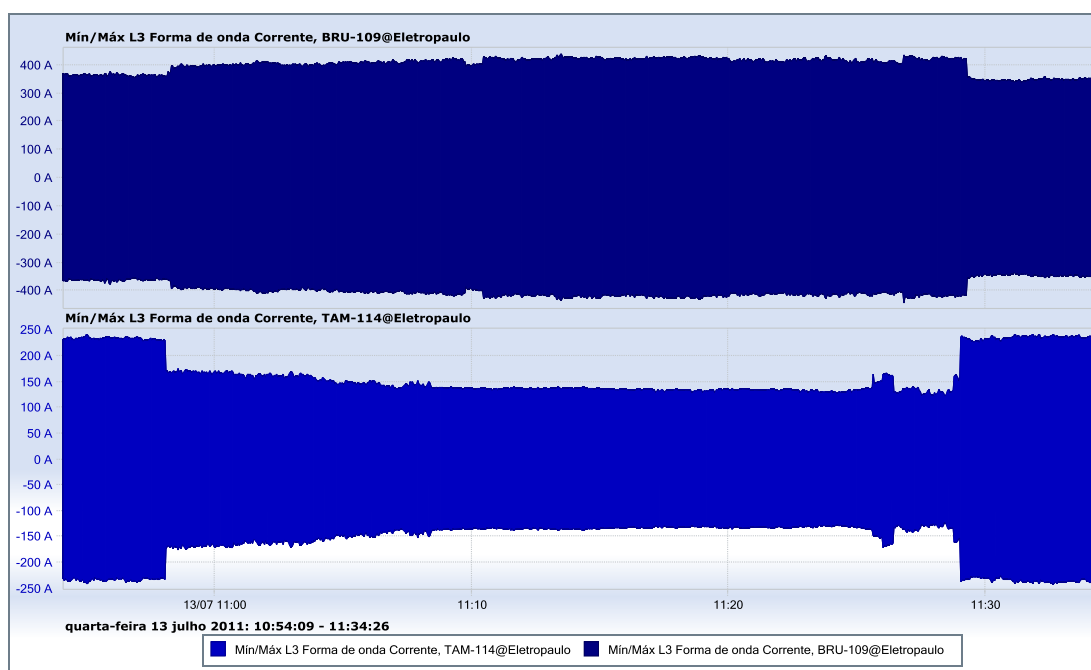


Figura 3.29 – Forma de onda com os mínimos e máximos das correntes dos alimentadores BRU-109 e TAM-114, Fase 3.

Outra grandeza que necessita de muita atenção é a corrente de neutro que circula em cada um dos alimentadores. Os equipamentos instalados em sistemas de potência possuem dispositivos de proteção com elementos dedicados para a proteção do neutro. As proteções implantadas visam proteger os equipamentos das correntes de neutro circulantes provenientes de curtos-circuitos, bem como de correntes que surgem pelo desequilíbrio das cargas entre as fases. Esse desequilíbrio é resultado da inobservância no momento da distribuição dos equipamentos instalados e ligados ao longo dos alimentadores.

A Figura 3.30 mostra, efetivamente, as alterações nas amplitudes das correntes de neutro dos dois alimentadores.

É notória a diminuição da corrente de neutro do alimentador TAM-114, porém, o acréscimo dessa mesma grandeza não é verificado na mesma proporção para o BRU-109.

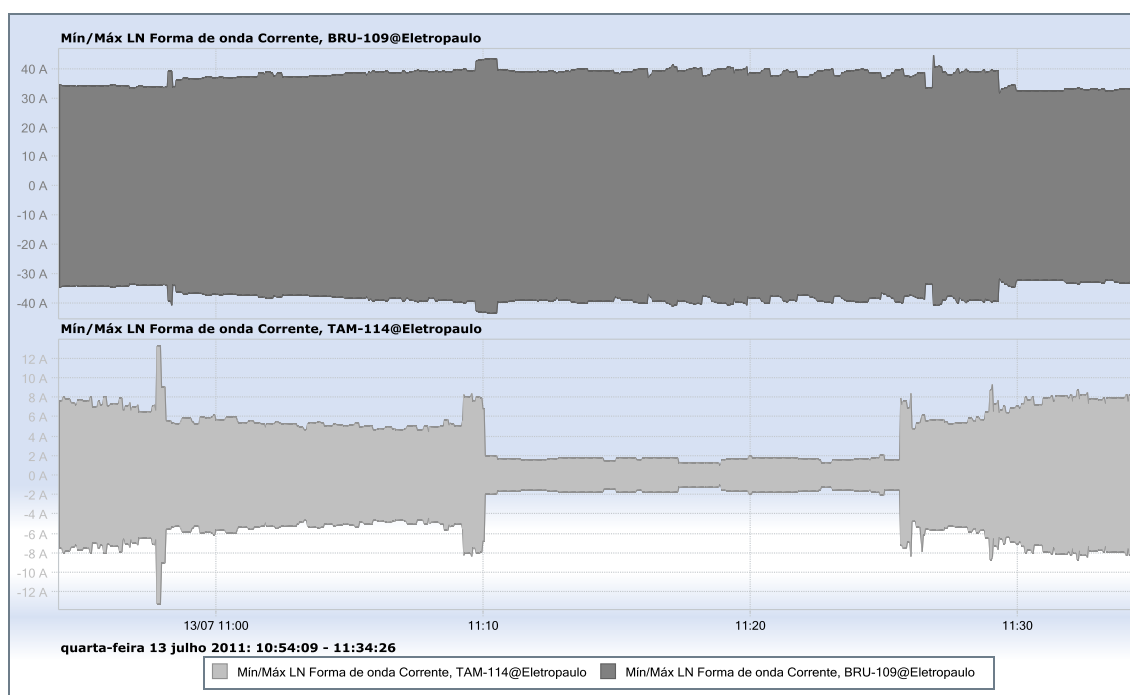


Figura 3.30 – Forma de onda da corrente do neutro dos alimentadores BRU-109 e TAM-114.

Este efeito é justificado pelo ponto de manobra entre os alimentadores, pelas cargas próprias do alimentador BRU-109, bem como pelo efeito das cargas transferidas do TAM-114.

O fato de transferir um bloco de carga, causador de desequilíbrio em seu supridor original, para outro circuito de distribuição não causará, necessariamente, o mesmo efeito em seu novo alimentador.

Nesse caso, fica evidente que o bloco de carga transferido do TAM-114 para o BRU-109 é o maior causador do desequilíbrio citado. Esse efeito está associado à transferência de carga entre os alimentadores, resultando em um maior equilíbrio das cargas entre as fases, tanto para o alimentador que fornece, quanto para o que recebe o bloco de carga.

Em busca de interpretar as pequenas oscilações transitórias no momento do fechamento e abertura das seccionadoras, quatro pontos foram selecionados na Figura 3.31 para serem analisados.

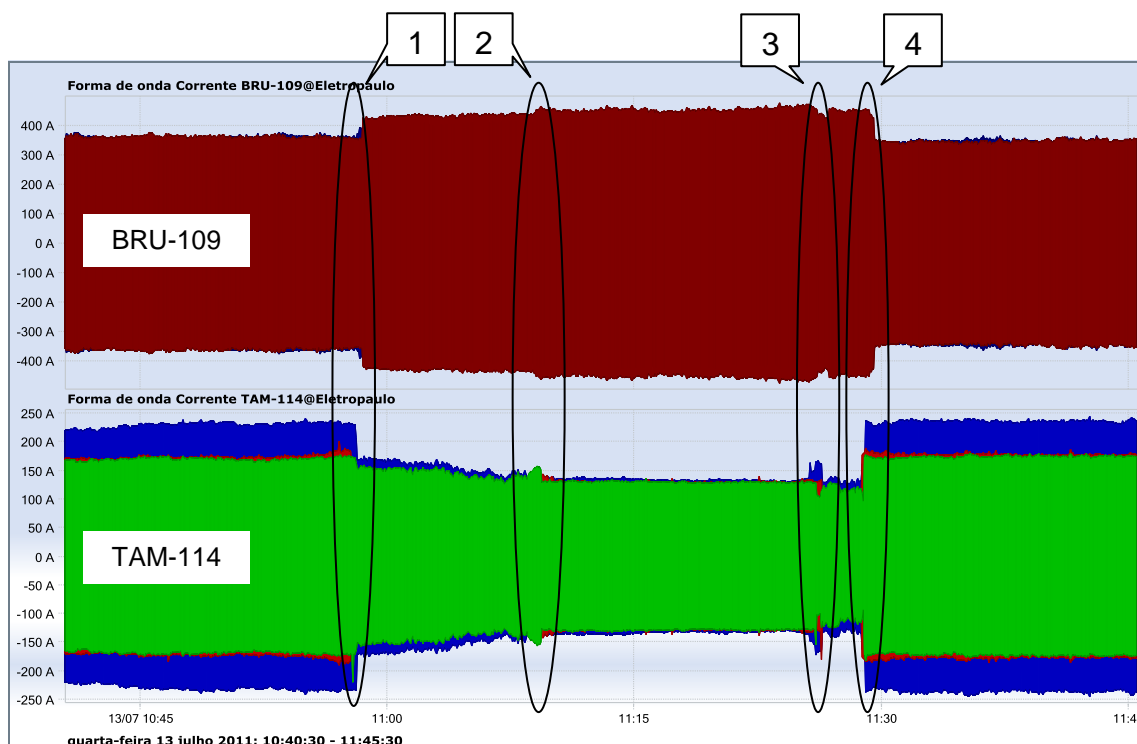


Figura 3.31 – Forma de onda das correntes dos alimentadores BRU-109 e TAM-114.

Ao ampliar o ponto “1” da Figura 3.31, que é exatamente o momento inicial das manobras de paralelismo, tornam-se evidentes as oscilações nas correntes em função da mudança do fluxo de carga.

A Figura 3.32 descreve com detalhes o comportamento dessas grandezas, porém, este efeito pode ser verificado com mais detalhes na Figura 3.33, que utiliza os artifícios do software de análise do medidor de qualidade de energia para dar ênfase ao momento inicial das manobras apontado no gráfico anterior.

Ampliando ainda mais o ponto “1”, agora classificado de ponto “A” na Figura 3.32, nota-se a diminuição da amplitude da corrente da fase “C” (azul) do alimentador TAM-114 no momento exato do fechamento da seccionadora de vis-à-vis, ou seja, no momento do fechamento do anel.

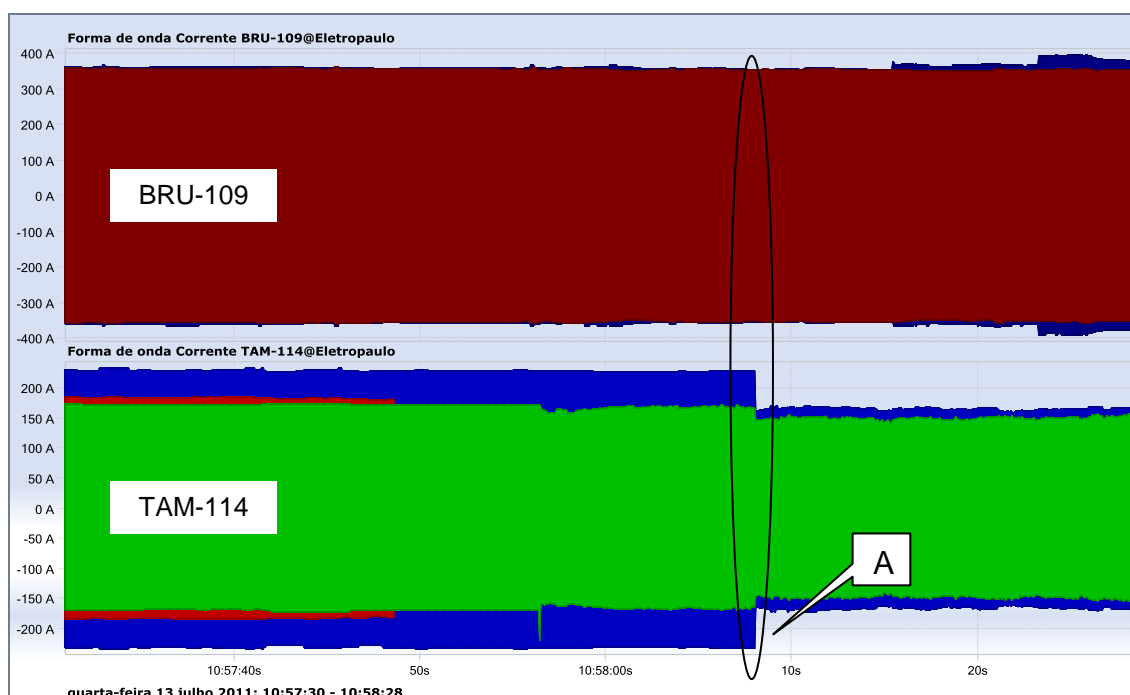


Figura 3.32 – Detalhe das correntes dos alimentadores no momento do fechamento do anel entre as S/Es Anhanguera e Edgard de Souza.

Em função da alta taxa de amostragem do medidor de qualidade de energia, mesmo com a ampliação do ponto “1”, não é possível verificar em detalhes os transitórios no instante inicial das manobras de fechamento em anel.

Partindo para uma análise mais detalhada, é possível dizer que o alimentador BRU-109, como pode ser verificado através da Figura 3.33 com a ampliação do detalhe “A”, não apresenta variações bruscas em suas correntes, inclusive a de neutro.

O mesmo não ocorre para o seu par, onde é possível verificar, na mesma figura, que o alimentador TAM-114 sofre perceptíveis variações nas correntes, sendo a atenuação na amplitude da fase “C” (azul) a mais intensa, porém, tendendo ao equilíbrio com as demais fases num período curto de tempo.

A análise direciona para uma questão operacional onde, do ponto de vista da diminuição da amplitude da fase azul, pode-se afirmar que houve maior equilíbrio no carregamento entre as fases e isso é benéfico ao alimentador.

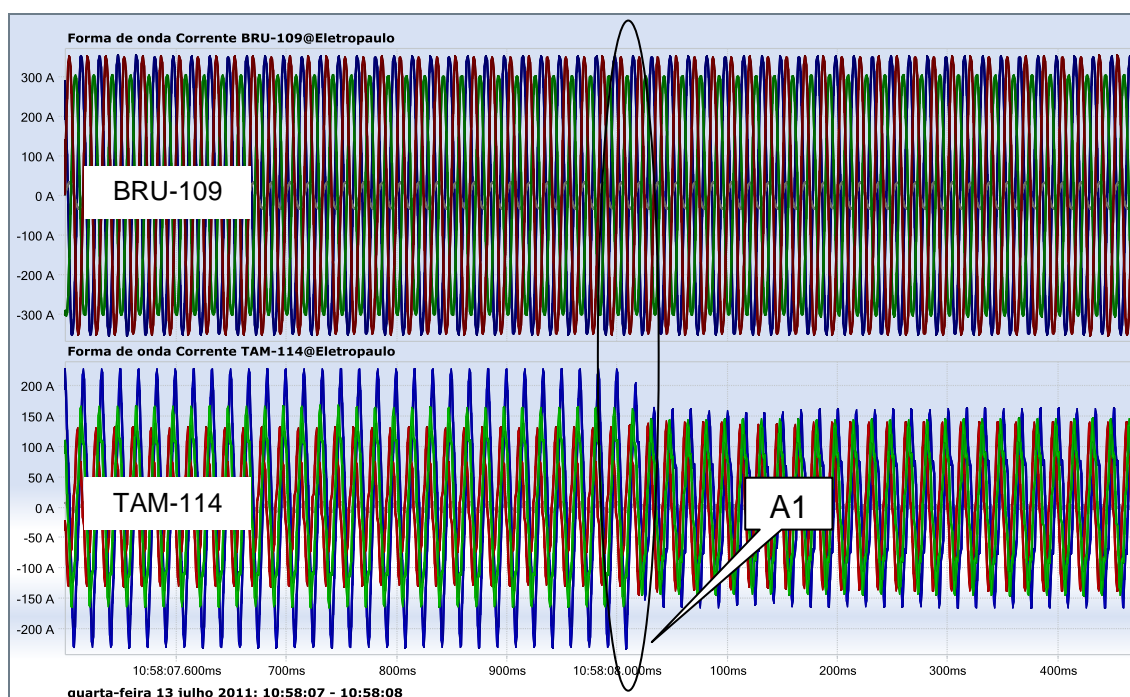


Figura 3.33 – Forma de onda das correntes dos alimentadores BRU-109 e TAM-114, com a ampliação do ponto A.

Em continuidade na análise na Figura 3.33, verifica-se um deslocamento angular irregular da fase “B” (verde) do alimentador TAM-114, fato associado à inversão na polaridade no transformador de corrente no momento da instalação do medidor de qualidade de energia. Esta situação foi corrigida após a extração dos dados do medidor, como mostra a Figura 3.34. É notória a deformação da forma de onda do TAM-114, fato associado à característica de carga desse alimentador.

Após a correção angular citada anteriormente, ao avaliar o ponto “A1” apontado na Figura 3.33, é possível constatar um leve deslocamento angular entre as formas de onda das correntes do alimentador TAM-114, como mostra a Figura 3.34.

Esse fenômeno, por si só, provoca diversos efeitos negativos à qualidade do fornecimento de energia, sem considerar a elevação do valor médio quadrático das correntes de fase e de linha do alimentador.

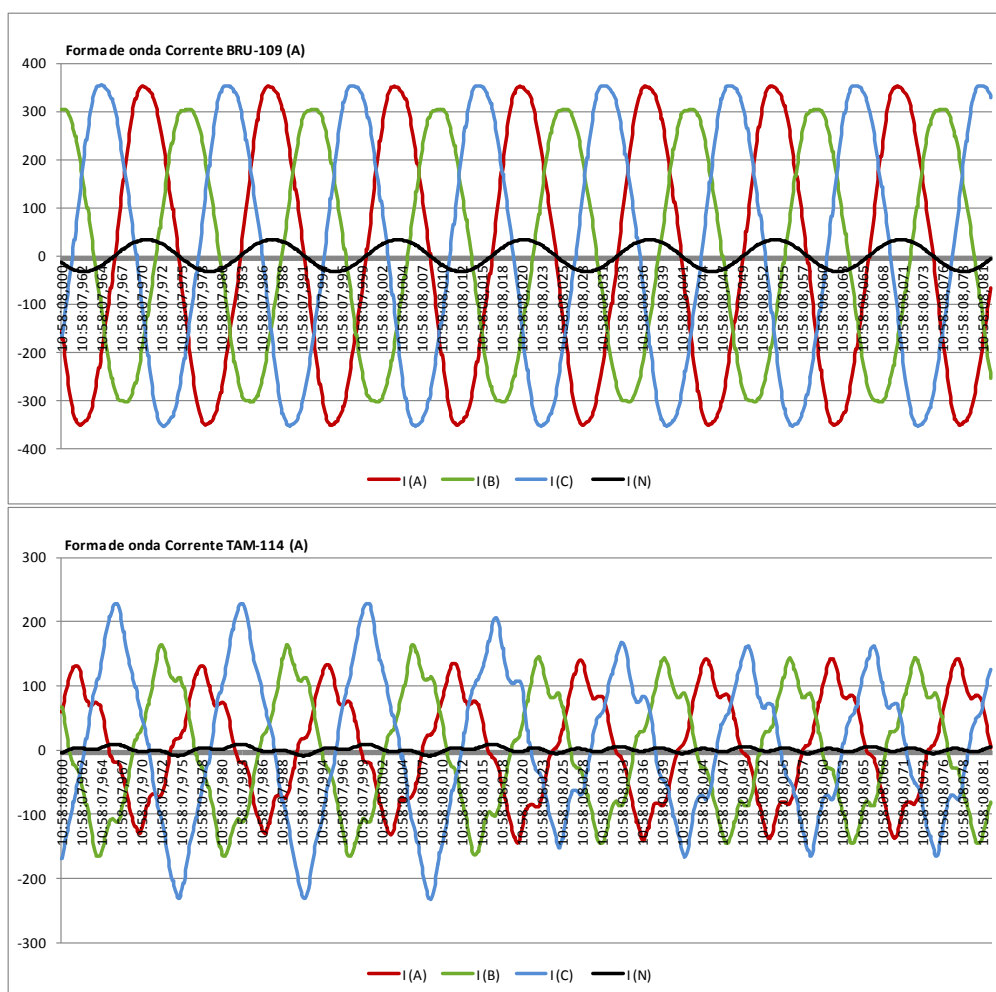


Figura 3.34 – Forma de onda das correntes dos alimentadores BRU-109 e TAM-114, com a ampliação do ponto A1.

A análise seguinte se dá a partir do ponto “2” da Figura 3.31, que descreve a reação do sistema em função da abertura do anel entre as subestações de energia Edgard de Souza e Anhanguera, realizado através da seccionadora monopolar 40343, referente ao alimentador TAM-114.

Nessa operação não se constata nenhum efeito transitório danoso provocado pela abertura do anel, como pode ser confirmado através dos dados registrados e apresentados na Figura 3.35.

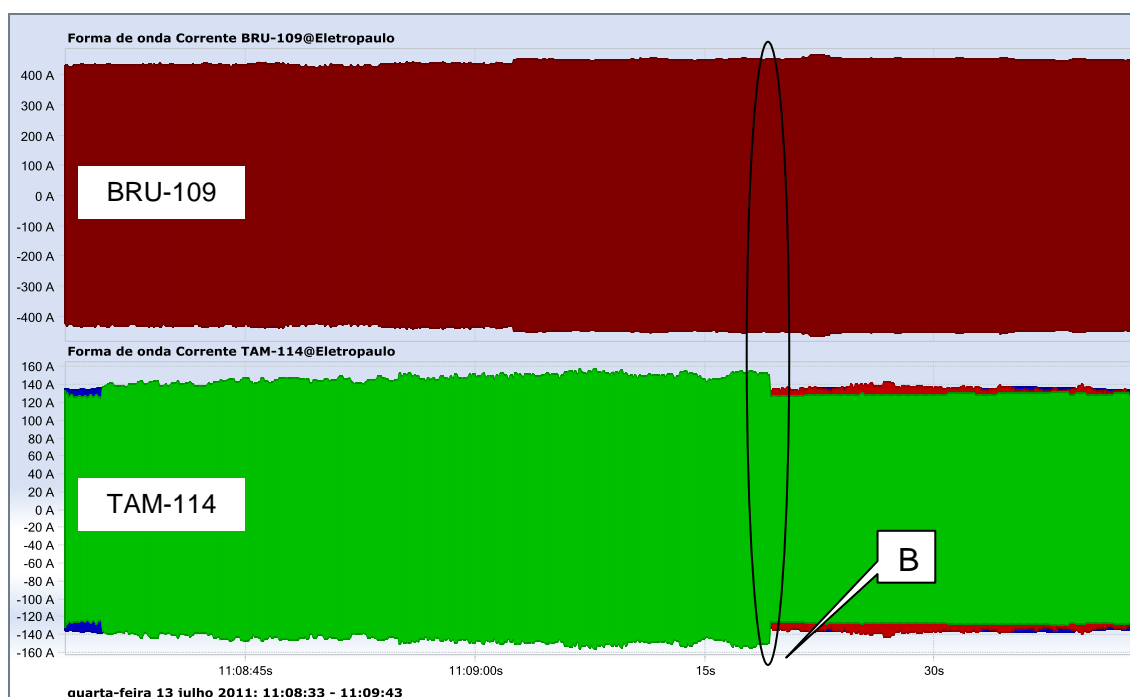


Figura 3.35 – Detalhe das correntes dos alimentadores no momento da abertura do anel entre as S/Es Anhanguera e Edgard de Souza.

Aproveitando novamente as altas taxas de amostragens dos medidores de qualidade, instalados nos disjuntores dos alimentadores com o propósito de registrar seus comportamentos frente às manobras reais, foi possível aprofundar as análises ampliando-se o detalhe “B” da Figura 3.35, que reflete o momento exato da manobra de separação das subestações de energia através do seccionamento dos dois alimentadores em paralelo.

Ao ampliar esse novo ponto de observação, notam-se pequenas variações nas amplitudes das correntes dos dois alimentadores.

Realizando-se nova ampliação, porém, agora o ponto “B1” da Figura 3.36, é possível verificar as mudanças nas amplitudes das correntes dos alimentadores, através da Figura 3.37.

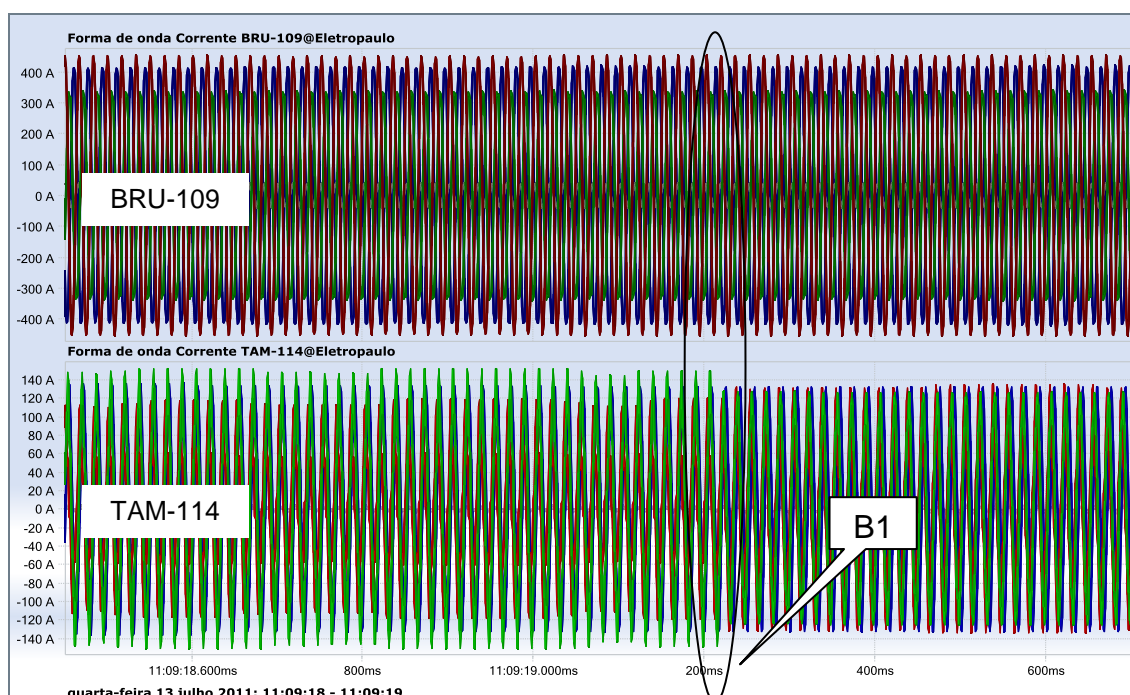


Figura 3.36 – Forma de onda das correntes dos alimentadores BRU-109 e TAM-114, com a ampliação do ponto B.

A efetiva abertura do anel não provoca extrapolação dos valores aceitáveis, considerando as limitações das seccionadoras monopolares manobradas, conseqüentemente, não colocando em risco o equipamento e o eletrícista que o opera.

Através da Figura 3.37 é possível notar a continuidade da defasagem angular entre as fases do alimentador TAM-114, levando-se em consideração o momento do fechamento do anel. Novamente essa defasagem angular não é associada ao momento da abertura do anel entre as subestações de energia Anhanguera e Edgard de Souza, mas com certeza à característica da carga do circuito TAM-114, principalmente do trecho remanescente alimentado por seu disjuntor original.

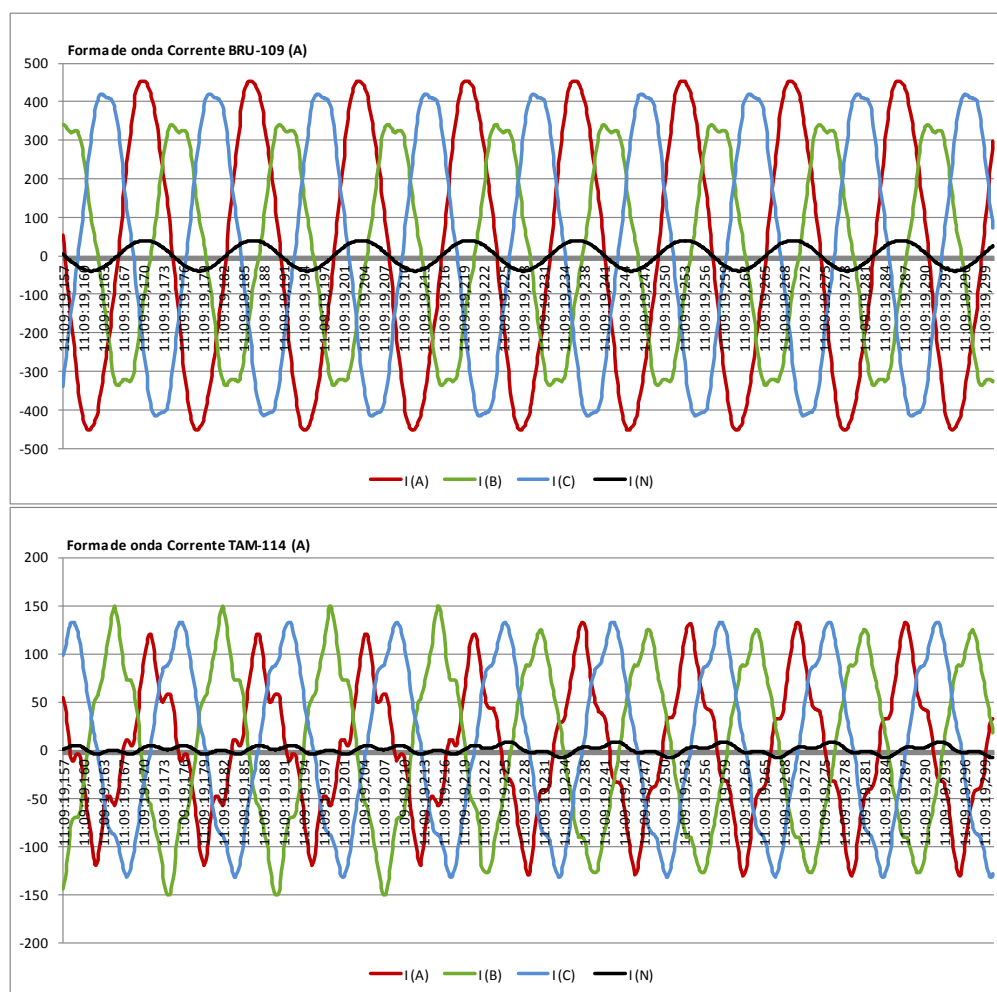


Figura 3.37 – Forma de onda das correntes dos alimentadores BRU-109 e TAM-114, com a ampliação do ponto B1.

Com os limites dos equipamentos respeitados e preservados, com as amplitudes das grandezas dentro dos limites esperados e constatados pelo simulador utilizado, fica estabelecido o sucesso da manobra de fechamento e abertura do anel através das seccionadoras monopolares 43286 e 40343.

Após a constatação do sucesso na realização das manobras, descritas anteriormente, é possível retornar o sistema elétrico representado pelos alimentadores BRU-109 e TAM-114 para as condições iniciais de operação, ou seja, fechar novamente o anel, porém nesta etapa através da seccionadora 40343 e, posteriormente, a abertura do anel através da seccionadora de vis-à-vis 43286.

Aproveitando a necessidade da reconfiguração das redes aéreas primárias, poder-se-á, a partir deste momento, avaliar os pontos “3” e “4” descritos na Figura 3.31. O ponto de observação “3” representa o fechamento do anel através da seccionadora monopolar 40343, do alimentador TAM-114.

Já o ponto de observação “4” representa a abertura do anel através da seccionadora monopolar de vis-à-vis 43286. Ao ampliar o ponto de observação “3” é possível constatar a retomada das cargas dos alimentadores nas mesmas magnitudes que possuíam antes da transferência do bloco de carga. A Figura 3.38 descreve o início da reconfiguração dos alimentadores ao estado original, respeitando todas as condições de contorno citadas neste trabalho, inclusive com o uso de equipamentos adicionais, como por exemplo, a seccionadora de extinção de arco elétrico, apresentada na Figura 3.13.

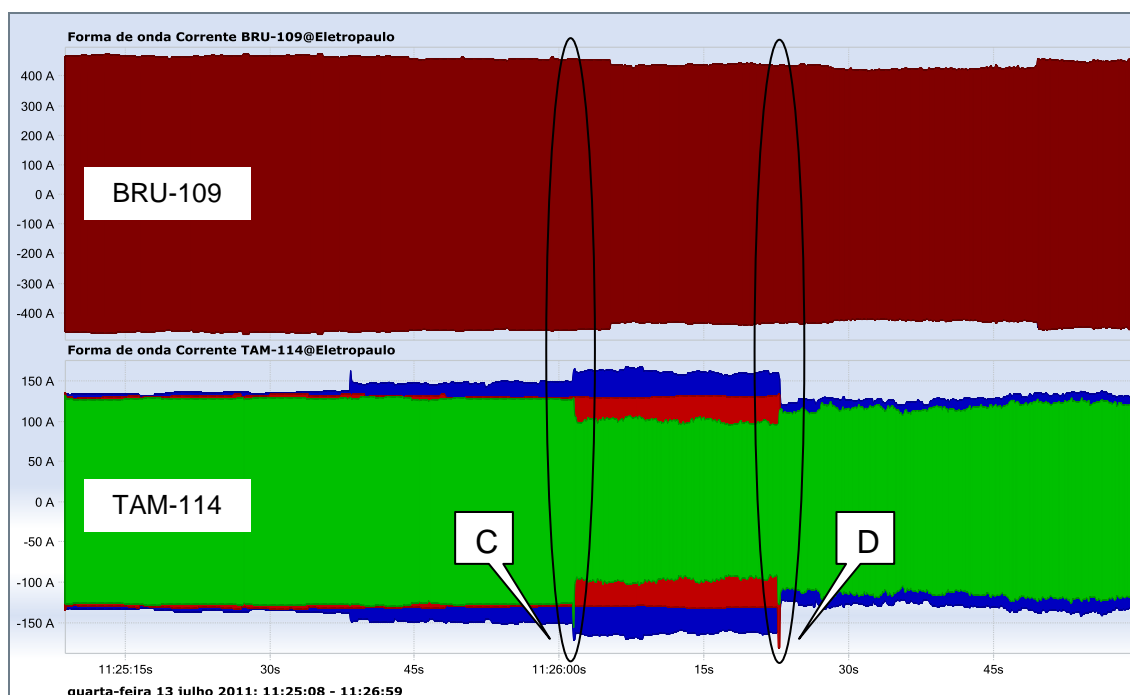


Figura 3.38 – Correntes dos alimentadores no momento do fechamento do anel entre as S/Es.

Ampliando o novo ponto de observação, classificado como ponto “C” na Figura 3.38, fica evidente o momento em que as amplitudes das correntes do alimentador TAM-

114 retornam aos seus estados iniciais, como pode ser verificado na Figura 3.39.

É notável a estabilização imediata das correntes após o fechamento do anel, além do que, os valores assumidos demonstram poucas oscilações em suas amplitudes. As correntes do alimentador BRU-109 não demonstram reações adversas frente à manobra de fechamento em anel, ainda que, nos instantes seguintes, devolvam as cargas transferidas ao alimentador original, neste caso o TAM-114.

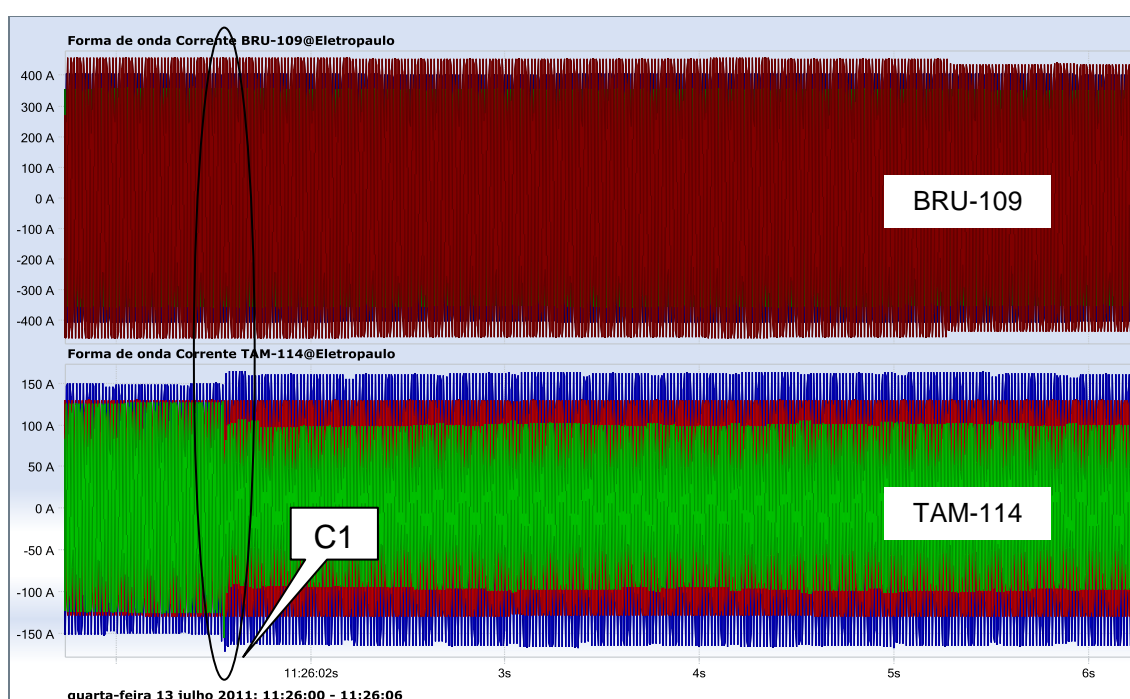


Figura 3.39 – Forma de onda das correntes dos alimentadores BRU-109 e TAM-114, com a ampliação do ponto C.

São perceptíveis as modificações das amplitudes das correntes do alimentador TAM-114, onde as tendências e defasagens angulares são mantidas, eximindo a responsabilidade das manobras de fechamento em anel para esse efeito físico.

Portanto, fixa-se com maior ênfase a confirmação de que as manobras de fechamento em anel não provocam transitórios eletromagnéticos nos alimentadores em direção aos disjuntores das estações transformadoras de distribuição. Contudo,

ainda há a preocupação com os valores médios quadráticos das correntes das fases e do neutro, mas o interesse nesse instante é tão somente com os transitórios resultantes dos chaveamentos das seccionadoras monopolares. A Figura 3.40 descreve detalhadamente o comportamento dos alimentadores envolvidos nas manobras, com foco na ampliação do ponto “C1” da Figura 3.39.

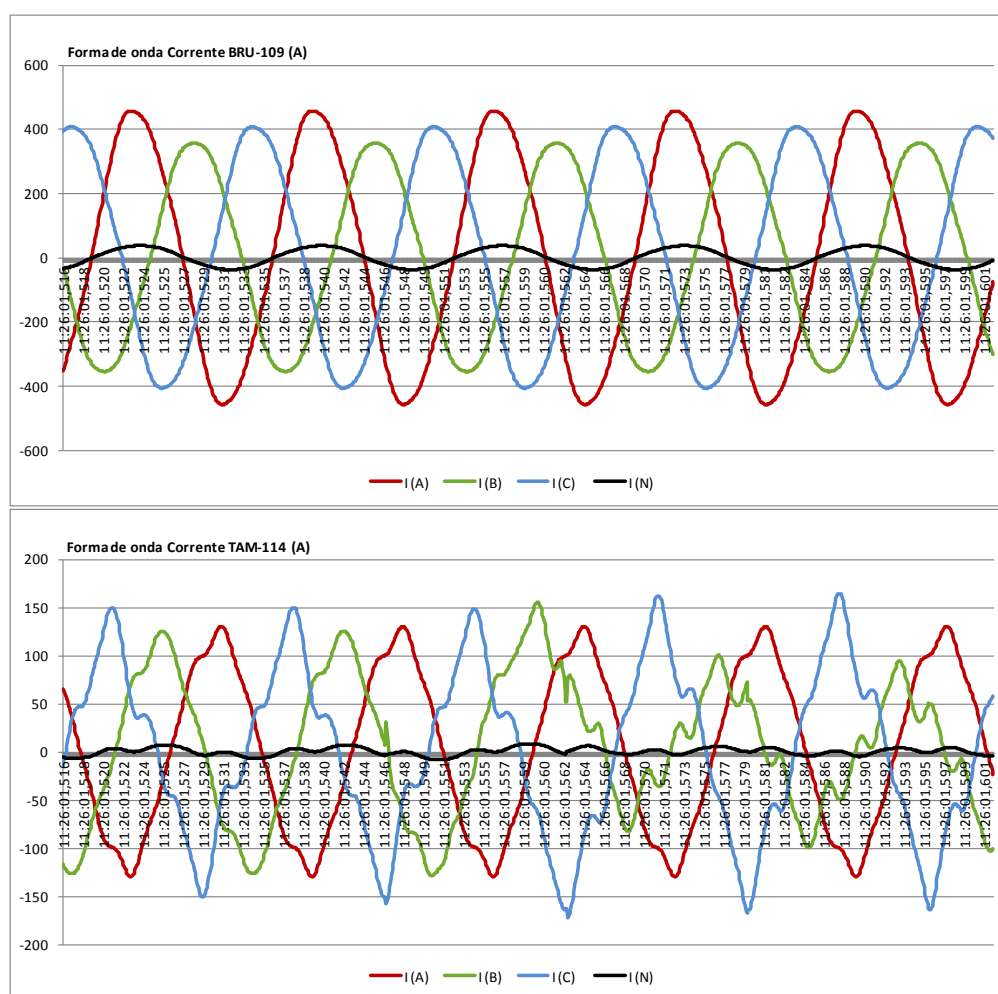


Figura 3.40 – Forma de onda das correntes dos ALs BRU-109 e TAM-114, com a ampliação do ponto C1.

Antes da análise final, que é o momento da abertura do anel através da seccionadora monopolar de vis-à-vis 43286, é necessário tecer alguns comentários sobre o ponto de observação “D”, classificado na Figura 3.38. O transitório, descrito

por esse ponto de observação, encontra-se inserido no momento do fechamento da seccionadora monopolar 40343, onde esse efeito, efetivamente, foi provocado pelo fechamento da segunda fase da seccionadora supracitada.

Porém, o transitório apontado que fora provocado por esta operação não inibe o fechamento em anel das subestações de energia, ou impõe restrições à reconfiguração das redes aéreas primárias manobradas.

A Figura 3.41 descreve o momento do fechamento da segunda fase da seccionadora monopolar 40343. A distorção na forma de onda da fase “B” do alimentador TAM-114 é notável e tem como causa os desequilíbrios provocados por este fechamento, além das influências das cargas conectadas neste alimentador.

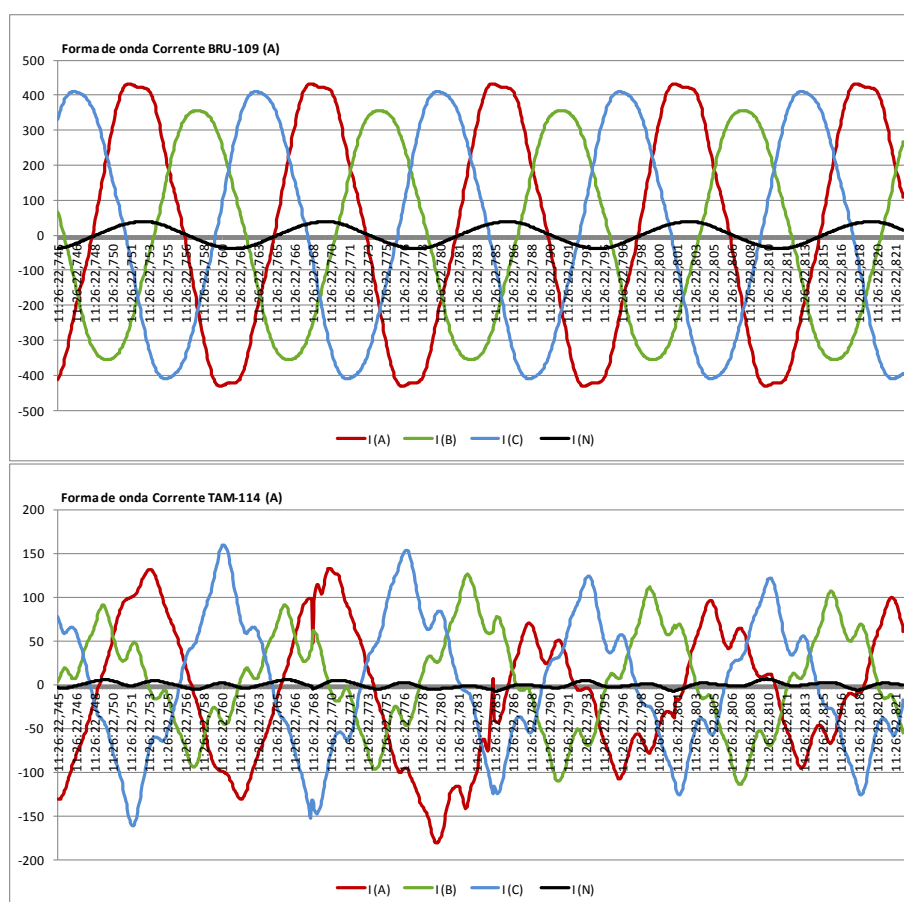


Figura 3.41 – Forma de onda das correntes dos alimentadores com a ampliação do ponto D.

Finalmente, a análise foca o ponto de observação “4” da Figura 3.31. Esse ponto refere-se ao momento de abertura da chave seccionadora monopolar de vis-à-vis 43286. Ao ampliar o ponto de observação “4” é possível constatar, individualmente, o momento que cada elemento da chave é manobrado, conforme apresentado na Figura 3.42.

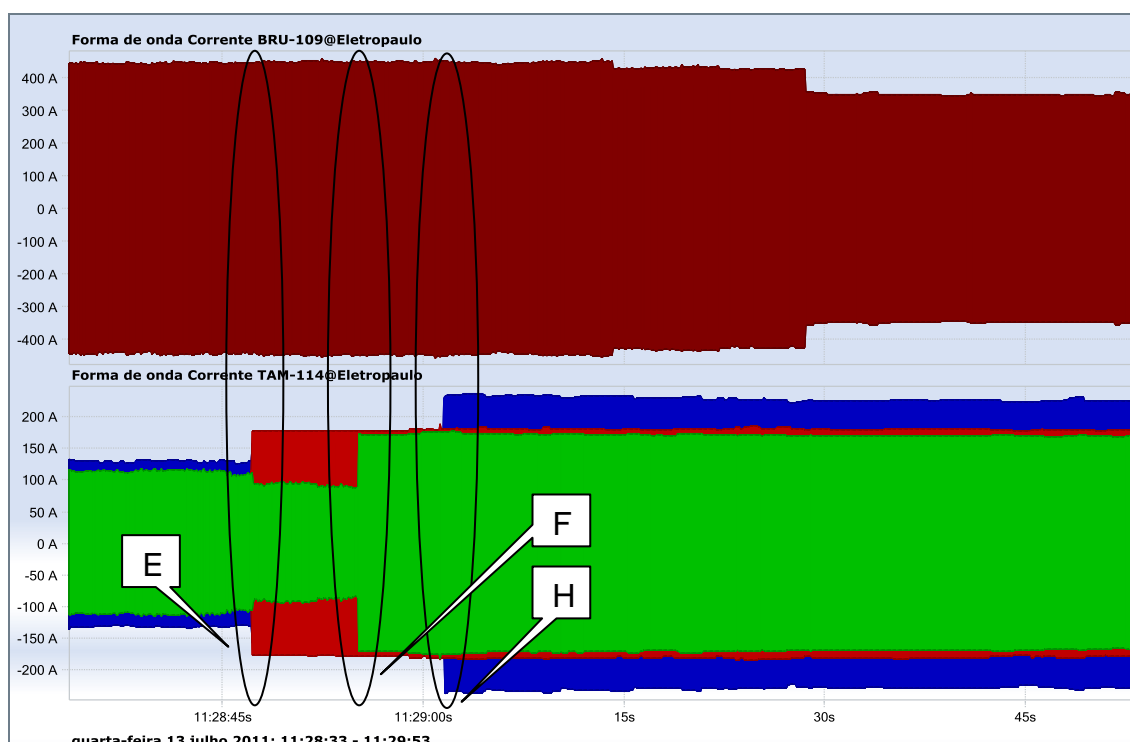
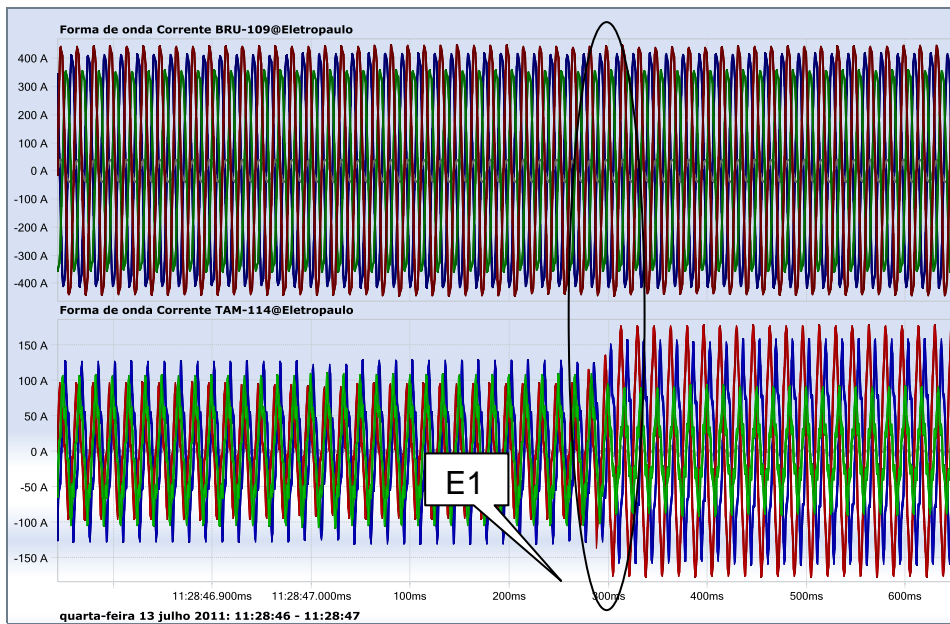
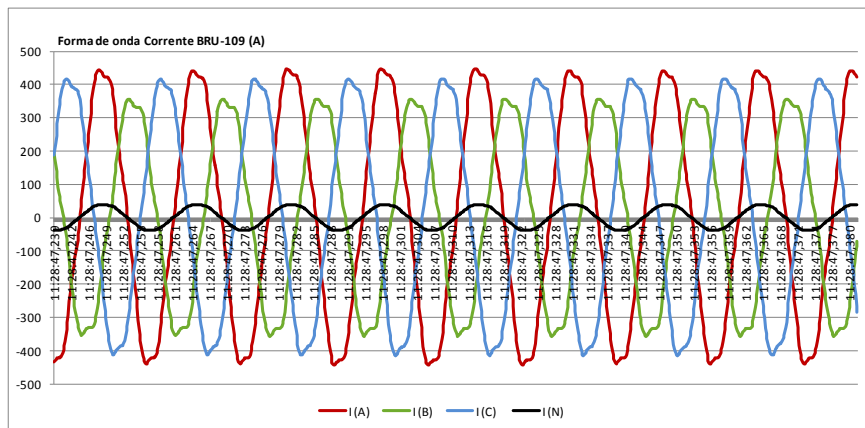


Figura 3.42 – Correntes dos alimentadores no momento da abertura do anel entre as S/Es Anhanguera e Edgard de Souza.

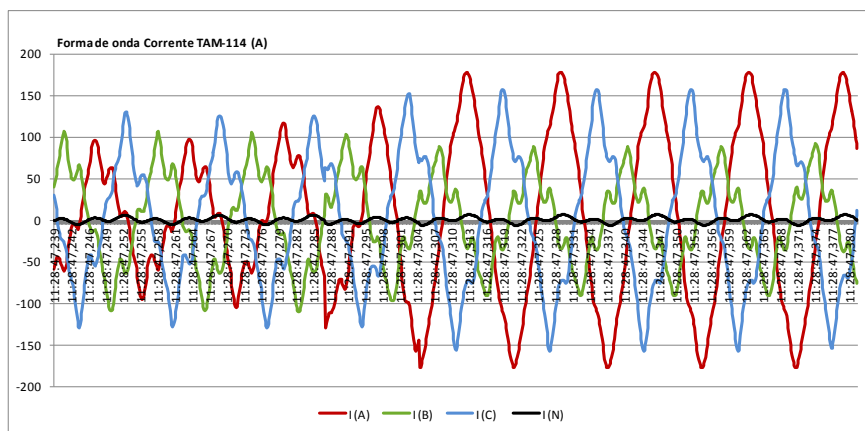
As oscilações são, predominantemente, para o alimentador TAM-114, onde as amplitudes das correntes variam até a estabilização, ao final das manobras de formação do anel entre as S/Es Edgard de Souza e Anhanguera. O alimentador BRU-109 não apresenta oscilações consideráveis no momento da separação do anel entre as S/Es, fato relatado no início desse capítulo. Notam-se, na Figura 3.43, as deformações das correntes, onde a fase “A” (vermelha), a primeira a ser aberta na manobra, reflete imediatamente na forma de onda da fase “C” (azul), do alimentador TAM-114.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.43 – Forma de onda das correntes: a) Ponto E, ampliado para os ALs BRU-109 e TAM-114; b) Ponto E1 para BRU-109, e; c) Ponto E1 para TAM-114.

É visível que a senóide da fase “A” (vermelha) tem um perceptível alisamento em sua composição, consolidado após a abertura dessa fase na seccionadora monopolar 43286.

O alisamento da forma de onda dessa fase, através de uma análise parcial, é provocado pela transferência do trecho do alimentador onde estão cargas não lineares que, por suas características, são as causadoras de harmônicos na rede de distribuição.

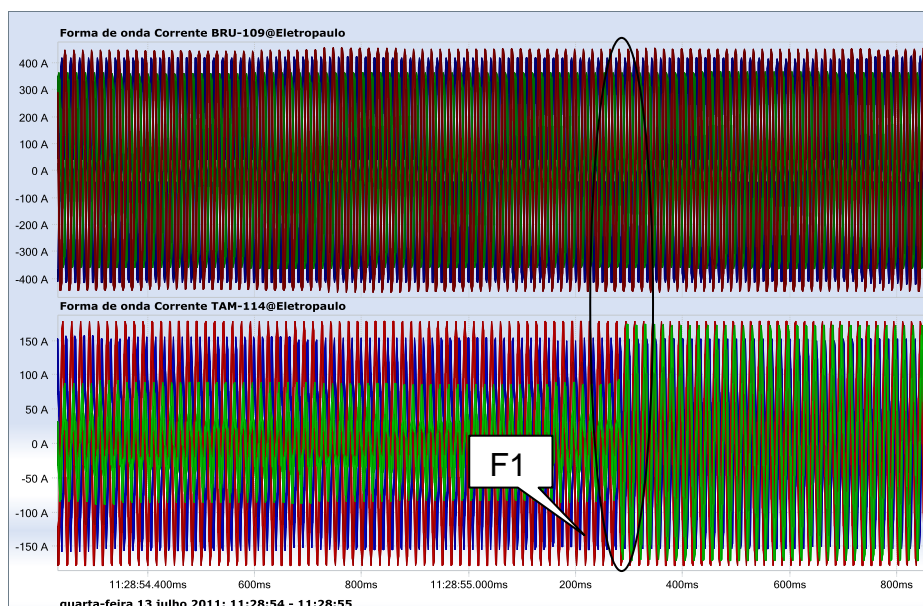
A Figura 3.44 descreve o comportamento da corrente dos alimentadores no momento da abertura da fase “B” (verde).

É possível notar que os efeitos sofridos pela forma de onda, onde provocou sua deformação em função das características das cargas, desta e das demais fases, são praticamente extintos, inclusive com o notável alisamento da forma de onda dessa fase.

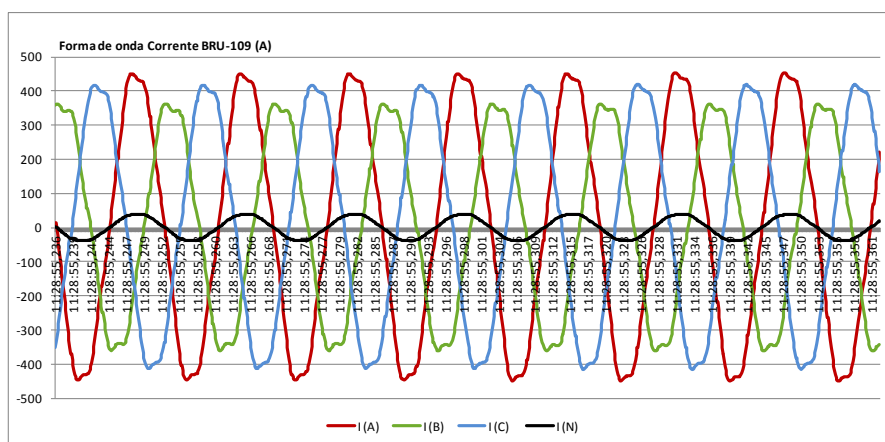
Nesse momento o alimentador TAM-114 assume, praticamente, a condição de equilíbrio de carga entre as fases, além de se manter em condição de suprimento de cargas que não geram harmônicos na rede.

Essa condição de operação, praticamente ideal, poderia não ser atendida, pois esse efeito físico é associado ao tipo de projeto e construção dos alimentadores aéreos de distribuição, onde os mesmos possuem trechos trifásicos de rede, alguns trechos bifásicos e, na maioria dos ramais de derivação do alimentador tronco, trechos monofásicos alimentando os mais variados tipos de cargas.

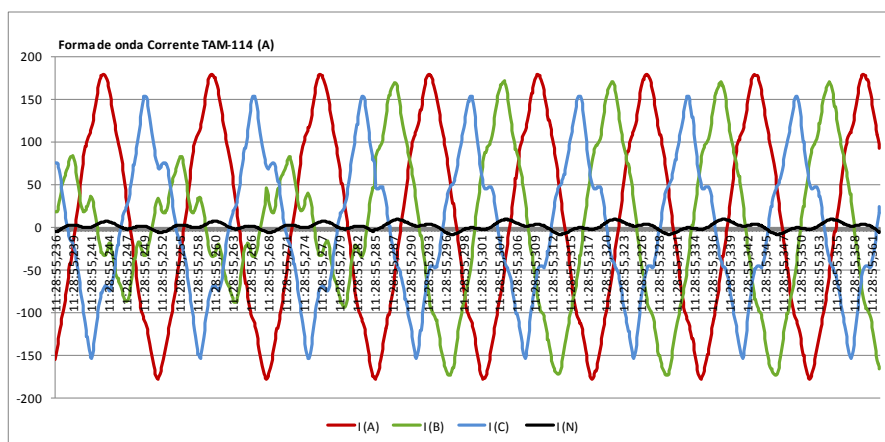
Portanto, quando se transfere um trecho trifásico para outro alimentador, algumas cargas causadoras de ruídos permanecem supridas por trechos com uma ou duas fases, somente.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.44 – Forma de onda das correntes: a) Ponto F, ampliado para os ALs BRU-109 e TAM-114; b) Ponto F1 para o BRU-109, e; c) Ponto F1 para o TAM-114.

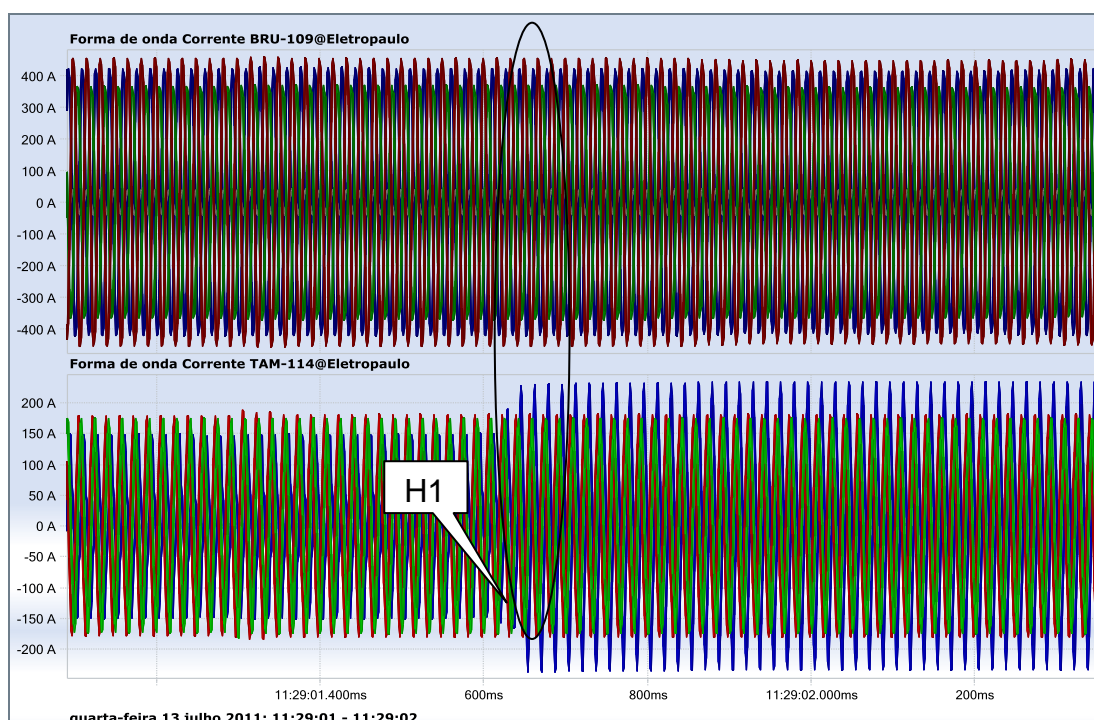
Finalmente, após a abertura da fase “C” (azul) da chave seccionadora de vis-à-vis 43286, desfazendo totalmente o anel entre as subestações de energia, constata-se a normalização das ondas das correntes, retomando os perfis originais em suas formas iniciais no início das manobras.

A Figura 3.45 mostra o comportamento das ondas das correntes pelo reflexo da abertura total da seccionadora monopolar, inclusive, destaca-se com o alisamento da derradeira onda da fase manobrada.

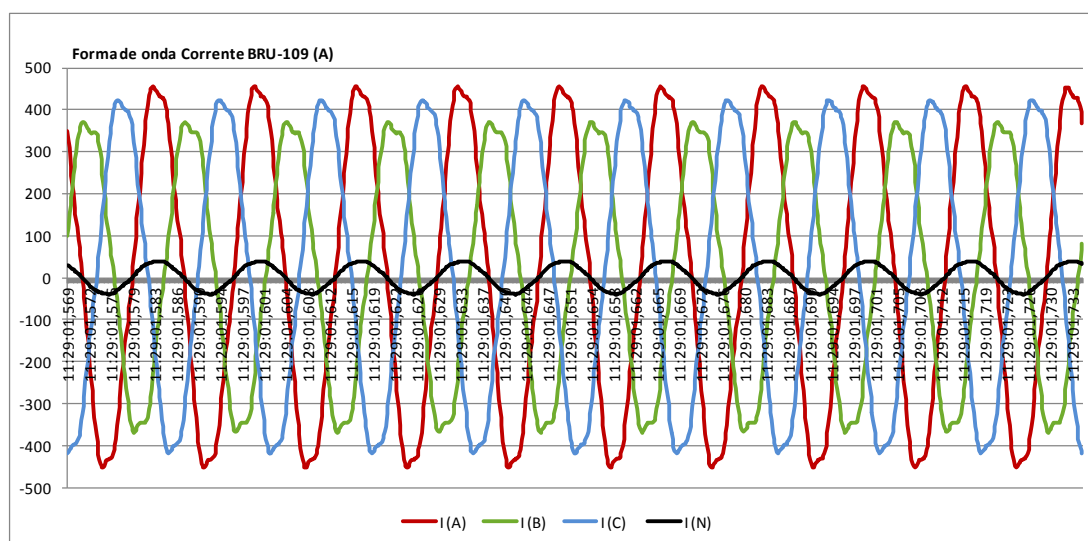
Também é possível notar a defasagem angular entre as três fases após a finalização da abertura da seccionadora de vis-à-vis supracitada.

Nota-se que os alimentadores assumem suas respectivas cargas ao término das manobras para retorno ao estado original da rede.

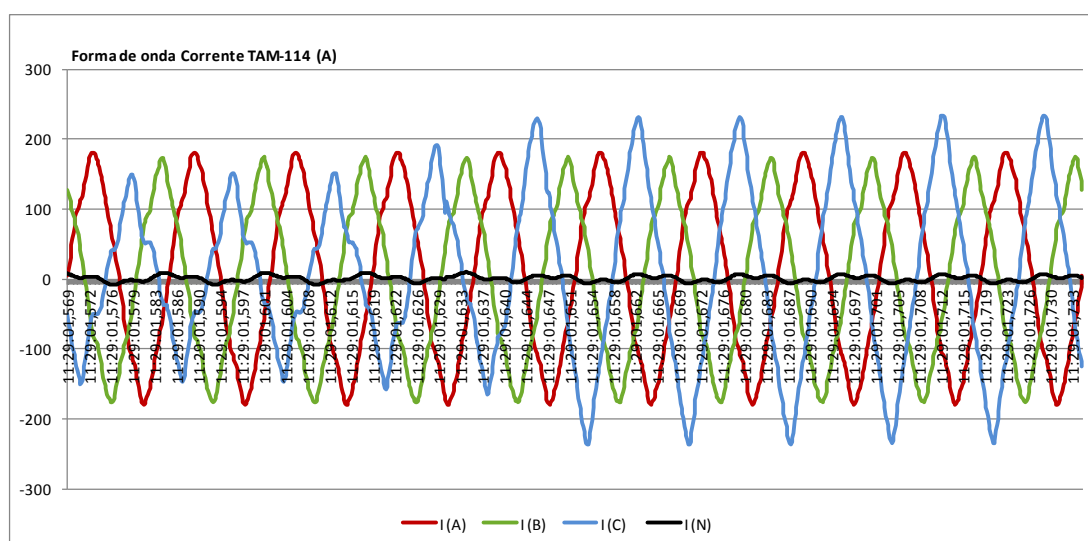
Os chaveamentos das seccionadoras não provocaram picos transitórios de corrente, mesmo com pequenas diferenças nos valores das tensões nos pontos de manobras.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.45 – Forma de onda das correntes: a) Ponto H, ampliado para os ALs BRU-109 e TAM-114: b) Ponto H1 para o BRU-109, e; c) Ponto H1 para o TAM-114.

Contudo, efetivamente, não se constatou nenhum impeditivo à realização das manobras, considerando os transitórios eletromagnéticos, tampouco superação dos limites dos equipamentos, estabelecendo novos conceitos de realização de paralelismos entre equipamentos e componentes do sistema elétrico de potência com a segurança operacional desejada.