

# Estudos de Paralelismo nas Redes de Distribuição Atendidas por Subestações de Diferentes Fontes

D. P. Bernardon, *IEEE*, F. D. Veiga, T. R. Muraro  
AES Sul - Distribuidora Gaúcha de Energia S/A

**Resumo** - Apesar de normalmente os sistemas de distribuição operarem radialmente, eles apresentam possibilidades de alteração da topologia através da abertura ou fechamento dos equipamentos de manobra [1]. Esta alteração pode ocorrer em duas situações. Na primeira, quando se procura otimizar a configuração elétrica das redes, buscando alcançar índices menores de queda de tensão e de perdas, bem como aumento da confiabilidade. Na segunda, quando se tem a necessidade de transferir carga de um alimentador para outro, em decorrência de alguma contingência ou desligamento programado. Em ambas situações, deve-se levar em conta que múltiplas comutações nas redes, devem provocar, durante um curto espaço de tempo, alguns desligamentos em consumidores, especialmente quando os alimentadores são atendidos por subestações de diferentes fontes. Estas interrupções provocam níveis de continuidade de energia indesejáveis aos consumidores, os quais estão mais rigorosos quanto à qualidade do fornecimento de energia elétrica. Esse contexto motivou o presente trabalho, cuja proposta é o desenvolvimento de uma metodologia para análise da viabilidade técnica dos paralelismos nas redes de distribuição, através do uso do programa ATP (Alternative Transient Program), evitando assim o desligamento de consumidores. Como resultado, serão apresentados estudos de casos na área de concessão da AES Sul.

**Palavras Chave** – ATP Draw, Modelagem Elétrica, Paralelismo, Redes de Distribuição.

## I. INTRODUÇÃO

A partir da década de 60, iniciou-se o desenvolvimento do programa EMTP (Eletromagnetic Transient Program) por Herman W. Dommel, para a Bonneville Power Administration (BPA). O programa inicial trabalhava com simulação de circuitos monofásicos através de modelos de indutâncias, capacitâncias e resistências em linhas sem perdas, incluindo uma chave e uma fonte de excitação. Os elementos concentrados utilizavam a regra de integração trapezoidal e as linhas de transmissão, o método Bergeron.

Com o passar dos anos, o programa foi sofrendo alterações de diversos colaboradores do mundo todo. A partir de 1973, Scott Meyer assumiu a coordenação e o desenvolvimento do programa na BPA, estabelecendo um processo de desenvolvimento articulado com os usuários do EMTP, que o tornou uma ferramenta poderosa em estudos de transitórios em sistemas elétricos.

Divergências entre Scott Meyer e o EPRI (Electric Power Research Institute), que investiu no projeto do EMTP a partir de 1984, levaram à criação de uma nova versão do EMTP (baseada na versão M39), a qual foi enviada para a Bélgica, onde foi instalado o Leuven EMTP Center (LEC). Esta nova versão é denominada ATP - Alternative Transient Program, que constitui a continuação das versões anteriores do programa.

As novas atualizações disponibilizadas do programa ATP/EMTP, possuem facilidades gráficas como o pré-processador gráfico e o gráfico PLOTXY, os quais permitem trabalhar utilizando somente o ambiente Windows, a esta versão mais sofisticada chamamos de ATP Draw [2]. O ATP Draw nos permite modelar adequadamente os sistemas elétricos, reproduzindo o mais fiel possível à configuração elétrica real das redes, além de apresentar o unifilar em ambiente gráfico.

A proposta deste trabalho é o desenvolvimento de uma metodologia para análise da viabilidade técnica dos paralelismos nas redes de distribuição atendidas por subestações de diferentes fontes, através do uso do programa ATP Draw, evitando assim o desligamento de consumidores, durante um curto espaço de tempo, para fechamento e/ou abertura de equipamentos de manobra. Os estudos elétricos serão realizados sob os aspectos de carregamento, tensão e proteção, tanto em regime transitório como em permanente. Porém, por questões de segurança operativa, os paralelismos serão executados somente para realização das transferências de carga, retornando a configuração radial, após as manobras.

A vantagem da aplicação desta metodologia está na representação dos sistemas de transmissão e de distribuição numa mesma plataforma e nas análises dos transitórios eletromagnéticos, onde os softwares convencionais não contemplam estes recursos.

---

D. P. Bernardon, Operação do Sistema, AES Sul - Distribuidora Gaúcha de Energia S/A, Rua Presidente Roosevelt, 68, São Leopoldo/RS, CEP: 93010-060, Brasil (e-mail: [daniel.bernardon@aes.com](mailto:daniel.bernardon@aes.com)).

F. Diuner, Operação do Sistema, AES Sul - Distribuidora Gaúcha de Energia S/A, Rua Presidente Roosevelt, 68, São Leopoldo/RS, CEP: 93010-060, Brasil (e-mail: [francisco.diuner@aes.com](mailto:francisco.diuner@aes.com)).

T. R. Muraro, Operação do Sistema, AES Sul - Distribuidora Gaúcha de Energia S/A, Rua Presidente Roosevelt, 68, São Leopoldo/RS, CEP: 93010-060, Brasil (e-mail: [tiago.muraro@aes.com](mailto:tiago.muraro@aes.com)).

## II. MODELAGEM DOS SISTEMAS ELÉTRICOS

A modelagem eficiente e adequada dos elementos de um sistema elétrico é um dos principais fatores no processo de análise dos paralelismos nas redes de distribuição, atendidas por subestações de diferentes fontes. Dependendo da quantidade e qualidade das informações disponíveis nas concessionárias de energia elétrica, pode-se obter um grau maior ou menor de precisão em comparação a uma situação real [3]. Neste tópico são descritas as técnicas utilizadas para a modelagem dos elementos elétricos pertencentes às redes de transmissão e de distribuição, no programa ATP Draw.

### A. Fonte

No ATP Draw as fontes são representadas por geradores trifásicos e simétricos, ou seja, sistema trifásico em que as tensões nos terminais dos geradores são senoidais, de mesmo valor máximo, e defasadas entre si de  $120^\circ$ .

Assim, para sua representação, basta o usuário indicar o valor da amplitude e defasagem angular da fonte. Como valor de impedância interna é inserido o equivalente dos sistemas de transmissão.

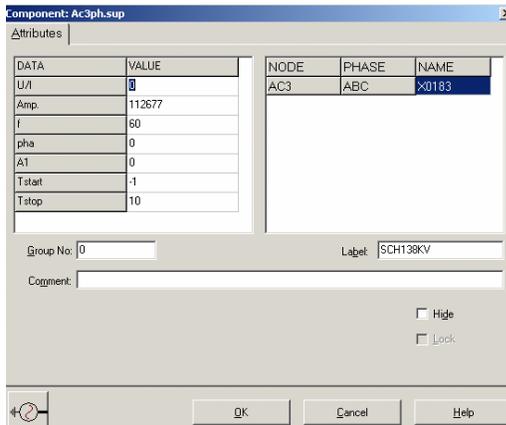


Fig. 1. Representação da Fonte no ATP.

### B. Transformadores de Potência

Para modelar os transformadores de potência, o ATP Draw necessita das impedâncias equivalentes, da relação de transformação e tipo de ligação [4]. A Fig. 2 ilustra a modelagem do transformador no ATP.

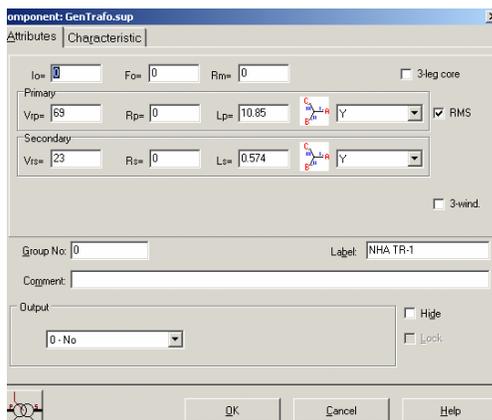


Fig. 2. Representação do Transformador de Potência no ATP.

### C. Redes Elétricas

O transporte de energia elétrica em um sistema de potência é realizado através das redes elétricas, e o seu desempenho depende quase exclusivamente de sua geometria, ou seja, de suas características físicas. Os parâmetros das redes são representados por uma impedância em série, resistência e reatância, e uma admitância em paralelo, capacitância, como segue:

$$Z = r \cdot L + jX_L \cdot L \quad (1)$$

e

$$Y = jB \quad (2)$$

Onde:

$Z$  - impedância do trecho de rede por fase ( $\Omega$ );

$r$  - resistência unitária por fase ( $\Omega / \text{km}$ );

$xL$  - reatância indutiva unitária por fase ( $\Omega / \text{km}$ );

$L$  - comprimento do trecho de rede (km);

$Y$  - admitância em paralelo entre linha e neutro (S);

$B$  = susceptância (S).

As redes de distribuição são classificadas como linhas curtas, sendo razoável desprezar as capacitâncias (admitâncias) para a terra, ficando o modelo apenas com uma impedância em série.

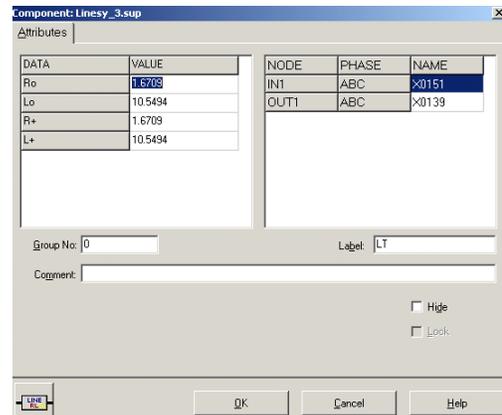


Fig. 3. Representação das Redes Distribuição no ATP.

Já as linhas de transmissão foram classificadas como linhas médias, sendo representadas pelo modelo  $\pi$ .

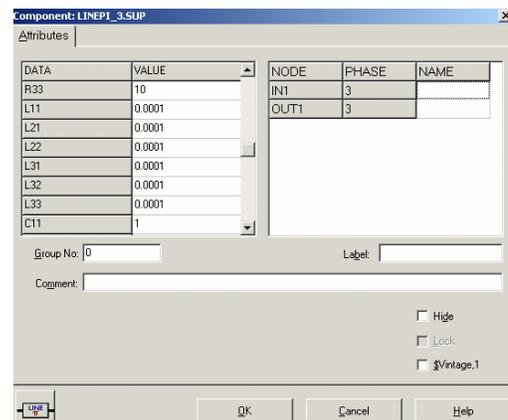


Fig. 4. Representação das Redes Transmissão no ATP.

Para modelagem no ATP Draw é suficiente que as concessionárias tenham o cadastro do comprimento, da quantidade de fases e do tipo de condutor utilizado em cada trecho de rede.

#### D. Equipamentos de Manobra

Estes dispositivos são considerados como chaves que interligam dois pontos da rede, constando à indicação do seu estado, aberto ou fechado. Também é necessário indicar o tempo de abertura e fechamento dos equipamentos.

#### E. Cargas Elétricas

As cargas elétricas podem ser equilibradas ou desequilibradas, sendo representadas por um conjunto de impedâncias complexas  $Z = R + jX$ . A potência absorvida por uma carga depende de sua natureza, e pode variar em função da tensão a ela aplicada.

Existem vários modelos para a representação do comportamento da carga em função da tensão aplicada, dentre os quais destacamos [5]:

- cargas de potência constante com a tensão;
- cargas de impedância constante com a tensão.

Para as cargas de potência constante com a tensão, as potências ativa e reativa permanecem constantes, e iguais aos seus valores nominais, ou seja:

$$S_n = \sqrt{P_n^2 + Q_n^2} \quad (3)$$

Onde:

- $S_n$  - potência aparente nominal;
- $P_n$  - potência ativa nominal;
- $Q_n$  - potência reativa nominal.

Neste caso, a corrente absorvida pela carga, quando alimentada com uma tensão qualquer  $V$ , é obtida por:

$$I = \frac{S_n}{V} \quad (4)$$

Ou seja, a corrente absorvida é inversamente proporcional à tensão aplicada.

Para as cargas de impedância constante com a tensão, a impedância da carga mantém-se constante, e é obtida a partir das potências ativa e reativa absorvidas quando alimentada com tensão nominal. Assim, sendo:

$$S_n = \sqrt{P_n^2 + Q_n^2} \quad (5)$$

Potência absorvida com tensão nominal ( $V_n$ ), resulta para a impedância (constante):

$$Z = \frac{V_n^2}{S_n} \quad (6)$$

Para qualquer valor de tensão  $V$  aplicada à carga, a potência absorvida será dada por:

$$S = \frac{V^2}{Z} = \left(\frac{S_n}{V_n^2}\right) \cdot V^2 = \left(\frac{V}{V_n}\right)^2 \cdot S_n \quad (7)$$

Ou seja, a potência absorvida pela carga varia quadraticamente com a tensão a ela aplicada.

Optou-se em representar as cargas elétricas no ATP Draw como sendo de impedância constante com a tensão. As cargas elétricas são representadas através de componentes RLC. Assim, os bancos de capacitores também são considerados na modelagem das cargas elétricas

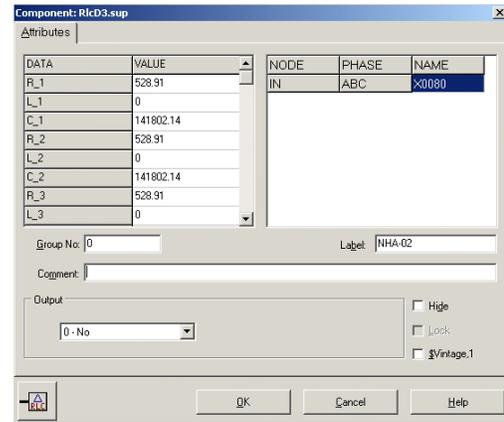


Fig. 5. Representação das Cargas Elétricas noATP.

### III. MODELAGEM DAS CARGAS ELÉTRICAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

Um dos passos iniciais e que pode ser considerado base para o desenvolvimento de métodos e ferramentas eficientes para análise de sistemas de distribuição é a modelagem adequada das cargas elétricas, de forma que suas variações ao longo do tempo possam ser corretamente representadas. Qualquer método de modelagem necessita trabalhar, da melhor maneira possível, com a carência de informações disponíveis, característica inerente às particularidades dos sistemas de distribuição, normalmente constituídos por uma grande quantidade de trechos de rede com várias ramificações, cobrindo extensas áreas geográficas, com a presença de equipamentos de medição somente para registro do consumo de energia dos consumidores. Porém, a utilização direta desse tipo de informação não é possível, pois uma correta modelagem das cargas nos sistemas de distribuição requer a determinação de valores de demanda em períodos bem menores do que um mês. A representação das cargas elétricas através de curvas diárias de demandas horárias (curvas típicas de carga), normalizadas em função da demanda ativa máxima, normalmente gera resultados satisfatórios e foi utilizada neste trabalho.

A grande diversidade de tipos de carga (consumidores) encontradas nos sistemas de distribuição e a necessidade de realização de um enorme volume de medições, dificultam a utilização de curvas de carga com apenas um valor (determinístico) para a representação da demanda no intervalo de uma hora. Por isso, foram desenvolvidos e propostos novos métodos para o tratamento dos dados utilizados para a construção das curvas típicas de carga. Essa proposta apresenta vantagens em relação aos métodos estatísticos tradicionais, tanto pela redução da influência de valores aleatórios quanto pela quantidade menor de medidas necessárias para formar uma amostra representativa dos tipos de carga. No lugar da utilização da simples média para a

determinação dos valores de potência ativa e reativa para uma ordenada da curva típica de carga, é proposto o uso da seguinte equação [6,7]:

$$X_t = \frac{1}{5} \cdot [2M\{X_t\} + 2Me\{X_t\} + Mo\{X_t\}] \quad (8)$$

Onde:

$X_t$  é o valor de potência ativa ( $P_t$ ) ou reativa ( $Q_t$ ) para a hora  $t$  da curva típica de carga;

$M\{X_t\}$  - média da amostra;

$Me\{X_t\}$  - mediana da amostra;

$Mo\{X_t\}$  - moda da amostra de valores.

De acordo com os dados de consumo mensal de energia elétrica e atividade econômica desenvolvida, cada consumidor é associado a uma curva de carga típica, permitindo assim, também a definição do seu fator de carga ( $f_c$ ). Com base nos valores de fator de carga e de consumo mensal de energia elétrica ( $W$ ), calcula-se a demanda máxima para um grupo de consumidores  $k$ :

$$P_{Máx_k} = \frac{W_k}{T \cdot f_{ck}} \quad (9)$$

Como as curvas típicas utilizadas são normalizadas em relação à demanda ativa máxima, a construção da curva de carga para um grupo de consumidores  $k$  é realizada através da multiplicação de cada ordenada por esse valor:

$$\begin{aligned} P_{kUt} &= P_{Máx_k} \cdot P_{kUt}^* ; \\ P_{kSt} &= P_{Máx_k} \cdot P_{kSt}^* ; \\ P_{kDt} &= P_{Máx_k} \cdot P_{kDt}^* \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} Q_{kUt} &= P_{Máx_k} \cdot Q_{kUt}^* ; \\ Q_{kSt} &= P_{Máx_k} \cdot Q_{kSt}^* ; \\ Q_{kDt} &= P_{Máx_k} \cdot Q_{kDt}^* \end{aligned} \quad (11)$$

Onde:

$P_{kt}^*$  e  $Q_{kt}^*$  - valores de potência, ativa e reativa, normalizados para a ordenada  $t$  da curva típica  $k$ ;

$U$  - Dias Úteis;

$S$  - Sábados;

$D$  - Domingos ou Feriados.

A construção das curvas de carga integrais para dias úteis, sábados e domingos para o transformador de distribuição  $j$  é realizada através da soma das curvas de carga dos diversos grupos de consumidores  $i$  a ele conectado:

$$P_{jUt} = \sum_{i=1}^{N_k} P_{iUt} ; P_{jSt} = \sum_{i=1}^{N_k} P_{iSt} \text{ e } P_{jDt} = \sum_{i=1}^{N_k} P_{iDt} \quad (12)$$

$$Q_{jUt} = \sum_{i=1}^{N_k} Q_{iUt} ; Q_{jSt} = \sum_{i=1}^{N_k} Q_{iSt} \text{ e } Q_{jDt} = \sum_{i=1}^{N_k} Q_{iDt} \quad (13)$$

Assim, tem-se a possibilidade de analisar vários patamares de carga no ATP Draw, de acordo com a necessidade da concessionária.

#### IV. ESTUDO DE CASO DE PARALELISMOS NAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO ATENDIDAS POR SUBESTAÇÕES DE DIFERENTES FONTES

Como estudo de caso, serão consideradas as análises realizadas para atender a solicitação de desligamento programado na subestação Novo Hamburgo (69/23kV – 42MVA), pertencente a AES Sul, num domingo das 08:00h às 17:00h.

O objetivo principal é transferir toda a sua carga para outras subestações, através do fechamento e abertura de chaves nas redes de distribuição, sem ocasionar nenhuma interrupção de curta duração nos consumidores, 20.311 clientes ligados a esta subestação (SE). Para isto, é necessário verificar a viabilidade técnica das manobras, que serão realizadas em anel, resultando no paralelismo das redes de distribuição atendidas por subestações de diferentes fontes.

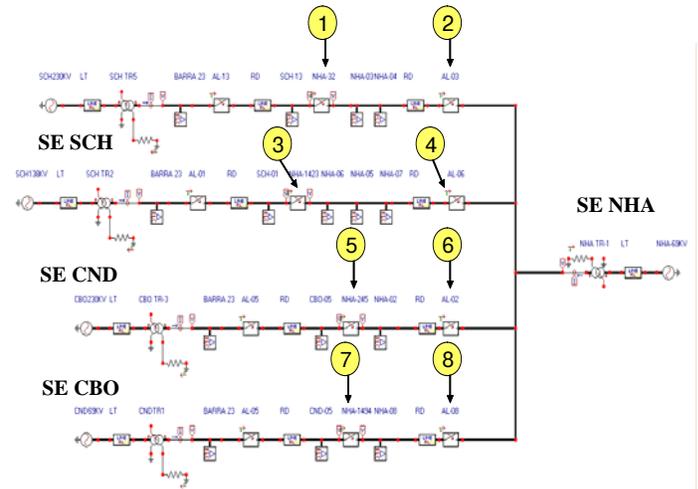


Fig. 6. Representação do Estudo de Caso no Programa ATP Draw.

##### A. Seqüência de Manobras

A subestação Novo Hamburgo (SE NHA) possui oito módulos de alimentadores (AL's), sendo que um deles é utilizado como transferência (AL 01 SE NHA). Para os remanejamento de carga, primeiramente avaliou-se os carregamentos das subestações envolvidas, em regime permanente, para o período de maior carregamento (11h). Assim, definiu-se a ordem de transferência a ser executada, visando equilibrar os carregamentos durante o paralelismo.

Segue a seqüência de manobras:

1 - Colocar o AL 04 SE NHA junto com o AL 03 SE NHA, através de manobras em anel na rede de distribuição, para posteriormente fechar o paralelismo entre as subestações Novo Hamburgo, 69/23kV, e Scharlau (SE SCH), 230/23kV, através do AL 13 SE SCH.

2 - Colocar os AL's 05, 06 e 07 da SE NHA no barramento de transferência da SE NHA, para possibilitar o paralelismo dos mesmos, através da rede do AL 06 SE NHA com o AL 01 SE SCH, o qual é atendido pela SE SCH, porém pelo transformador 138/23kV.

3 - Transferir o AL 02 SE NHA para o AL 05 da subestação Campo Bom (SE CBO), 230/23KV, através do paralelismo.

4 - Transferir o AL 08 SE NHA para o AL 05 da subestação Canudos (SE CND), 69/23KV, através do paralelismo.

Assim, caso o estudo elétrico seja viável, todos os alimentadores da subestação Novo Hamburgo serão transferidos, via redes de distribuição, para as Subestações Scharlau, Campo Bom e Canudos, sem ocasionar nenhuma interrupção de curta duração nos consumidores.

A Tabela 1 ilustra a seqüência de manobras de acordo com a Fig. 6.

TABELA 1 – SEQÜÊNCIA DE MANOBRAS

Switching Sequence	Transferences			
	Equipment	Action	From (substation)	To (substation)
1	NHA - 32 (switch)	Close	NHA (69/23 kV)	SCH (230/23 kV)
2	AL 03 (feeder)	Open		
3	NHA - 1423 (switch)	Close		SCH (138/23 kV)
4	AL 06 (feeder)	Open		
5	NHA - 245 (switch)	Close		CBO (230/23 kV)
6	AL 02 (feeder)	Open		
7	NHA - 1494 (switch)	Close		CND (69/23 kV)
8	AL 08 (feeder)	Open		

### B. Tempos de Fechamento e Abertura dos equipamentos de Manobra

O ATP DRAW nos permite analisar todas as etapas da manobra numa única simulação, sendo necessário apenas indicar os tempos de fechamento e abertura dos equipamentos. Neste trabalho, adotou-se o intervalo de tempo de 1s entre os passos da manobra. Também se indicou tempos diferentes entre as fases, para as chaves monopolares, possibilitando verificar as correntes que circulam no neutro, no instante de fechamento ou abertura do paralelismo.

### C. Análise dos Comportamentos Transitórios durante o Paralelismo

Após modelagem e aplicação do ATP Draw, avaliou-se os seus resultados (correntes e tensão), em três pontos principais: chaves de interligação, saída dos alimentadores e nos transformadores de potência. O objetivo é verificar o carregamento dos equipamentos envolvidos, afundamentos e sobretensões, valores ajustados nos dispositivos de proteção. Se o estudo não apresentar estas restrições, ele é considerado viável tecnicamente, pois não acarretará sobrecarga e nem distúrbios de tensão ao sistema, além da garantia que não haverá desarme por proteção.

Na Fig. 7 estão representados o comportamento das correntes no instante de fechamento da chave de interligação NHA – 32, paralelismo das redes de distribuição entre as subestações NHA (69/23kV) e SCH (230/23kV). Também está ilustrado o momento de abertura do paralelismo, através do desligamento do disjuntor do AL 03 SE NHA.

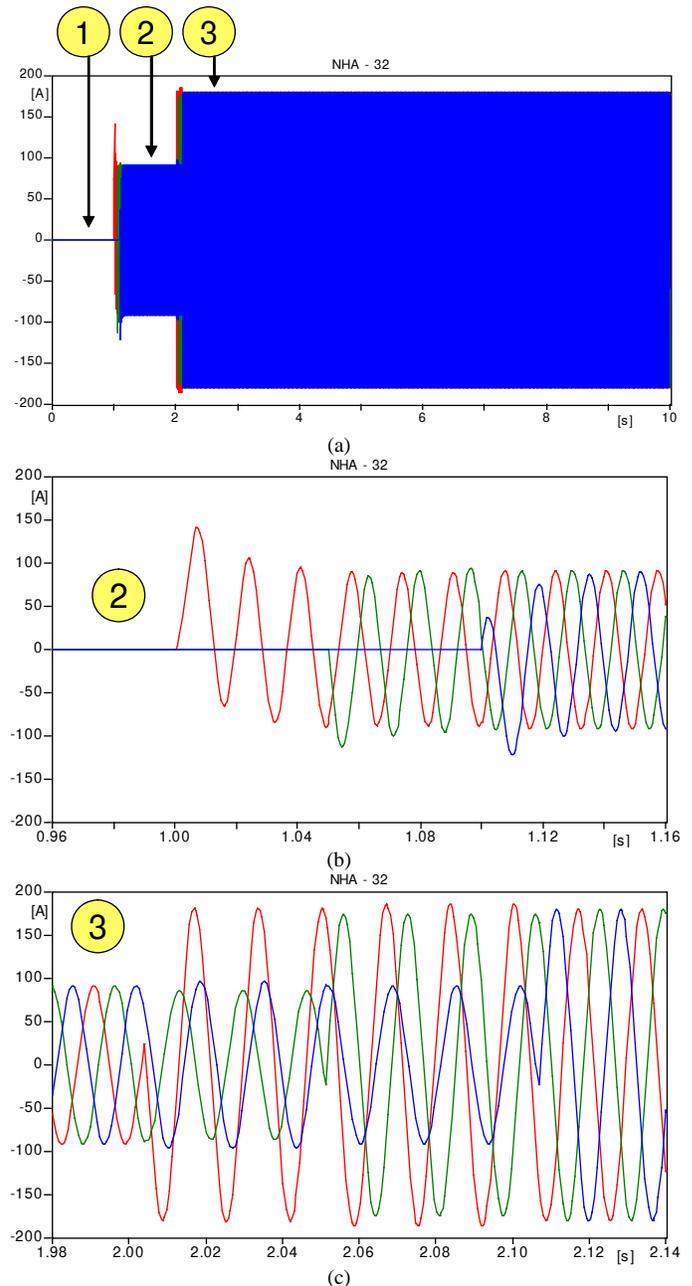


Fig. 7. (a) Comportamento das Correntes na Chave NHA – 32 (b) Momento do Fechamento do Paralelismo (c) Momento da Abertura do Paralelismo.

Assim, com a realização destes passos da manobra, o sistema de transmissão também sofre alterações, seja de aumento ou perda de carga, durante o paralelismo, conforme demonstra a Fig. 8.

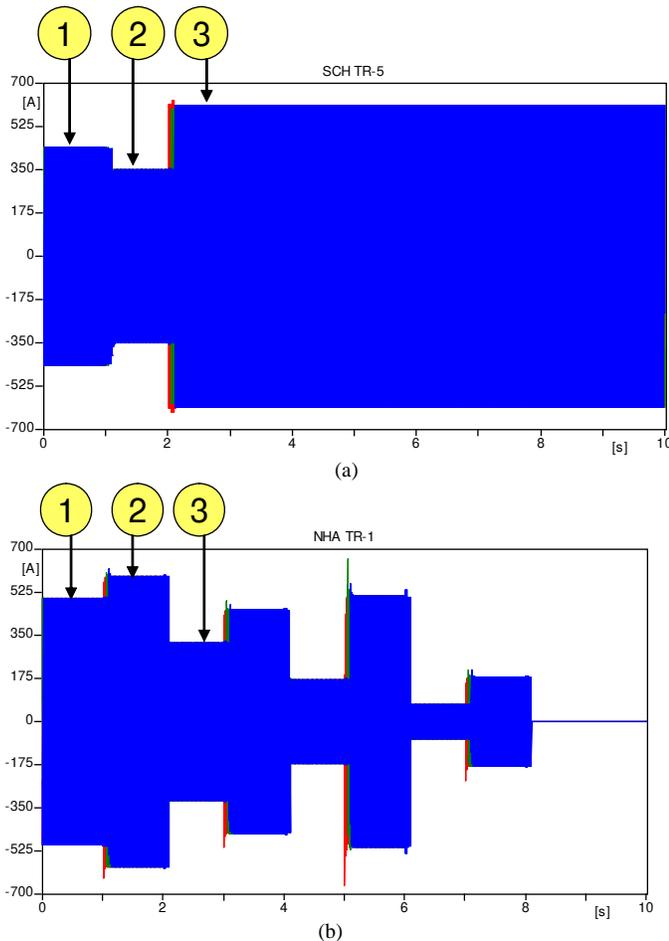


Fig. 8. Comportamento das Correntes nas Subestações, 1 – Antes do Paralelismo, 2 – Momento do Fechamento do Paralelismo, 3 – Momento da Abertura do Paralelismo (a) SE Novo Hamburgo (b) SE Scharlau.

Como os resultados não apresentaram restrição, considerou-se o estudo viável tecnicamente. Ressalta-se que este desligamento foi realizado em campo, onde na oportunidade realizou-se a seqüência de manobra apresentada, sem ocasionar nenhuma interrupção de curta duração nos consumidores. Também se compararam os resultados da simulação com os de campo, apresentando-se satisfatórios.

A Tab. 2 compara os resultados do ATP com as medições verificadas em campo.

TABELA 2 – RESULTADOS PRÁTICOS

BEFORE SWITCHING			AFTER SWITCHING		
EQUIPMENT	ATP	MEASURES	EQUIPMENT	ATP	MEASURES
NHA-02	77A	76A	NHA-02	-	-
NHA-03	38A	38A	NHA-03	-	-
NHA-04	105A	105A	NHA-04	-	-
NHA-05	24A	25A	NHA-05	-	-
NHA-06	44A	45A	NHA-06	-	-
NHA-07	45A	45A	NHA-07	-	-
NHA-08	49A	50A	NHA-08	-	-
SCH-01	61A	62A	SCH-01	172A	166A
SCH-13	87A	86A	SCH-13	230A	227A
CBO-05	48A	48A	CBO-05	124A	119A
CND-05	81A	80A	CND-05	130A	124A
NHA-TR1	15,2MVA	15,3MVA	NHA-TR1	-	-
SCH-TR2	15,9MVA	16,0MVA	SCH-TR2	20,1MVA	19,4MVA
SCH-TR5	12,5MVA	12,4MVA	SCH-TR5	18,5MVA	18,1MVA
CBO-TR3	21,8MVA	21,9MVA	CBO-TR3	24,8MVA	24,1MVA
CND-TR1	11,7MVA	11,6MVA	CND-TR1	13,7MVA	13,3MVA

## V. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O objetivo principal do trabalho consistiu em desenvolver uma metodologia para análise da viabilidade técnica dos paralelismos nas redes de distribuição atendidas por subestações de diferentes fontes, através do uso do programa ATP (Alternative Transient Program), resultando em uma aplicação confiável para as concessionárias de energia elétrica, além de melhorar a qualidade dos serviços prestados aos clientes. Para uma avaliação real da metodologia, realizaram-se estudos de casos com dados reais da AES Sul. Como os resultados demonstrados e discutidos, apresentaram-se satisfatórios, o objetivo do trabalho foi alcançado.

## VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D. P. Bernardon, "Emprego de novas Metodologias e Algoritmos mais eficientes para Modelagem das Cargas Elétricas e Estimção de Estados em Sistemas de Distribuição", XVI SENDI – Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, Brasília / DF, novembro/2004.
- [2] J. F. Amon, M. P. Pereira, "Novos Desenvolvimentos dos Programas ATP/EMTP e APTDraw", XVI SNTPEE, Campinas / SP, outubro/2001.
- [3] J. A. Cipoli, "Engenharia de Distribuição", Rio de Janeiro, Ed. Qualitymark, 1993.
- [4] I. L. Kosow, "Máquinas elétricas e transformadores", 14.ed. São Paulo: Globo, 2000.
- [5] E. J. Robba, et. al. "Introdução a sistemas elétricos de potência: componentes simétricas", São Paulo: Forense, 1972. 344p.
- [6] A. L. König, D. P. Bernardon, L. N. Canha e V. A. Popov, "Modelagem das Curvas de Carga dos Consumidores de um Sistema de Distribuição", CPFL Evolução – 1º Seminário Técnico, Campinas / SP, 2002.
- [7] V.A. Popov, P. Ekel, S. Ansuji, "Node Load Modelling and Distribution System State Estimation using the Heuristic Approach", Proceedings of the International Symposium on Electrical Power Engineering, Stockholm Power Tech, p.294-299, jun. 1995.