



**XX SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0  
GOP/IX  
22 a 25 Novembro de 2009  
Recife - PE

**GRUPO - IX**

**GRUPO DE ESTUDO DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GOP**

**ANÁLISE DO IMPACTO DE DESLIGAMENTOS PROGRAMADOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA ENVOLVENDO MANOBRAS EM ANEL**

**Daniel Pinheiro Bernardon\***  
**UNIPAMPA**

**Adriana S. Q. Ferreira**  
**UNIPAMPA**

**Vinicius J. Garcia**  
**UNIPAMPA**

**Eric F. B. Daza**  
**AES SUL**

**RESUMO**

A proposta deste trabalho é o desenvolvimento de uma metodologia para análise da viabilidade técnica para desligamentos programados que envolvam manobras em anel nas redes de distribuição atendidas por subestações de diferentes fontes, através do uso do programa ATP Draw (Alternative Transient Program). O objetivo destas análises é evitar o desligamento de consumidores, durante um curto espaço de tempo, para fechamento e/ou abertura de equipamentos de manobra. Os estudos elétricos são realizados considerando aspectos de carregamento, tensão e proteção, em regime permanente e transitório. Como estudo de caso é analisado a solicitação de um desligamento programado de uma subestação da AES Sul.

**PALAVRAS-CHAVE**

ATP Draw, Modelagem Elétrica, Paralelismo, Redes de Distribuição

**1.0 - 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, 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 [1]. 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 considerando 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 [2].

## 2.0 - 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.

### 2.1 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  $120^\circ$  elétricos. Assim, para representação o usuário indica o valor da amplitude e defasagem angular da fonte, conforme Figura 1. Como valor de impedância interna é inserido o equivalente dos sistemas de transmissão.

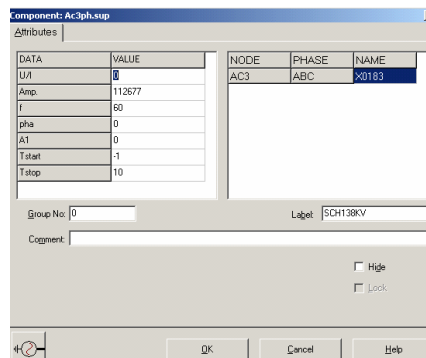


Figura 1 - Representação da Fonte no ATP.

### 2.2 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 Figura 2 ilustra a modelagem do transformador no ATP.

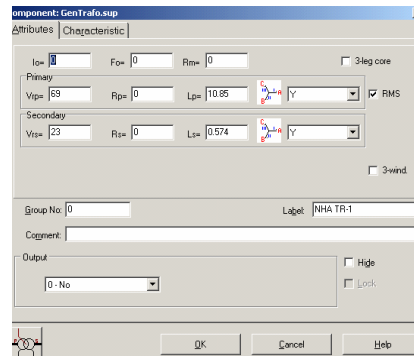


Figura 2 - Representação do Transformador de Potência no ATP.

### 2.3 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. De forma aproximada, 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 (ohm);

r - resistência unitária por fase (ohm/km);

$x_L$  - reatância indutiva unitária por fase (ohm/km);

L - comprimento do trecho de rede (km);

Y - admitância shunt (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 (Figura 3).

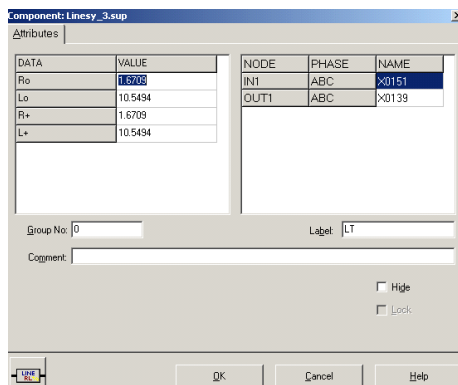


Figura 3 - Representação das Redes Distribuição no ATP.

Já as linhas de transmissão foram classificadas como linhas médias, sendo representadas pelo modelo  $\pi$ , conforme Figura 4.

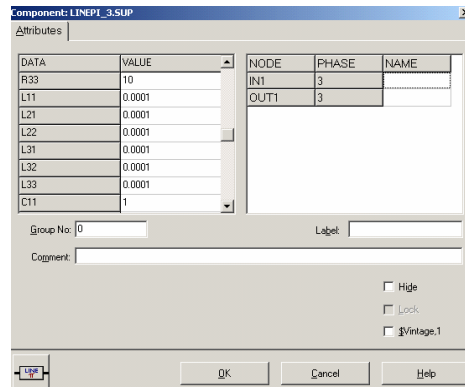


Figura 4 - Representação das Redes Transmissão no ATP.

Para modelagem das redes elétricas no ATP Draw, as concessionárias utilizam as seguintes informações: comprimento dos trechos de rede, quantidade de fases, tipo de condutor e dados unitários dos condutores (impedâncias e admitâncias para sequências positiva e zero).

#### 2.4 Equipamentos de Manobra

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

#### 2.5 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: cargas de potência constante com a tensão e cargas de impedância constante com a tensão [5].

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

$$Z = \frac{V_n^2}{S_n} \quad (5)$$

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

$$S = \frac{V^2}{Z} = \left( \frac{S_n}{V_n^2} \right) \cdot V^2 = \left( \frac{V}{V_n} \right)^2 \cdot S_n \quad (6)$$

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 (Figura 5). Assim, os bancos de capacitores também são considerados na modelagem das cargas elétricas.

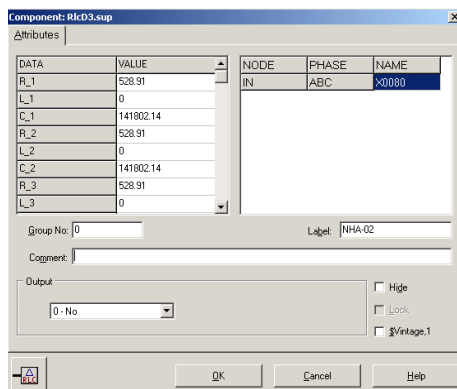


Figura 5 - Representação das Cargas Elétricas no ATP.

### 3.0 - 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, em um domingo no período 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.

#### 3.1 Sequência 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, que ocorre às 11h. Assim, definiu-se a ordem de transferência a ser executada, visando equilibrar os carregamentos durante o paralelismo.

Segue a seqüência de manobras:

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

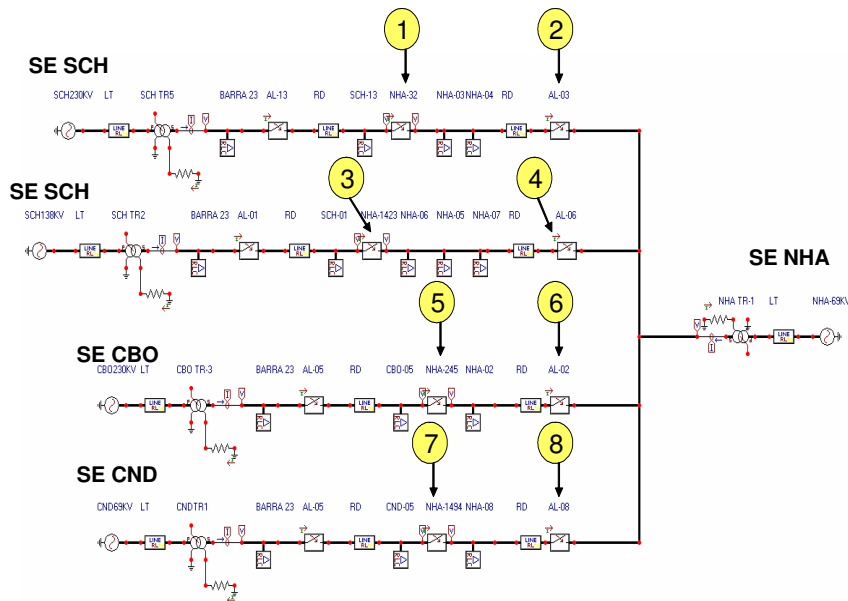


Figura 6 - Representação do Estudo de Caso no Programa ATP Draw.

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

Tabela 1 – SEQÜÊNCIA DE MANOBRAS

Swiching 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		

### 3.2 Tempos de Fechamento e Abertura dos equipamentos de Manobra

O ATP DRAW nos permite analisar todas as etapas da manobra em uma 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 foram indicados 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.

### 3.3 Análise dos Comportamentos Transitórios durante o Paralelismo

Após modelagem e aplicação do ATP Draw, avaliou-se os 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, e verificar se os dispositivos de proteção não irão atuar. Se o estudo não violar estas restrições, as transferências são consideradas viáveis tecnicamente, pois não acarretará sobrecarga e nem distúrbios de tensão ao sistema, além da garantia que não haverá desarme pela proteção dos sistemas [6].

Na Figura 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.

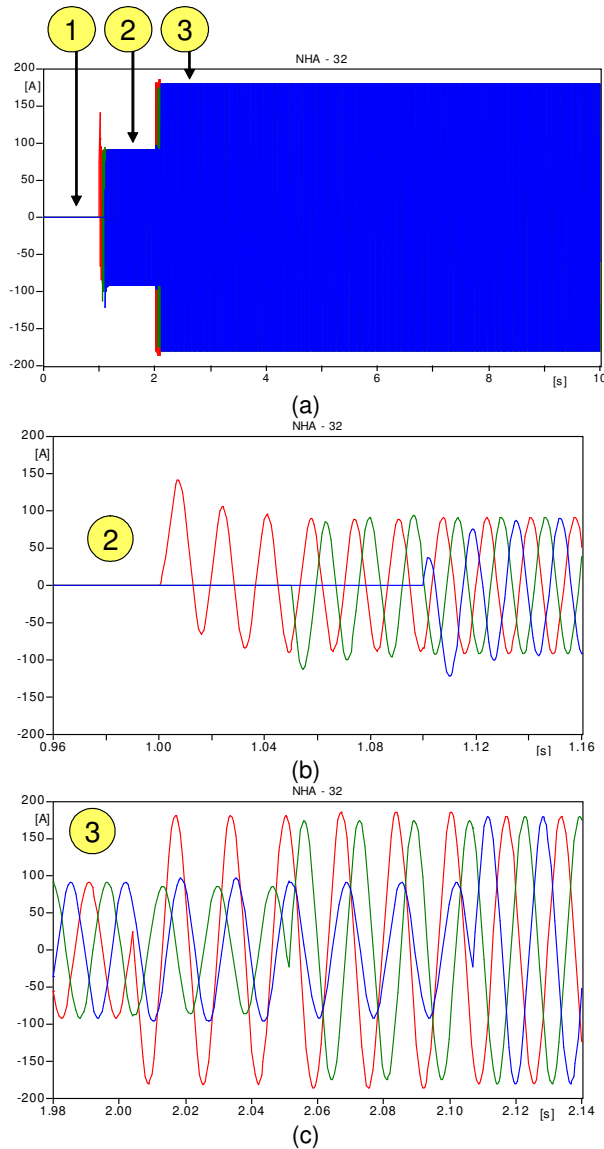
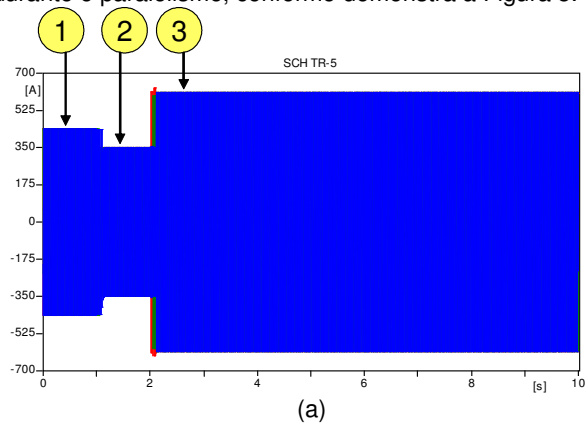


Figura 7 - (a) Comportamento das Correntes na Chave NHA – 32 (b) Momento do Fechamento do Paralelismo (c) Momento da Abertura do Paralelismo.

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 Figura 8.



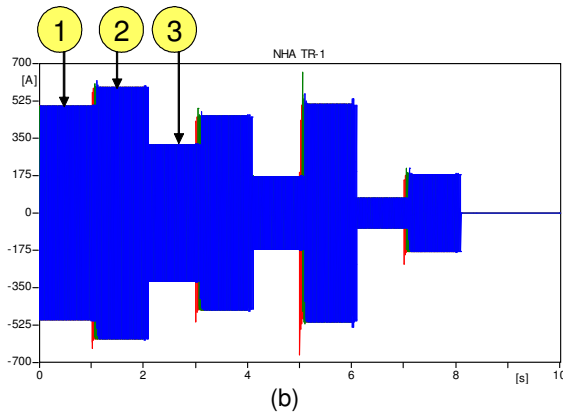


Figura 8 - Comportamento das Correntes nas Subestações, 1 – Antes do Paralelismo, 2 – Momento do Fechamento do Paralelismo, 3 – Momento da Abertura do Paralelismo (a) SE Novo Hamburgo (b) SE Scharlau.

Como os resultados não violaram as restrições, 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 comparou-se os resultados da simulação com os de campo, apresentando-se satisfatórios. A Tabela 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

#### 4.0 - CONCLUSÃO

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, realizou-se um estudo de caso com dados reais da AES Sul. Como o resultado discutido apresentou-se satisfatório, o objetivo do trabalho foi alcançado.



## 5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) J. F. Amon, M. P. Pereira, "Novos Desenvolvimentos dos Programas ATP/EMTP e APTDraw", XVI SNTPEE, Campinas / SP, outubro/2001.
- (2) D. P. Bernardon, L. Comassetto, L. N. Canha, "Studies of Parallelism in Distribution Networks Served by Different-Source Substations", Electric Power Systems Research, v. 78, pp. 450-457, 2008.
- (3) J. A. Cipoli, "Engenharia de Distribuição", Rio de Janeiro, Ed. Qualitymark, 1993.
- (4) D. P. Bernardon, L. Comassetto, L. N. Canha, "Perdas Técnicas e Comerciais de Energia Elétrica em Sistemas de Distribuição", VII CBQEE - Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, Santos, 2007.
- (5) E. J. Robba, et. al. "Introdução a sistemas elétricos de potência: componentes simétricas", São Paulo: Forense, 1972. 344p.
- (6) Y. Y. Hong and S. Y. Ho, "Determination of Network Configuration considering Multiobjective in Distribution Systems using Genetic Algorithms," IEEE Transactions on Power Systems, v. 20, no. 2, pp. 1062-1069, May 2005.

## 6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Dr Daniel Pinheiro Bernardon  
Nascido em Santa Maria, RS em 15 de setembro de 1977.  
Doutor (2007), mestre (2004) e graduado (2000) em Engenharia Elétrica na UFSM.  
Professor Adjunto da Universidade Federal do Pampa – UNIPAMPA.  
Atua na área de modelagem e otimização de sistemas de potência.