



Modelagem e Aplicação do Programa ATP para Estudos de Paralelismo nas Redes de Distribuição Atendidas por Subestações de Diferentes Fontes

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| M.Sc. Daniel P. Bernardon AES Sul – Divisão de Operação do Sistema daniel.bernardon@aes.com | Francisco D. Veiga AES Sul – Divisão de Operação do Sistema francisco.diuner@aes.com |
| Roberto Rech AES Sul – Divisão de Operação do Sistema roberto.rech@aes.com | Gerente Lucas T. da Luz AES Sul – Divisão de Operação do Sistema lucas.luz@aes.com |

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 manobra¹. 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, Modelagem Elétrica, Paralelismo, Redes de Distribuição.

1. 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 melhores 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 Draw². 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.

2. 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 real³. 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°.

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.

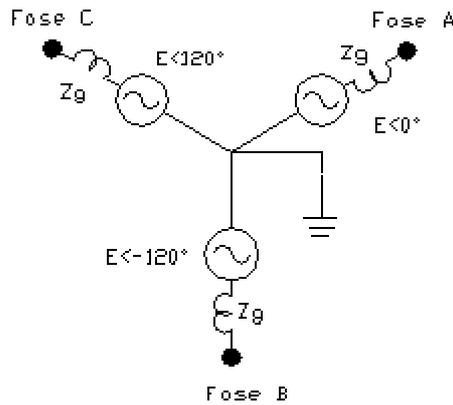


FIGURA 1: Circuito Elétrico Equivalente da Fonte.

2.2. Transformadores de Potência

Num transformador real, embora hermeticamente acoplado pelo núcleo de ferro, uma pequena porção de fluxo disperso é produzida nos enrolamentos primário e secundário, ϕ_1 e ϕ_2 , respectivamente, além do fluxo mútuo, ϕ_m ⁴.

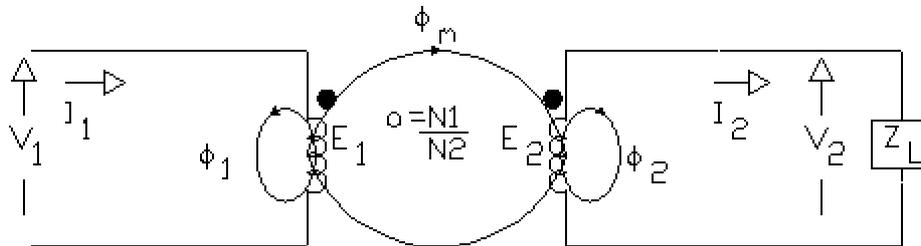


FIGURA 2: Representação de um Transformador com Dois Enrolamentos.

O fluxo disperso primário, ϕ_1 , produz uma reatância indutiva primária X_{L1} e o fluxo disperso secundário, ϕ_2 , produz uma reatância indutiva secundária, X_{L2} . Além disto, os enrolamentos primário e secundário são constituídos de condutores de cobre, que têm certa resistência. A resistência interna do enrolamento primário é r_1 e a do secundário é r_2 . As resistências e reatâncias dos enrolamentos produzem quedas de tensão no interior do transformador, como resultado das correntes primária e secundária.

Na Figura 3 está representado o circuito equivalente de um transformador com a resistência e reatância internas secundárias refletidas ao primário. A corrente primária, I_1 , é a soma da corrente de magnetização, I_m , e da corrente de carga, I_1' , ambas refletidas ao primário. Além disto, R_m representa o parâmetro equivalente às perdas de potência no ferro do núcleo do transformador (perdas por histerese e por correntes parasitas) e devidas à corrente de magnetização, I_m . Note-se que X_{Lm} está em paralelo com R_m e representa as perdas reativas devido à excitação magnética do núcleo.

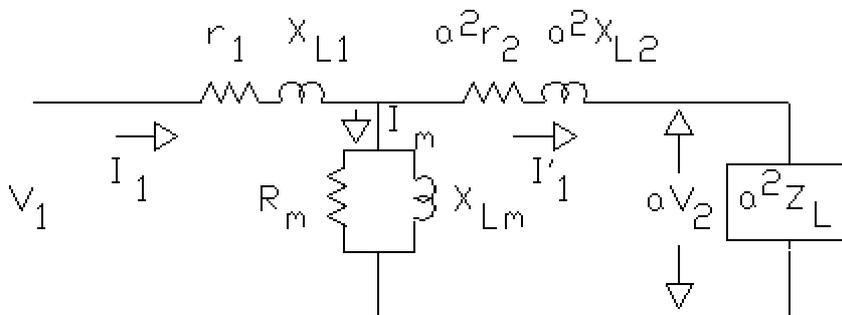


FIGURA 3: Circuito Equivalente do Transformador.

Se o transformador estiver com carga, a componente de carga da corrente primária I_1' pode ser muito maior que a corrente de magnetização, I_m , sendo esta considerada como desprezível. Fazendo isso, é

possível agrupar as resistências e reatâncias internas dos circuitos primário e secundário, de modo a produzir os seguintes parâmetros equivalentes:

$R_{e1} = r_1 + a_2^2 r_2$ = resistência equivalente referida ao primário

$X_{e1} = X_{L1} + a_2^2 X_{L2}$ = reatância equivalente referida ao primário

$Z_{e1} = R_{e1} + jX_{e1}$ = impedância equivalente referida ao primário

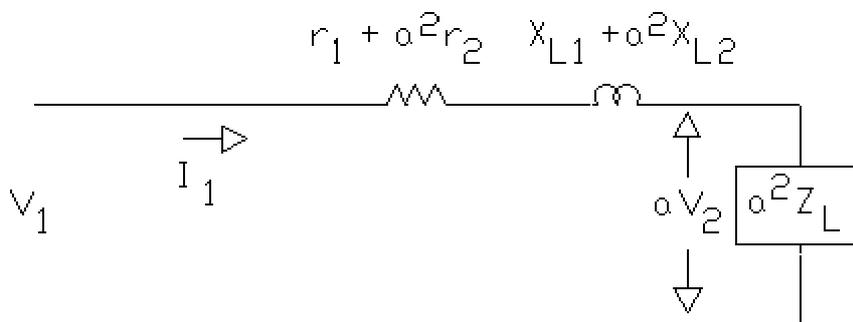


FIGURA 4: Circuito Equivalente do Transformador.

O ATP Draw necessita das impedâncias equivalentes para representação do transformador, além da relação de transformação e tipo de ligação.

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. Os parâmetros das redes são representados por uma impedância em série, resistência e reatância, como segue:

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

Onde:

Z = impedância do trecho de rede por fase (Ω);

r = resistência unitária por fase (Ω/km);

x_L = reatância indutiva unitária por fase (Ω/km);

L = comprimento do trecho de rede (km).

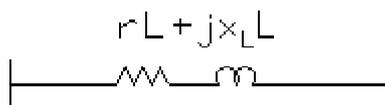


FIGURA 5: Representação dos Parâmetros Elétricos das Redes.

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.

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 destacamos⁵:

- 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:

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

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:

$$I = \frac{S_n}{V} \quad (3)$$

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:

$$S_n = \sqrt{P_n^2 + Q_n^2} \quad (4)$$

, 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.

3. 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 equação⁶:

$$X_t = \frac{1}{5} \cdot [2M\{X_t\} + 2Me\{X_t\} + Mo\{X_t\}] \quad (7)$$

Onde:

X_t = 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, calcula-se a demanda máxima para um grupo de consumidores k:

$$P_{Máx_k} = \frac{W_k}{T \cdot f_{Ck}} \quad (8)$$

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:

$$P_{kUt} = P_{Máx_k} \cdot P_{kUt}^* \quad ; \quad P_{kSt} = P_{Máx_k} \cdot P_{kSt}^* \quad ; \quad P_{kDt} = P_{Máx_k} \cdot P_{kDt}^* \quad (9)$$

$$Q_{kUt} = P_{Máx_k} \cdot Q_{kUt}^* \quad ; \quad Q_{kSt} = P_{Máx_k} \cdot Q_{kSt}^* \quad ; \quad Q_{kDt} = P_{Máx_k} \cdot Q_{kDt}^* \quad (10)$$

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:

$$P_{jUt} = \sum_{i=1}^{N_k} P_{iUt} \quad ; \quad P_{jSt} = \sum_{i=1}^{N_k} P_{iSt} \quad e \quad P_{jDt} = \sum_{i=1}^{N_k} P_{iDt} \quad (11)$$

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

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

4. 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 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.

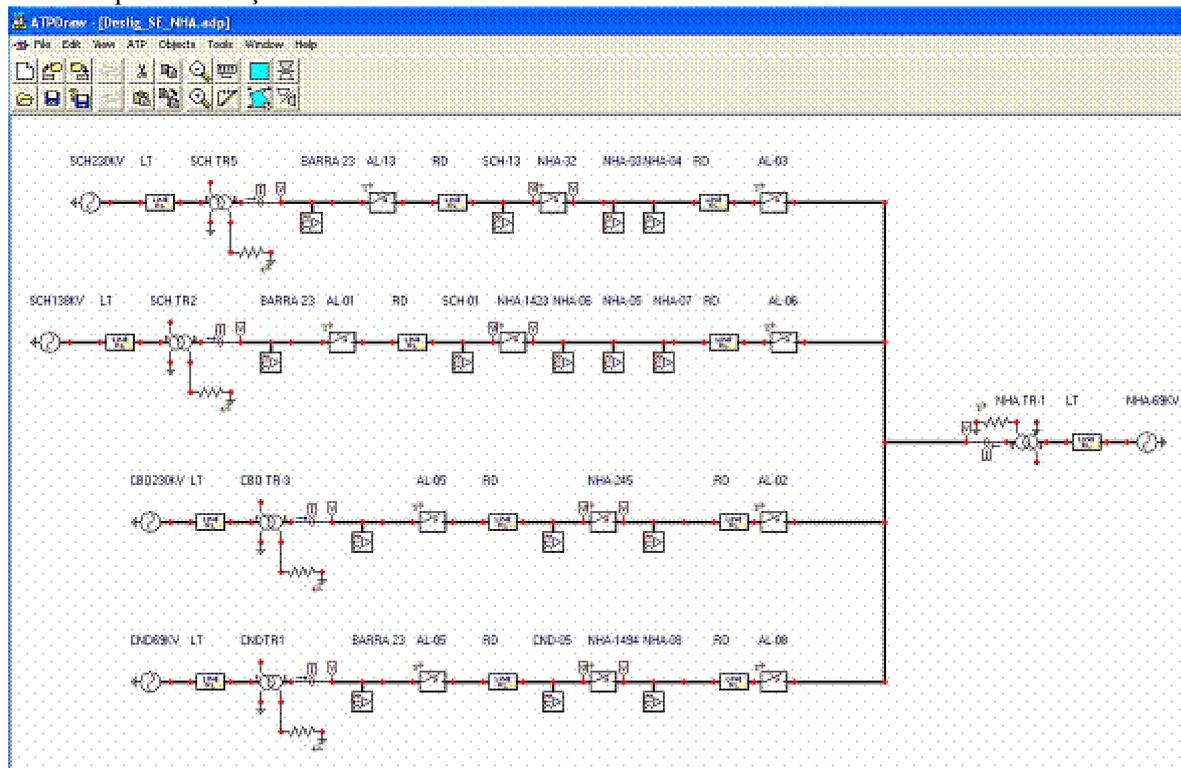


FIGURA 6: Representação do Estudo de Caso no Programa ATP Draw.

4.1. 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 são transferidos, via redes de distribuição, para as Subestações Scharlau, Campo Bom e Canudos, sem ocasionar nenhuma interrupção de curta duração nos consumidores.

4.2. 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.

4.3. 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 circuitos 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 Figura 7 está representado 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.

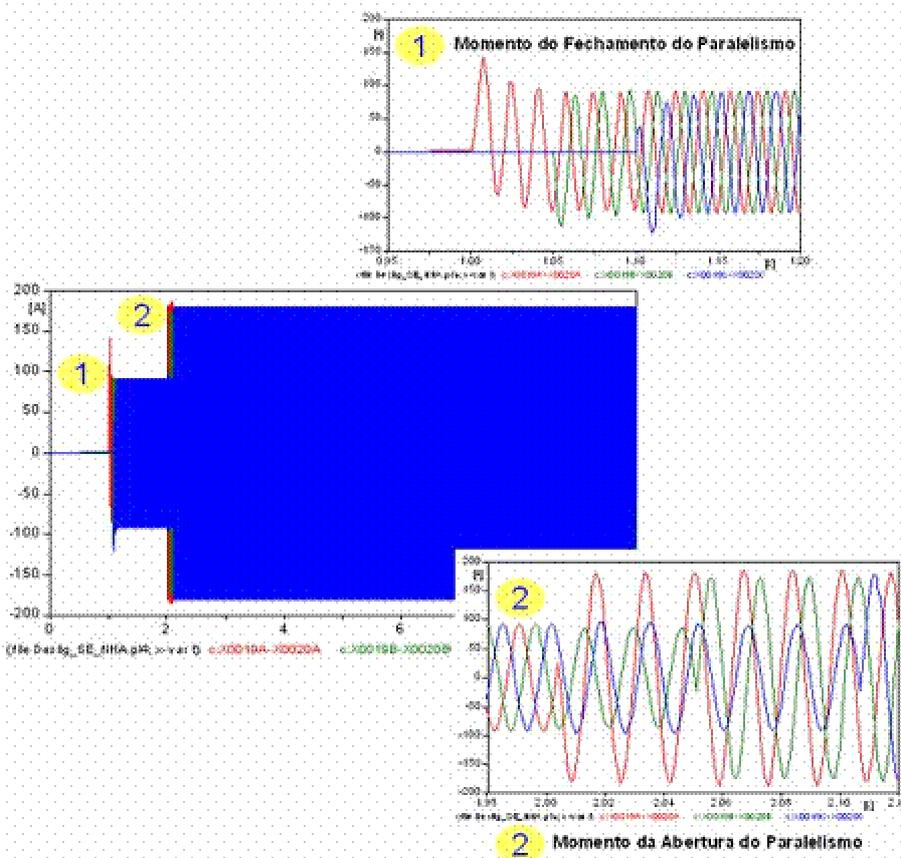


FIGURA 7: Comportamento das Correntes no Instante de Fechamento da Chave NHA – 32 e Desligamento do Disjuntor do AL 03 SE NHA.

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.

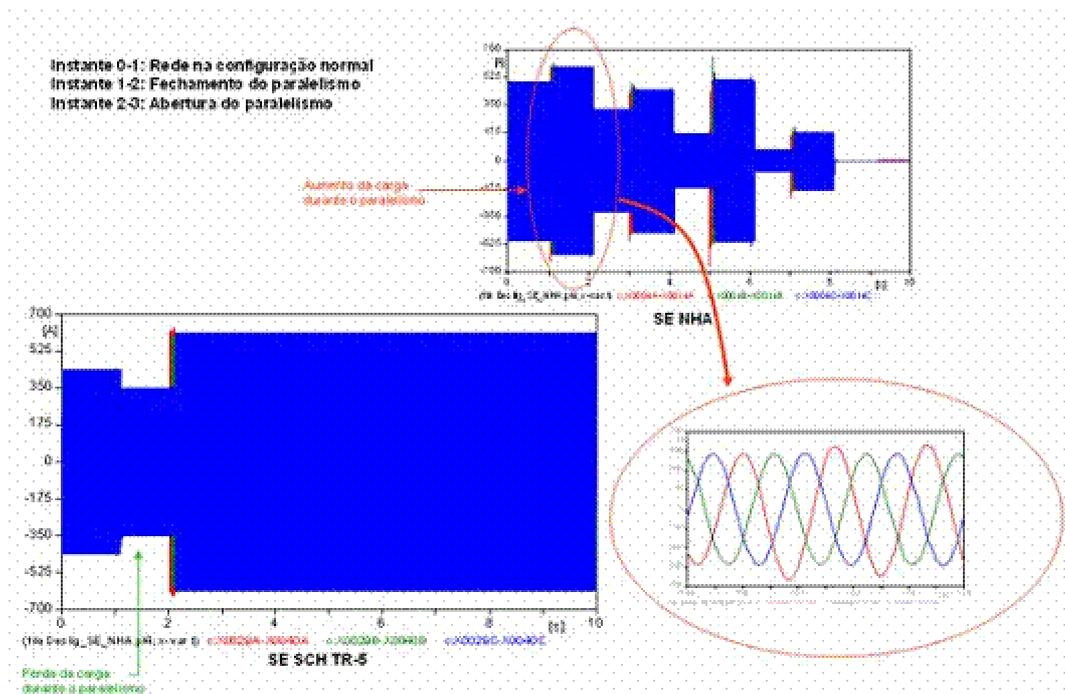


FIGURA 8: Comportamento das Correntes nas Subestações Novo Hamburgo e Scharlau.

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.

5. CONCLUSÕES

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, distribuidora gaúcha de energia. Como os resultados demonstrados e discutidos, apresentaram-se satisfatórios, o objetivo do trabalho foi alcançado.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1 BERNARDON, D.P. et al. *Emprego de novas Metodologias e Algoritmos mais eficientes para Modelagem das Cargas Elétricas e Estimação de Estados em Sistemas de Distribuição*. XVI SENDI – Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, Brasília / DF, novembro/2004.

2 AMON, J. Fº; PEREIRA, M.P. *Novos Desenvolvimentos dos Programas ATP/EMTP e APTDraw*. XVI SNTPEE, Campinas / SP, outubro/2001.

3 CIPOLI, J.A. *Engenharia de Distribuição*. Rio de Janeiro, Ed. Qualitymark, 1993.

4 KOSOW, Irving L.. *Máquinas elétricas e transformadores*. 14.ed. São Paulo: Globo, 2000.

5 ROBBA, Ernesto João. *Introdução a sistemas elétricos de potência: componentes simétricas*. São Paulo: Forense, 1972. 344p.

6 KÖNIG, A.L.; BERNARDON, D.P.; CANHA, L.N.; POPOV, V.A. *Modelagem das Curvas de Carga dos Consumidores de um Sistema de Distribuição*. CPFL Evolução – 1º Seminário Técnico, Campinas / SP, 2002.