



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

CB/GDS/09

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

GRUPO - 10

GRUPO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS

**ANÁLISE DE RESSONÂNCIA ENVOLVENDO LINHAS PARALELAS E REATORES
– CASO DO TRONCO 500 KV ADRIANÓPOLIS – CACHOEIRA PAULISTA**

**Guilherme Sarcinelli Luz (*) Davi Sixel Arentz
FURNAS Centrais Elétricas S.A.**

RESUMO

Esse trabalho tem como objetivo descrever o fenômeno de ressonância que pode ocorrer entre linhas paralelas compensadas por reator, como o caso das linhas que envolvem o tronco em 500 kV entre as subestações de Cachoeira Paulista e Adrianópolis.

Através de simulações de transitórios eletromagnéticos, tanto no domínio da frequência como no domínio do tempo, bem como se utilizando de registros oscilográficos, este trabalho busca demonstrar as características dessa ressonância e propor medidas que poderão ser empregadas para a solução do problema.

O trabalho apresenta também simulações considerando a futura configuração de chegada do bipolo 2 da transmissão CCAT de Belo Monte na subestação Terminal Rio, cuja instalação irá seccionar tanto a LT 500 kV Adrianópolis – Resende quanto a LT 500 kV Adrianópolis – Cachoeira Paulista, de acordo com o Anexo Técnico do Lote Único do Leilão de julho de 2015. Com isso, aparecerá um novo trecho deste circuito que ficará reduzido a 101 km na linha Resende – Terminal Rio cujo comprimento determinará nova condição de ressonância. Esta condição foi também analisada e seus resultados serão apresentados.

PALAVRAS-CHAVE

Ressonância na Frequência Fundamental, Linhas Paralelas, Reatores, Programa ATP

1.0 - INTRODUÇÃO

A conjugação das indutâncias e capacitâncias presentes no sistema elétrico produzem trocas de energia entre esses elementos. Estas trocas obedecem tanto às fontes de alimentação, que produzem a resposta forçada do sistema, como às mudanças de configuração, que provocam a resposta natural do sistema no momento. Ambas se sobrepõem e, muitas vezes, produzem sobretensões, que podem ser classificadas como transitórias ou temporárias, de acordo com as frequências envolvidas e seus amortecimentos. Entretanto, para determinadas configurações, algumas das respostas naturais podem aproximar-se muito da frequência forçada e fazer com que estas trocas se tornem tão relevantes que propiciem o surgimento de sobretensões mesmo em regime permanente [1]. Nestas ocorrências apenas uma mudança de configuração pode evitar a queima dos equipamentos envolvidos. A configuração de linha aberta com circuitos paralelos energizados, por exemplo, pode produzir o fenômeno de ressonância entre as capacitâncias de acoplamento e o(s) reator(es) presente(s) na linha. Esta ressonância, alimentada pelas fontes que excitam os circuitos paralelos, produz o aparecimento de sobretensões em regime permanente. É o caso analisado neste artigo, como será descrito a seguir.

Em Abril de 2009, ocorreu o seccionamento do circuito 2 da LT 500 kV Adrianópolis – Cachoeira Paulista para o acesso da empresa Votorantim Metais à Rede Básica, dando origem à SE Resende e às LTs 500 kV Adrianópolis – Resende (com 115 km) e Cachoeira Paulista – Resende (com 56 km). A linha original de 171 km possuía dois

(*) Rua Real Grandeza, n° 219 – sala 110 – Bloco E – CEP 22.281-900 Rio de Janeiro, RJ – Brasil
Tel: (+55 21) 2528-3605 – Fax: (+55 21) 2528-5528 – Email: guiluz@furnas.com.br

reatores de 136 Mvar (em 500 kV), cada um deles instalado nos terminais originais da linha, ou seja, em Adrianópolis (RT06) e em Cachoeira Paulista (RT02). Após seu seccionamento, os reatores foram mantidos nas mesmas subestações, ficando, portanto, um em cada uma das novas linhas criadas.

Contudo, foi verificado que na LT 500 kV Adrianópolis – Resende, quando desconectada em ambos os terminais, estando o reator de linha (RT06) do terminal de Adrianópolis conectado, apareciam elevadas tensões sustentadas. Desde então, de modo a se evitar danos nos equipamentos, pela ocorrência desta condição de ressonância, o reator RT06 vem sendo mantido indisponível para a operação.

2.0 - OSCILOGRAFIA DO FENÔMENO OBSERVADO

A seguir são apresentados alguns registros das tensões no terminal de Adrianópolis da LT 500 kV Adrianópolis – Resende, obtidos no dia 23/08/2011, quando foi observado um valor excessivamente alto (cerca de 700 kV), após a conexão do reator estando os 2 dois terminais da linha desconectados.

A Figura 1a apresenta o transitório da manobra de abertura pelo lado de Adrianópolis, estando o lado de Resende ainda fechado. A Figura 1b mostra que a tensão imposta na LT pelo lado de Resende é mantida até que o disjuntor em Resende seja aberto, 3 minutos após. Note-se que os níveis de tensão apresentados nas Figuras 1a e 1b são perfeitamente normais para uma linha de 500 kV. A Figura 1c indica o valor baixo (cerca de 10 kV) sustentado da tensão induzida em cada uma das fases da linha após 2 horas da manobra de abertura enquanto o reator não é reinserido.

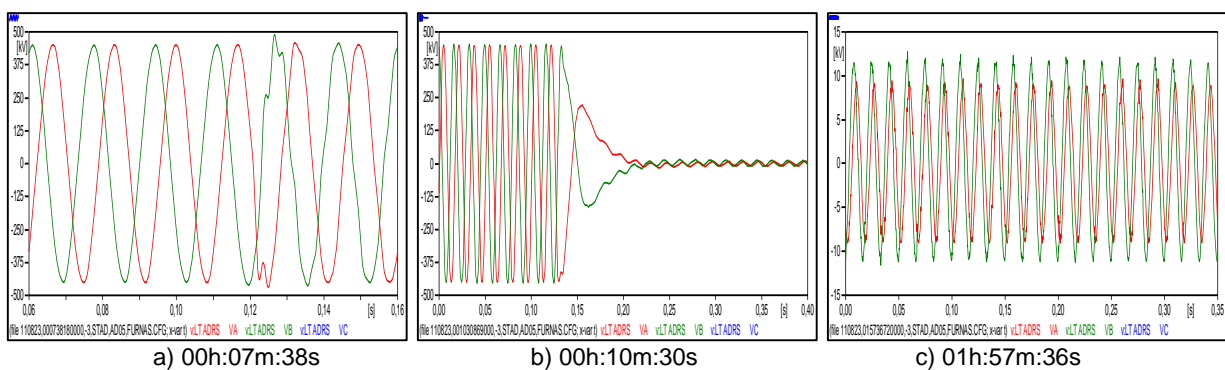


Figura 1 – Oscilogramas das tensões no terminal de Adrianópolis do dia 23/08/11 – sem reator

Na Figura 2a observa-se que, logo após a manobra de energização do reator, a tensão cresce rapidamente atingindo, em menos de 60 segundos, valores acima de 1.0 p.u. (Figura 2b). Sua amplitude máxima, definida pela condição ressonante, é mantida até que a retirada do reator, cerca de 15 minutos depois, reduz drasticamente a tensão residual, como mostrado na Figura 2c.

Estes resultados indicam a condição de ressonância confirmada pelas simulações conforme será visto a seguir.

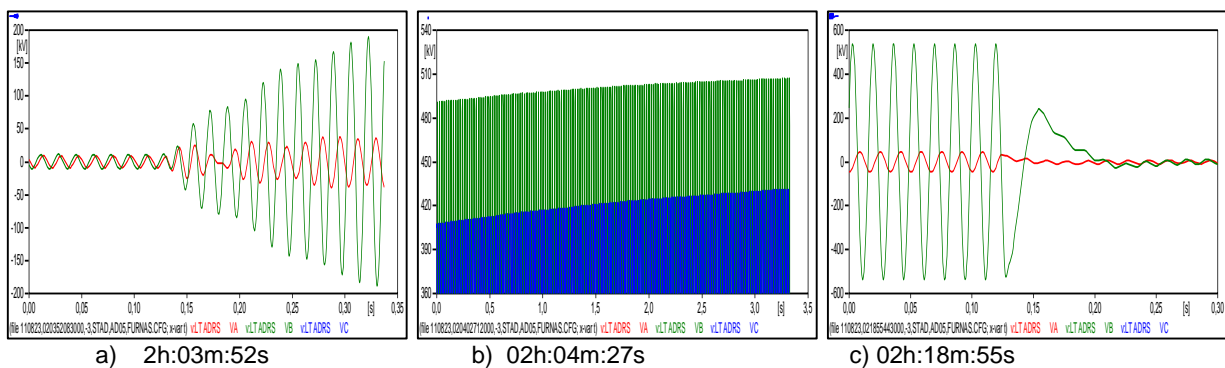


Figura 2 – Oscilogramas das tensões no terminal de Adrianópolis do dia 23/08/11 – manobra do reator

3.0 - ANÁLISES EFETUADAS – CONFIGURAÇÃO ATUAL

A Figura 3 apresenta o circuito da configuração atual, modelado no programa ATPDraw, considerando os elementos mais relevantes para a reprodução do fenômeno em análise. Foram considerados tanto as transposições como os acoplamentos entre os circuitos que se encontram mais próximos. Alguns trechos foram modelados tanto por Bergeron como por J.Marti. Os componentes que possuem a letra J na Figura 3 indicam os trechos cuja modelagem com J.Marti foram viáveis. Foram realizadas simulações tanto no domínio da frequência como no domínio do tempo.

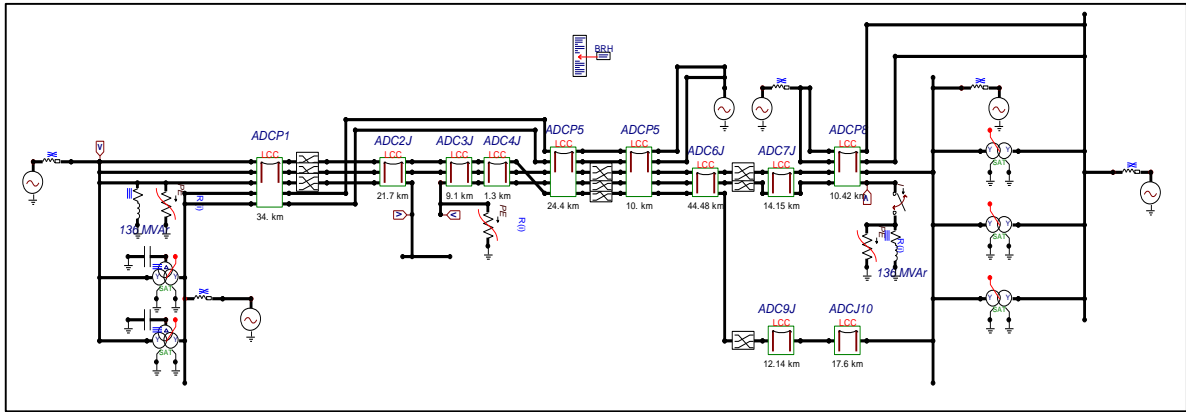
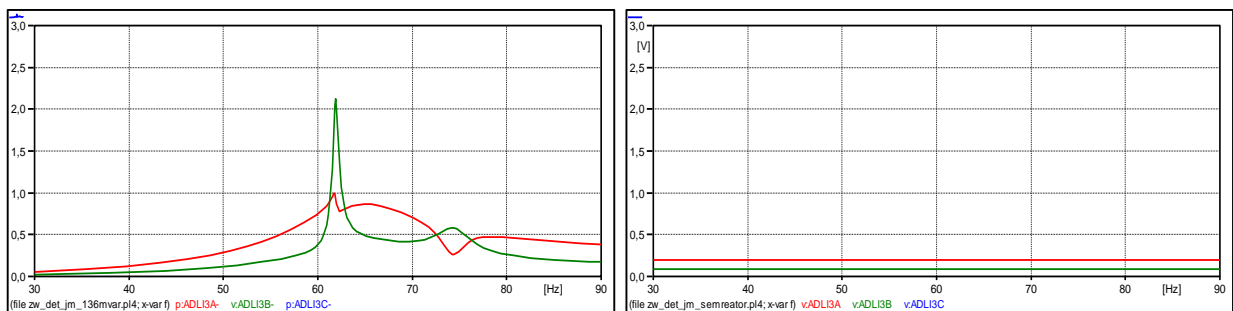


Figura 3 – Rede modelada no ATPDraw considerando as transposições nos circuitos de 500 kV

3.1 Análises no Domínio da Frequência

3.1.1 Análise da Presença do Reator

Com o objetivo de identificar as ressonâncias deste circuito em torno da frequência fundamental apresentada nos oscilogramas, foi calculada a tensão transferida para a linha Adrianópolis-Resende, quando esta se encontra aberta, aplicando-se 1 V nas fontes de tensão da Figura 3. As Figuras 4a e 4b apresentam, respectivamente, este resultado com e sem a presença do reator de 136 Mvar de Adrianópolis considerando o modelo J.Marti para alguns trechos. Os valores correspondem à amplificação da tensão induzida pelos circuitos paralelos. Os valores acima de 1 V da Figura 4a indicam amplificações significativas muito próximas da frequência fundamental, enquanto que os valores bem abaixo de 1 V da Figura 4b indicam que, quando o reator não está conectado, não existe qualquer amplificação na faixa de 30 a 90 Hz. Resultados semelhantes foram obtidos representando todos os trechos com o modelo Bergeron como será visto adiante (Figura 6).



a) Como o reator de 136 Mvar

b) Sem o reator de 136 Mvar

Figura 4 – Tensão transferida considerando o modelo J.Marti em alguns trechos

3.1.2 Identificação dos Elementos Essenciais do Circuito

Buscando reduzir o circuito da Figura 3 aos elementos essenciais responsáveis pela transferência de tensão na linha aberta, chegou-se ao circuito RLC da Figura 5, na qual se observa:

- o reator;
- os circuitos “PI” representando cada fase da linha em análise;
- as capacitâncias entre as fases desta linha;
- as capacitâncias de acoplamento entre os circuitos paralelos responsáveis por fornecer a excitação de frequência fundamental.

Os valores deste circuito foram ajustados de modo que a tensão transferida e os pontos de ressonância fossem próximos dos resultados obtidos com o circuito da Figura 3, representando-se todas as linhas pelo modelo Bergeron, como mostrado na Figura 6.

A partir do circuito reduzido da Figura 5 foram realizadas várias análises nas quais se pôde constatar que:

- A ressonância observada em torno de 60 Hz é causada pelas capacitâncias de acoplamento e entre fases associadas ao reator de 136 Mvar. A ressonância do reator com a capacitância própria de cada fase da linha somente ocorre para frequências acima de 500 Hz;
- As diferenças entre os valores da capacitância de acoplamento das fases da LT Adrianópolis – Resende com as linhas em paralelo determina as duas ressonâncias próximas de 60 Hz;
- O aumento do valor da capacitância mútua entre fases reduz o valor da frequência da 1ª ressonância.

3.1.3 Sensibilidade Quanto ao Valor do Reator

De modo a se obter uma sensibilidade desta ressonância com relação aos parâmetros do circuito, foi realizada uma variação da reatância do reator, desconsiderando-se a ação do pararraios, medindo-se a tensão residual da linha Adrianópolis-Resende aberta para o circuito detalhado da Figura 3. O gráfico da Figura 7 apresenta esta sensibilidade comparando os dois modelos da linha (exclusivamente Bergeron versus Bergeron com alguns trechos em J.Marti). A partir deste gráfico é possível identificar que o valor de 136 Mvar do reator atual de Adrianópolis é muito próximo de uma ressonância máxima, que se encontra em torno de 138 Mvar. Independentemente do modelo utilizado para representar a linha, constata-se que a utilização de um valor mais baixo para o reator evitaria a ressonância observada no campo.

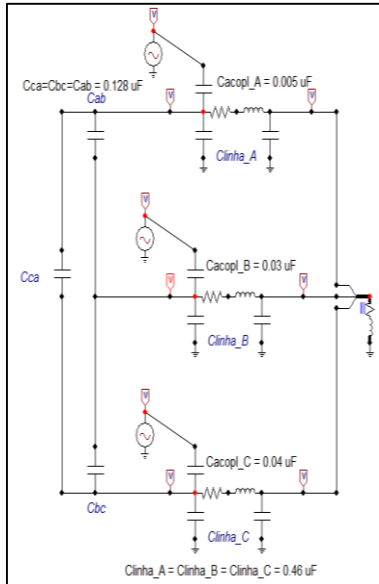


Figura 5 – Circuito RLC ajustado

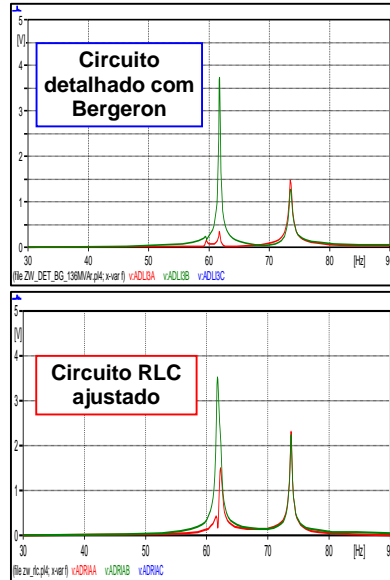


Figura 6 – Tensão transferida

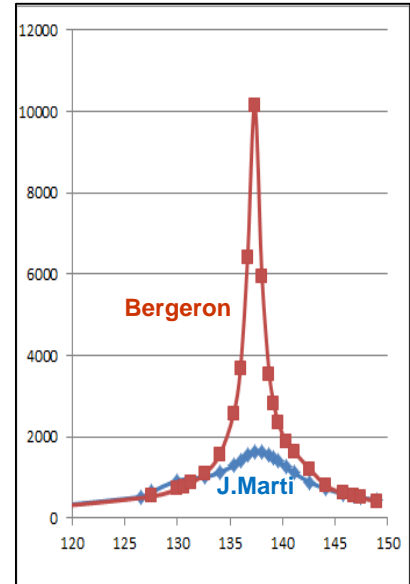


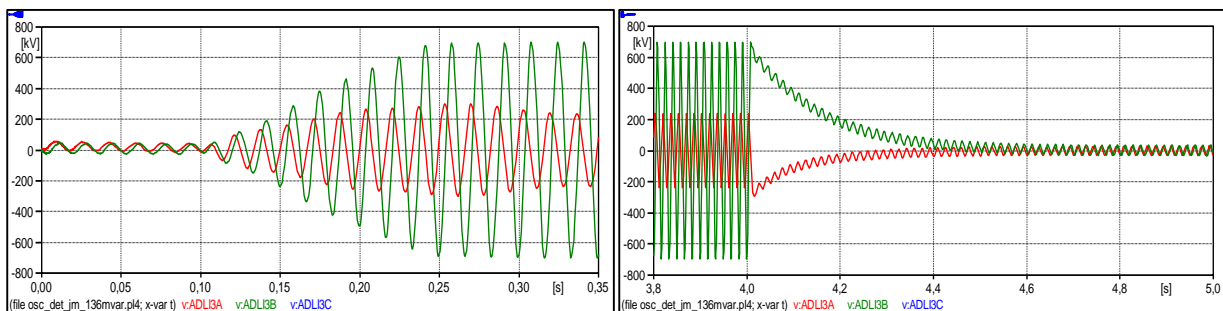
Figura 7 - Tensão residual(kV) versus potência do reator(Mvar)

3.2 Análises no Domínio do Tempo

3.2.1 Reprodução do Evento no Campo

Com o objetivo de reproduzir, tanto quanto possível, os resultados das oscilografias, foi então simulada a entrada e saída do reator de linha de 136 Mvar no terminal de Adrianópolis na configuração em que a LT 500 kV Adrianópolis – Resende se encontra aberta, utilizando-se o circuito da Figura 3 com os trechos em J.Marti indicados.

A figura 8a apresenta o crescimento da tensão na LT 500 kV Adrianópolis – Resende no terminal de Adrianópolis logo após a inserção do reator. Observa-se que a tensão cresce, reproduzindo o fenômeno da ressonância, embora mais rapidamente do que no campo, atingindo, também, valores maiores para a tensão final. Aqui o valor final é limitado pela ação dos pararraios. Da mesma forma, foi simulada a retirada do reator após um tempo de estar inserido, como mostrado na Figura 8b.



a) Inserção do reator de 136 Mvar

b) retirada do reator de 136 Mvar

Figura 8 – Tensão no Terminal de Adrianópolis após a inserção do reator

Cabe ainda notar que a tensão no outro terminal da linha (Resende) é idêntica à tensão em Adrianópolis, uma vez que o fenômeno se dá na frequência fundamental.

Pode-se constatar, a partir dos resultados das simulações efetuadas no domínio do tempo, que:

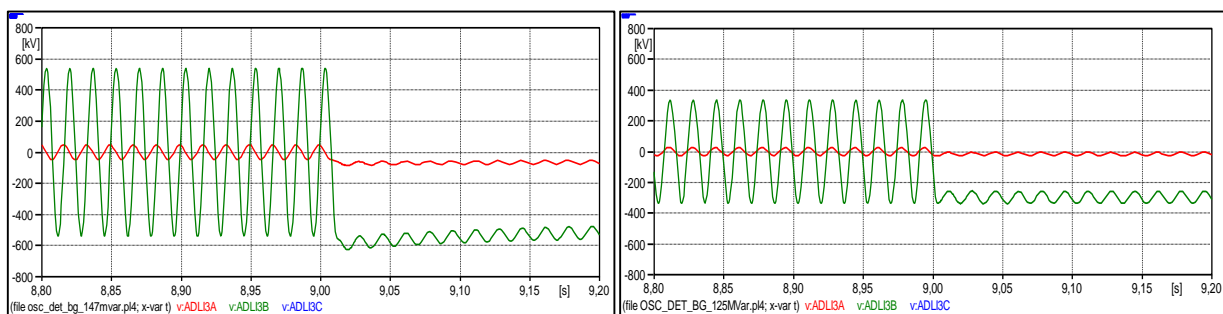
- A abertura desta linha, estando o reator conectado, provoca efetivamente o fenômeno de ressonância, elevando a tensão em seus terminais para valores acima de 1.0 p.u.;
- A elevação de tensão mantém-se sustentada, não havendo amortecimento;
- A fase A não apresenta sobretensão, em função da geometria da linha;
- A tensão máxima no campo foi menos severa que na simulação.

Uma análise da energia drenada pelos para-raios apontou que os mesmos não teriam suportado a sobretensão produzida pela ressonância pelo tempo de 18 minutos observado no campo. Isso nos levou a considerar que a ressonância real deve ter sido menos severa em função de uma provável dessintonia. Isso pode ser entendido melhor pela análise que se segue.

3.2.2 Mudança na Sintonia do Circuito Ressonante

A análise efetuada no domínio da frequência indicou que, enquanto os circuitos paralelos produzem a excitação de frequência fundamental, a sintonia na frequência de ressonância é determinada pelos componentes do circuito em estudo, especialmente as capacitâncias de acoplamento, as capacitâncias entre as fases e a indutância do reator. Embora seja mais provável que as imprecisões sejam devido às capacitâncias, que estão associadas tanto à modelagem da linha – valores médios de diversas distâncias geométricas entre fases e para a terra – como aos comprimentos dos trechos de acoplamento, optou-se, por simplicidade, por alterar apenas o valor da reatância do reator conectado em Adrianópolis. Este, além de conter alguma imprecisão no seu valor, é tão determinante na definição da ressonância quanto as capacitâncias envolvidas.

Deste modo, uma variação positiva e negativa de apenas 8% no valor do reator de 136 Mvar (147 Mvar e 125 Mvar, respectivamente) foi suficiente para produzir uma redução na tensão final de cada fase, mesmo considerando o modelo Bergeron para a representação da linha, cujos resultados são mais pessimistas. As Figuras 9a e 9b apresentam, respectivamente, os resultados das tensões nas fases para o reator de 147 Mvar e 125 Mvar. Isso pode explicar porque os valores de tensão obtidos na oscilografia ficaram mais baixos e, com isso, os para-raios não chegaram a se danificar. Aponta, também, para as possíveis soluções do problema, como será visto a seguir.



a) Reator de 147 Mvar

b) Reator de 125Mvar

Figura 9 – Tensão no Terminal de Adrianópolis antes e depois da retirada do reator

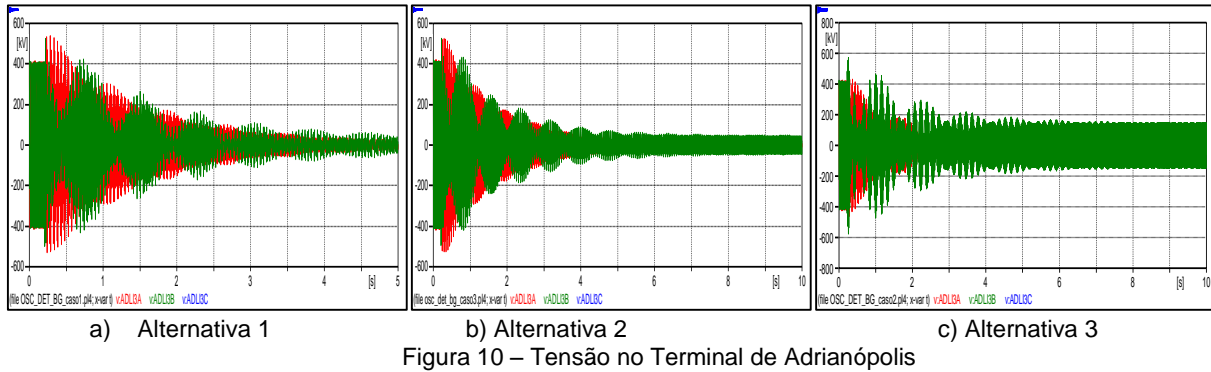
3.2.3 Alternativas de Solução Considerando a Configuração Atual do Tronco

Para a solução do problema, ainda na configuração atual do tronco, este trabalho explorou as seguintes alternativas:

- Alternativa 1: Realocação do reator de 136 Mvar do terminal Cachoeira Paulista da LT 500 kV Cachoeira Paulista – Resende para o terminal Resende da LT 500 kV Adrianópolis – Resende;
- Alternativa 2: Instalação de reator de 112,4 Mvar (disponível na SE Campinas) no terminal Resende da LT 500 kV Adrianópolis – Resende, mantendo os reatores dos terminais de Adrianópolis e Cachoeira Paulista.
- Alternativa 3: Substituição do atual reator de 136 Mvar do terminal de Adrianópolis por um reator de 112,4 Mvar disponível na SE Campinas;

As Figuras 10a a 10c apresentam os resultados das tensões no terminal de Adrianópolis para as três primeiras alternativas, respectivamente. Todas eliminam a ressonância, proporcionando amortecimento às sobretensões com algumas diferenças entre si.

A primeira alternativa impõe restrições operativas, na medida em que a LT 500 kV Adrianópolis – Resende somente poderia operar com os 2 reatores presentes ou sem reatores. A operação com apenas um reator de 136 Mvar, em qualquer terminal, levaria à situação de ressonância se o circuito precisasse ser aberto.



A segunda alternativa também impõe restrições operativas quanto à configuração de reatores em operação normal, porém menos do que na primeira alternativa. Nessa situação a única configuração não aceitável seria quando apenas o reator de Adrianópolis estivesse presente.

Na terceira alternativa existe uma sobretensão transitória elevada (da ordem de 700 kV de pico, porém abaixo da suportabilidade dos equipamentos presentes) restringida pela ação do pararraios que se mantém por alguns ciclos e depois se reduz a valores abaixo da tensão nominal. A energia drenada pelos pára-raios de Adrianópolis é baixa, não oferecendo risco aos mesmos. Depois que a tensão reduz-se não há mais amortecimento, ficando essa tensão mantida a cerca de 0,60 p.u.. Essa alternativa mostra-se bastante interessante uma vez que não impõe restrição quanto à operação normal do novo reator do terminal Adrianópolis, precisando, contudo, ser confirmada através de medições em campo. Por outro lado, o religamento automático da linha poderá não atuar devido à condição de linha morta não estar atendida. Para não haver impedimento do religamento automático duas soluções poderiam ser utilizadas: comandar a abertura do disjuntor do reator no caso de atuação de proteção da linha ou alterar o ajuste de identificação de barra morta.

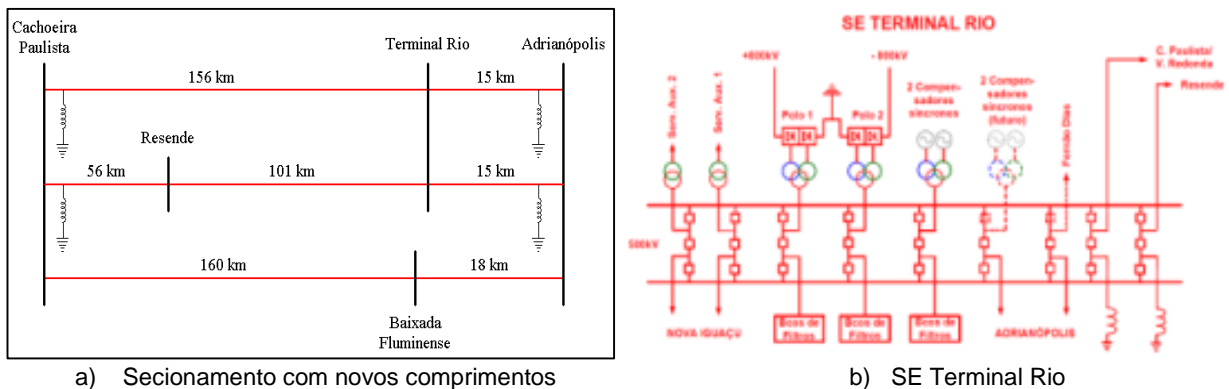
Há também soluções que envolvem somente mudanças no sistema de proteção da LT Adrianópolis – Resende, como por exemplo:

- Temporizar a abertura da LT Adrianópolis – Resende, tanto para comando de abertura por atuação da proteção quanto por abertura manual, de tal forma que o último disjuntor a abrir ocorra somente após o desligamento do reator. Nesse caso seria necessário incluir a abertura do disjuntor do reator de Adrianópolis na proteção da linha;
- Comandar a abertura do disjuntor do reator quando de atuação da proteção da linha.

Entretanto, o risco de ocorrer a ressonância no caso de falha da abertura do disjuntor do reator continuaria presente.

4.0 - ANÁLISE DA CONFIGURAÇÃO FUTURA

Com a implantação do bipolo 2 da transmissão CCAT de Belo Monte, os circuitos em análise serão alterados pela inserção da SE Terminal Rio, impactando tanto a LT 500 kV Adrianópolis – Resende como a LT 500 kV Adrianópolis – Cachoeira Paulista. Ambas as linhas terão seus trechos de maior comprimento reduzidos, respectivamente de 116 km para 101 km, e de 171 km para 156 km. A figura 11a mostra os seccionamentos que ocorrerão nas linhas bem como os novos comprimentos das mesmas. Está prevista a presença de reatores de barra nos vãos das linhas na SE Terminal Rio, como apresentado na Figura 11b.

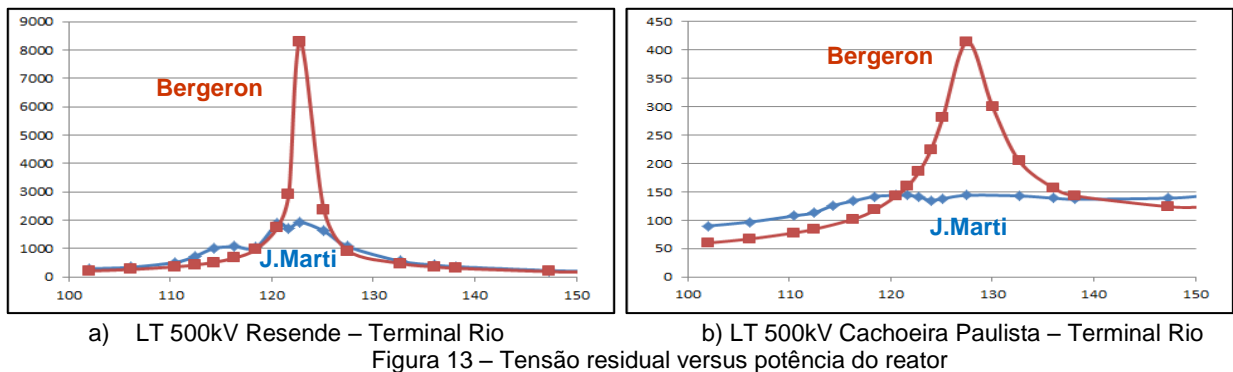
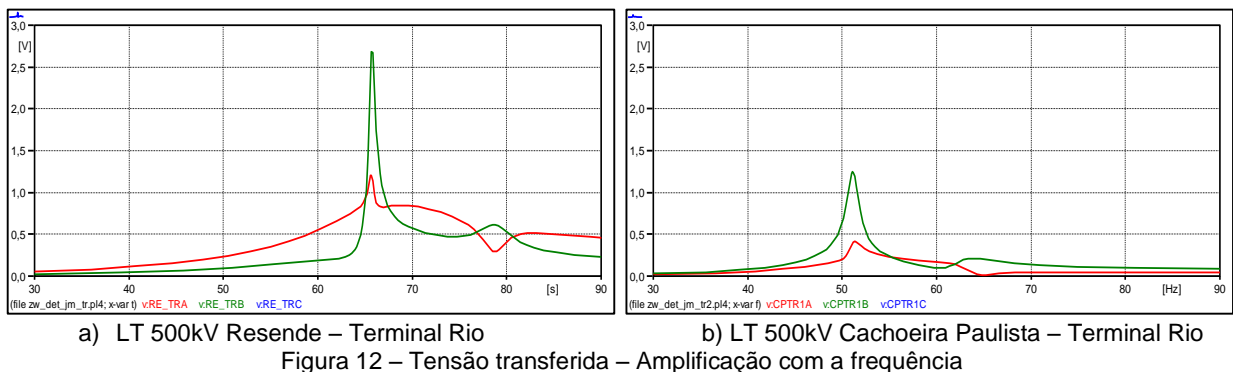


4.1 Análise no Domínio da Frequência

Análises semelhantes às descritas nos itens 3.1.1 e 3.1.3, associadas às Figuras 4a e 7, foram realizadas tanto para a LT 500 kV Resende – Terminal Rio como para a LT 500 kV Cachoeira Paulista – Terminal Rio. Apesar da primeira não ter reator de linha, considerou-se, para efeitos de restrição operativa, que a presença de um reator de 136 Mvar neste circuito poderá ocorrer caso o reator de barra seja conectado a esta linha quando ela esteja aberta através do disjuntor do meio estando os demais abertos.

A tensão transferida na LT 500 kV Resende – Terminal Rio e na LT 500 kV Cachoeira Paulista – Terminal Rio apresentaram os resultados ilustrados nas Figuras 12a e 12b, respectivamente. No primeiro circuito a redução do comprimento para 101 km afastou um pouco a ressonância da frequência de 60 Hz (comparando-se com a Figura 4). No segundo circuito, a redução do comprimento para 156 km, manteve ainda a ressonância afastada de 60 Hz e os valores de amplificação não indicam ser preocupantes.

A sensibilidade com relação ao valor de potência do reator estão apresentadas nas Figuras 13a e 13b para a LT 500 kV Resende – Terminal Rio e para LT 500 kV Cachoeira Paulista – Terminal Rio, respectivamente. A Figura 13a indica que a ressonância nesta linha desloca-se de 138Mvar para 123Mvar. Na LT 500 kV Cachoeira Paulista – Terminal Rio a ressonância aparece apenas com o modelo Bergeron, mas ainda assim com valores bem mais baixos de tensão residual.

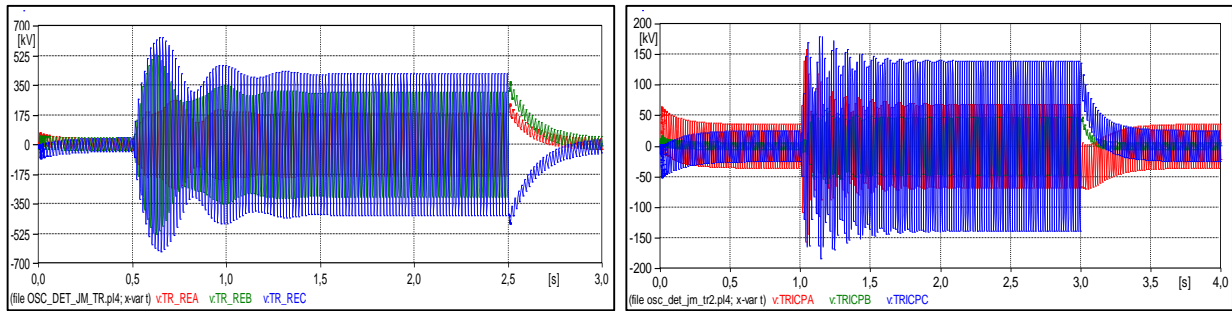


4.2 Análise no Domínio do Tempo

A fim de consolidar as análises para esta configuração futura foram feitas simulações no tempo da manobra do reator para as duas linhas. Para esta análise foi utilizado o modelo J.Marti nos trechos já indicados, de modo a refletir melhor o decaimento da tensão na abertura da linha.

A simulação de manobra do reator de barra de 136 Mvar da SE Terminal Rio, na LT 500 kV Terminal Rio – Resende aberta, considerando que ele esteja conectado através do disjuntor e meio, produziu o resultado mostrado na figura 14a. Como pode ser visto, quando o reator é inserido a tensão induzida nesta linha pelos circuitos paralelos chega a 1.0 p.u. Pela comparação da Figura 13a com a Figura 7, podemos observar que o deslocamento da ressonância devido à redução do comprimento, permitiu uma redução da tensão induzida, mas não afastou o risco, mantendo-se ainda desaconselhável a presença deste reator, exceto se medições no campo apontem que esta configuração não represente problemas.

A simulação da inserção e retirada do reator de linha de 136 Mvar da LT 500 kV Cachoeira Paulista – Terminal Rio na condição aberta indica uma tensão residual de 0.34 p.u., não vindo a restringir a conexão deste reator. Deve-se porém observar as condições para o religamento automático.



a) LT 500kV Resende – Terminal Rio aberta

b) LT 500kV Cachoeira Paulista – Terminal Rio aberta

Figura 14 – Manobra do reator de 136 Mvar

5.0 - CONCLUSÃO

As simulações realizadas, tanto no domínio da frequência como no domínio do tempo, confirmaram a existência do fenômeno de ressonância, produzindo sobretensões em regime permanente, na LT 500 kV Adrianópolis – Resende da atual configuração do tronco. Este fenômeno é provocado pelo acoplamento das linhas paralelas com o reator desta linha na SE Adrianópolis, que foi indisponibilizada por esta razão. O valor de 136 Mvar deste reator é muito próximo de uma ressonância máxima, que ocorreria se o valor fosse de 138 Mvar. A utilização de um reator de valor mais baixo evitaria o fenômeno de ressonância.

Algumas alternativas para a eliminação deste problema foram avaliadas. A substituição do atual reator de linha de 136 Mvar do terminal de Adrianópolis por um reator de 112,4 Mvar, disponível atualmente em Campinas, mostrou ser a alternativa que melhor flexibiliza a operação do SIN. Entretanto, observa-se ainda, nestas condições, tensões induzidas em torno 0,6 pu, que precisariam ser confirmadas através de medições em campo. Neste caso o religamento automático da linha precisará ser reavaliado.

Com a entrada do Bipolo 2 do projeto de Belo Monte, haverá o seccionamento das linhas Adrianópolis – Resende e Adrianópolis – Cachoeira Paulista para a instalação da SE Terminal Rio. Com isso, os maiores trechos destes circuitos ficarão reduzidos, respectivamente, a 101 km na linha Resende – Terminal Rio e 156 km na linha Cachoeira Paulista – Terminal Rio. Apenas a LT 500kV Resende – Terminal Rio poderá ter problema de ressonância associada às induções produzidas pelos circuitos paralelos caso seja conectado o reator de barra de 136 Mvar através do disjuntor e meio. Esta configuração deverá, portanto, ser restringida.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) D'AJUZ, A., FONSECA, C. S., CARVALHO, F. M. S., AMON, J., DIAS, L. E. N., PEREIRA, M. P., ESMERALDO, P. C. V., VAISMAN, R., FRONTIN, S. O. – Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento: Aplicação em Sistemas de Potência de Alta-Tensão. Rio de Janeiro. FURNAS. Niterói. UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE/EDUFF. 1987.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



GUILHERME SARCINELLI LUZ, brasileiro, nascido no RJ em 1957, engenheiro eletricitista pela UFRJ (1981) - Engenheiro de FURNAS C. Elétricas S.A., lotado na Diretoria de Operação.

Áreas de atuação: Simulação de Transitórios Eletromagnéticos e Sistemas de Corrente Contínua utilizando os programas ATP e PSCAD. Trabalha em FURNAS desde 1993, após trabalhar 11 anos na área de Consultoria na PROMON, THEMAG e Eletroconsult de Paraguay.

DAVI SIXEL ARENTZ graduou-se em engenharia elétrica pela Universidade Federal Fluminense (1997). Engenheiro de FURNAS C. Elétricas S.A., lotado na Diretoria de Operação.

Áreas de atuação: Simulação de Transitórios Eletromagnéticos utilizando o programa ATP. Trabalha em FURNAS desde 2001, após trabalhar 3 anos no CEPEL.