



**GRUPO IX
OPERAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS (GOP)**

**EXPERIÊNCIA OPERATIVA COM AS LINHAS DE TRANSMISSÃO DE 230 KV COM
FEIXE EXPANDIDO DA ÁREA NORTE DA CHESF**

João Varela Eduardo*
CHESF

Oswaldo Régis Júnior
CHESF

Antônio Roseval F.Freire
CHESF

Humberto Alves Nóbrega
CHESF

Ugenilson Trigueiro de Souza
CHESF

Humberto Maribondo de Moraes
CHESF

RESUMO

Linhas de Transmissão utilizando a técnica de feixe expandido tem operado comercialmente na CHESF, desde agosto de 1996.

Nos primeiros meses após a energização destas instalações, foram observados diferenças entre estudos da operação e valores encontrados no campo.

Através de ensaios e simulações, um grupo de estudos diagnosticou a causa das divergências existentes e quais as medidas que deveriam ser adotadas para operar as instalações. Também foi criado um modelo para ser usado com os programas de simulação monofásica existentes, e assim, poder subsidiar o planejamento operacional das instalações em questão.

PALAVRAS – CHAVE: Linha de transmissão, feixe expandido, LPNE, recapacitação

1.0 INTRODUÇÃO

As linhas de transmissão P. Afonso-Milagres-04F4/04F5 (260km), Milagres-Banabuiu-04M4/04M5 (225km) e Banabuiu-Fortaleza-04F4/04F6 (181km) tendo como configuração básica dois sub-condutores por fase (distantes 0,457cm), dois cabos pára-raios dotterel 176,6 MCM na saída e chegada nas subestações e dois 3/8" EHS nos demais trechos, foram projetadas para operar em 230kV (Figura 1) e, posteriormente, serem transformadas em um único circuito de 500kV, com 4 subcondutores por fase (vide Figura 2)

FIGURA 1 – Estrutura típica da LT 2x230kV

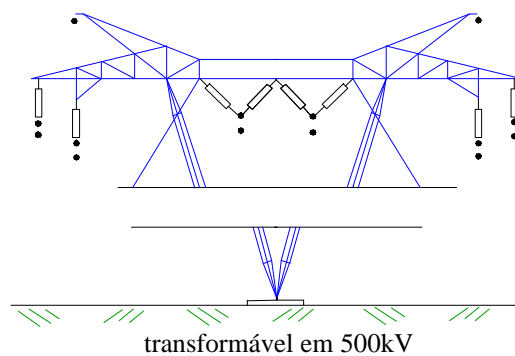
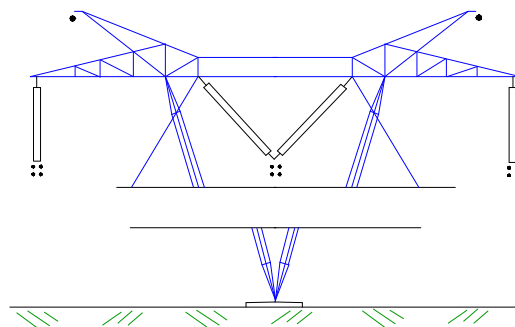


FIGURA 2 – Estrutura típica da LT em 500kV.



O crescimento acima do previsto da carga do Sistema Norte, indicava a necessidade da antecipação da transformação dos circuitos mencionados. Em virtude

da escassez de recursos a aplicação da técnica de feixe expandido na CHESF, mostrava-se oportuna, principalmente porque se tratava de uma linha de transmissão de 230kV, cabo geminado na posição vertical e distância de segurança para 500kV; ou seja, havia folga para se expandir o feixe atendendo-se as distâncias de segurança para 230kV.

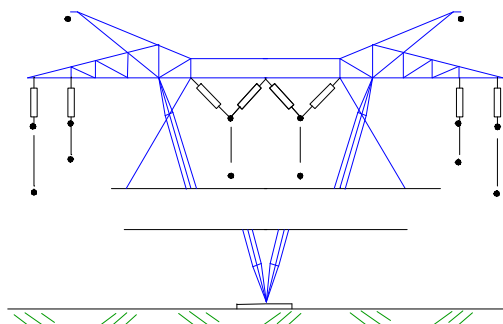


FIGURA 3 – Arranjo da LT transformável com feixe expandido.

Na época, já estavam construídas, no padrão transformável (Figura 1), as linhas de transmissão P.Afonso-Milagres-04F4/04F5 e Milagres-Banabuiu-04M4/04M5. No último trecho, a linha de transmissão Banabuiu-Fortaleza-04F4/04F6 já foi construída com o feixe expandido (Figura 3).

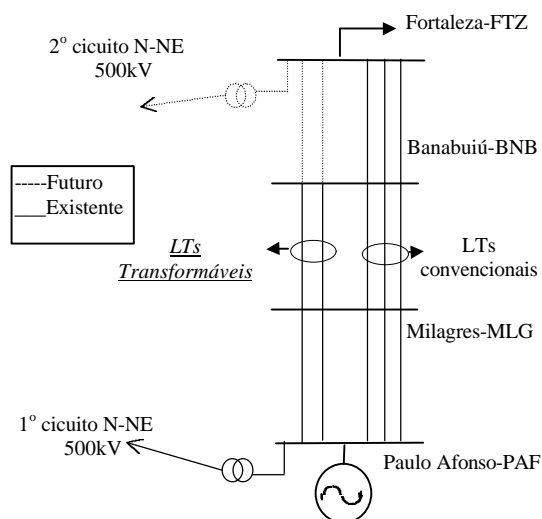


FIGURA 4-Unifilar simplificado da situação inicial.

Nos outros trechos, a expansão foi realizada posteriormente, com desligamentos diários das linhas de transmissão em foco. Registra-se, que foram realizados também desligamentos nestas linhas de transmissão, para substituição de um dos cabos pára-raios pelo cabo OPGW.

2.0 HISTÓRICO DE OCORRÊNCIAS

Em abril/97 quando da energização das linhas de transmissão Banabuiu-Fortaleza-04F4/04F6, de feixe expandido, foram observadas várias ocorrências que acarretavam dificuldades para o controle de tensão e para recomposição do sistema após grandes perturbações, tais como:

- Atuações de proteções de sobretensão quanto de manobras das linhas FEX nos trechos PAF-MLG e BNB-FTZ, com tensões de partida de acordo com os valores definidos pelos estudos elétricos. Para uma mesma tensão de partida observou-se que em algumas manobras ocorria a atuação da proteção de sobretensão e em outras não, dando um certo caráter aleatório ao fenômeno.
- Carregamentos dos compensadores estáticos inferior em até 50 MVar aos valores previstos nos estudos.
- Atuações de proteções de sobretensão de linhas, barras e equipamentos após curto-circuitos na rede de distribuição derivada da SE FTZ.

Uma pesquisa no histórico operacional revelou que, mesmo antes das linhas de transmissão P.Afonso-Milagres-04F4/04F5, terem os feixes expandidos, foram registradas sobretensões de regime permanente, tendo inclusive havido partida do relé de sobretensão no terminal de Milagres.

3.0 SIMULAÇÕES X ENSAIOS DE CAMPO

Para estudar o problema, foi criado um grupo de estudos composto por técnicos da área de planejamento da operação, projeto e manutenção de linhas de transmissão e medição. Ensaio preliminares realizados na LT P.Afonso-Milagres-04F4/04F5 para medições da amplitude e forma de onda e, posteriormente, na LT Banabuiu-Fortaleza-04F4/04F6 para medição dos valores de tensão, corrente, potência ativa e reativa e ângulo tensão-corrente comprovaram a existência do problema.

As simulações com load flow, indicaram valores diferentes dos registrados nos ensaios, numa demonstração de que o modelo utilizado nos estudos não representava o comportamento destas LT.

Nas simulações com o ATP (Alternative Transients Program), tentando-se reproduzir estes ensaios de campo, no trecho Banabuiu/Fortaleza, observou-se sobretensões no terminal aberto da linha acima dos valores calculados no load-flow, tensões desequilibradas e uma grande influência do desequilíbrio de tensão nas sobretensões no terminal em vazio.

Simulações no ATP realizadas na linha Milagres/Banabuiu-04M4/04M5 conseguiram reproduzir com grande aproximação os resultados dos ensaios realizados nestas instalações. Segue-se o detalhamento destas medições em ensaios versus simulações.

4.0 ENSAIOS x SIMULAÇÕES -1ª Fase

Com o objetivo de subsidiar um diagnóstico para o problema de atuação freqüente das proteções de sobretensão, quando de manobras nestas linhas de transmissão, foram realizados numa 1ª fase, ensaios nas LT P.Afonso-Milagres-04F4/04F5 e Banabuiu-Fortaleza-04F4/04F6

4.1 Ensaio nas LT P.Afonso/Milagres-04F4/04F5

Os ensaios mostraram que as sobretensões transitórias estão dentro dos valores esperados nas simulações e com amortecimento em menos de um ciclo de 60Hz. Entretanto, foram observadas elevadas sobretensões de regime permanente, atingindo 1,17pu (causando atuação da proteção de sobretensão temporizada), quando se esperava 1,1pu nos estudos de load-flow. Além disso, as sobretensões de regime permanente estavam fortemente desequilibradas.

Como já foi mencionado, o problema de sobretensões elevadas ocorriam também antes da expansão do feixe.

4.2 Ensaio nas LT Banabuiu-Fortaleza-04F4/04F6

As sobretensões transitórias verificadas apresentaram comportamento muito próximo do previsto nas simulações com o ATP, confirmando que os problemas apresentados não são causados por sobretensões transitórias.

Os ensaios foram realizados no período de carga média com fluxo de 275 a 310 MW no tronco Banabuiu/Fortaleza.

TABELA 1 – Parâmetros medidos e calculados na LT Banabuiu/Fortaleza-04F4 em vazio c/ 04F6 em carga

Parâmetros	Medido nos ensaios de Campo		Calculado através do Load-Flow	
	Com reator	Sem reator	Com reator	Sem reator
Va FTZ(kV)	246,4	248,9	239,9	243,1
Vb FTZ(kV)	251,8	254,8	-	-
Vc FTZ(kV)	243,9	247,3	-	-
Va BNB(kV)	235,0	235,6	235,5	236,0
Vb BNB(kV)	235,6	236,7	-	-
Vc BNB(kV)	233,8	233,8	-	-
Qo (MVAr)	-57,10	-67,8	-53,0	-64,8

Os resultados apresentados na Tabela 1, mostram:

- Tensões no terminal aberto da LT em vazio acima dos valores calculados pelo load-flow e com forte desequilíbrio em módulo.
- Potência reativa da LT em vazio acima dos valores esperados.
- Mesmo com as LT em carga foram observados grandes desequilíbrios nas tensões de barra de 230kV da SE Fortaleza.

Estes resultados permitiram diagnosticar que os problemas poderiam ser causados pela transposição das LT nos trechos P.Afonso/Milagres e Banabuiu/Fortaleza e pelo acoplamento entre os dois circuitos.

5.0 ENSAIOS x SIMULAÇÕES (ATP) -2ª Fase

Os ensaios realizados tiveram como objetivos:

- a) Confirmar o efeito do desequilíbrio nas sobretensões e comprovar o melhor comportamento da LT bem transposta.
- b) Validar e calibrar o modelo modal montado no ATP

5.1 Ensaio nas LT Milagres/Banabuiu04M4/04M5

As LT FEX neste trecho apresentam uma transposição simétrica, sendo o circuito 1 do tipo FEX (Figura 3) e o circuito 2 (Figura 1) convencional (antes da expansão do feixe).

5.1.1 Comportamento das LT em vazio

Na Tabela 2 estão indicados as tensões em Milagres, as tensões no terminal aberto da LT em vazio (Banabuiu) e as potências ativa e reativa na LT em vazio no terminal de Milagres.

TABELA 2 – Parâmetros medidos na LT M4 em vazio

Parâmetros	Medido nos ensaios de Campo		Calculado através do modelo ATP	
	M5 em carga	M5 aberta	M5 em carga	M5 aberta
Vab MLG (kV)	241,8	237,6	240,9	236,3
Vbc MLG (kV)	241,9	237,3	240,9	236,3
Vca MLG (kV)	238,9	234,0	240,9	236,3
Vab (kV)	253,6	249,3	253,9	247,6
Vbc (kV)	251,8	246,3	252,3	246,7
Vca (kV)	250,2	245,5	252,93	246,5
Qo (MVAr)	-86,7	-84,1	-88,0	-82,3
Po (MW)	2,20	0,42	3,03	0,46

Observando-se os valores da Tabela 2, conclui-se que:

- A tensão medida na barra de Milagres apresentou desequilíbrio e a tensão simulada foi equilibrada, com valor correspondente a média dos valores medidos.
- Com a LT Milagres-Banabuiu-04M5 em carga, o fluxo de potência ativa no terminal de MLG foi de 164 MW, com tensão média em BNB de 236,7 kV
- As simulações no ATP foram feitas com tensões equilibradas em MLG e BNB, com valores correspondentes a média dos valores medidos, e com ângulo entre as barras ajustado para reproduzir o fluxo de MW medido.
- Com a M5 em carga, a tensão e o MVAr na M4,

em vazio, aumentam.

Na Tabela 3 estão indicadas as tensões em Milagres, as tensões no terminal aberto da LT em vazio (Banabuiu) e as potências ativa e reativa na LT em vazio no terminal de Milagres.

TABELA 3 – Parâmetros medidos na LT M5 em vazio

Parâmetros	Medido nos ensaios de campo		Calculado através do modelo ATP	
	M4 em carga	M4 aberta	M4 em carga	M4 aberta
Vab MLG (kV)	240,9	242,4	239,9	241,0
Vbc MLG (kV)	241,2	241,4	239,9	241,0
Vca MLG (kV)	238,2	239,9	239,9	241,0
Vab (kV)	250,1	251,3	249,6	251,9
Vbc (kV)	248,2	248,6	249,2	251,2
Vca (kV)	248,0	249,1	249,9	252,3
Qo (MVA _r)	-70,8	-68,4	-69,7	-67,8
Po (MW)	-2,24	0,31	-2,25	0,29

Observando-se os valores da Tabela 3, conclui-se que:

- A tensão medida na barra de Milagres apresentou desequilíbrios e a tensão simulada foi equilibrada, com valor correspondente a média dos valores medidos.
- Com a M4 em carga, o fluxo de potência ativa no terminal de Milagres foi de 161 MW, com tensão média em BNB de 238,5 kV.
- As simulações no ATP foram com tensões equilibradas em Milagres e Banabuiu, com valores correspondentes à média dos valores medidos e com ângulo entre as barras ajustado para reproduzir o fluxo de MW medido.
- Com a M4 em carga, o MVAR na M5, em vazio, aumenta, e a tensão diminui.

5.1.2 Tensão induzida na LT aberta nos dois terminais com a outra LT em carga

Na Tabela 4 estão indicadas as tensões induzidas na LT aberta em Milagres e Banabuiu, as perdas na LT em carga e as correntes na LT em carga, no terminal de Milagres.

TABELA 4 – Parâmetros medidos na LT aberta

Parâmetros	Medido nos ensaios de Campo		Calculado através do modelo ATP	
	M4 aberta M5 em carga	M5 aberta M4 em carga	M4 aberta M5 em carga	M5 aberta M4 em carga
Va MLG (kV)	6,6	6,2	5,9	6,4
Vb MLG (kV)	4,8	7,2	5,4	7,3
Vc MLG (kV)	4,6	7,1	5,4	7,4
Va BNB	6,4	6,7	6,0	6,9

(kV)				
Vb BNB (kV)	5,3	6,6	5,8	7,0
Vc BNB (kV)	5,5	7,3	5,4	7,5
ΔP (%)	3,70	2,78	2,53	2,69
Ia MLG (A)	398	416	391	423
Ib MLG (A)	393	409	389	411
Ic MLG (A)	411	405	397	417

- As tensões medidas nas barras de Milagres e Banabuiu apresentaram desequilíbrios e a tensão simulada foi equilibrada, com valor correspondente a média dos valores medidos.
- Com a M5 em carga, o fluxo de potência ativa no terminal de Milagres foi de 162 MW, com tensão média em Milagres e Banabuiu de 240,4 kV e 235,8 kV, respectivamente.
- Com a M4 em carga, o fluxo de potência ativa no terminal de Milagres foi de 161 MW, com tensão média em Milagres e Banabuiu de 235,9 kV e 236,7 kV, respectivamente.
- As simulações no ATP foram com tensões equilibradas em Milagres e Banabuiu, com valores correspondentes a média dos valores medidos e com ângulo entre as barras ajustado para reproduzir o fluxo de MW medido.

5.1.3 Corrente induzida na LT aberta e aterrada com a outra LT em carga

Na Tabela 5 estão indicados as correntes induzidas na LT aberta e aterrada, em Milagres e Banabuiu, as perdas na LT em carga e as correntes na LT em carga, no terminal de Milagres.

TABELA 5 – Parâmetros medidos na LT aberta

Parâmetros	Medido nos ensaios de Campo		Calculado através do modelo ATP	
	M4 aberta M5 em carga	M5 aberta M4 em carga	M4 aberta M5 em carga	M5 aberta M4 em carga
Ia MLG (A)	17,6	14,8	18,5	14,4
Ib MLG (A)	20,5	16,0	19,4	15,5
Ic MLG (A)	12,6	18,6	15,7	16,3
Ia BNB (A)	15,4	11,7	17,6	17,2
Ib BNB (A)	17,0	16,2	14,3	16,2
Ic BNB (A)	9,2	16,7	13,9	17,9
ΔP (%)	3,12	2,93	3,42	2,76
Ia MLG (A)	343	431	340	434
Ib MLG (A)	337	421	338	421
Ic MLG (A)	355	416	348	426

- As tensões medidas na barras de Milagres e Banabuiu apresentaram desequilíbrios e a tensão simulada foi equilibrada, com valor correspondente a média dos valores medidos.

- Com a M5 em carga, o fluxo de potência ativa no terminal de Milagres foi de 138 MW, com tensão com média em Milagres e Banabuiu de 239,8 kV e 238,0 kV, respectivamente.
- Com a M4 em carga, o fluxo de potência ativa no terminal de Milagres foi de 166 MW, com tensão com média em Milagres e Banabuiu de 236,1 kV e 236,2 kV, respectivamente.
- As simulações no ATP foram realizadas com tensões equilibradas em Milagres e Banabuiu, com valores correspondentes a média dos valores medidos, e com ângulo entre as barras ajustado para reproduzir o fluxo de MW medido.

6.0 COMPARAÇÃO ENSAIOS X LOAD-FLOW

O comportamento da LT 04M4 em vazio, é resumido na Tabela 6. Estão indicados a tensão média em Milagres, a mesma utilizada nas simulações de load-flow, as tensões no terminal aberto da LT em vazio, as potências ativa e reativa na LT em vazio no terminal de Milagres. Da Tabela, observa-se que:

TABELA 6 – Parâmetros calculados para LT M4 em vazio

Parâmetros	Sem efeito do Acoplamento		Com efeito do Acoplamento	
	M5 em carga	M5 aberta	M5 em carga	M5 aberta
Vmed MLG(kV)	240,9	236,3	240,9	236,3
Vo(kV)	251,6	247,0	253,8 (*)	247,0
Qo (MVar)	-85,0	-81,8	-88,1	-81,8
Po (MW)	0,35	0,33	0,37	0,33

- Os valores de tensão no terminal aberto da LT medidos nos ensaios de campo são até 2,0 kV acima dos valores calculados no load-flow sem o efeito do acoplamento.
- Os valores de MVar na LT em vazio, medidos nos ensaios de campo, são cerca de 2,0 MVar acima dos valores calculados no load-flow sem o efeito do acoplamento.
- Com a LT M5 em carga e considerando o efeito do acoplamento, a tensão na LT em vazio é de 253,8 kV para um fator de acoplamento de 1,0069. Sem o fator de acoplamento a tensão seria de 252,1 kV, ou seja, 1,7 kV abaixo.

Na Tabela 7 estão indicadas a tensão média em Milagres, utilizadas nas simulações de load-flow, as tensões no terminal aberto da LT em vazio, as potências ativa e reativa na LT em vazio no terminal de Milagres. Desta Tabela conclui-se que:

TABELA 7 – Parâmetros calculados

para LT M5 em vazio

Parâmetros	Sem efeito do Acoplamento		Com efeito do Acoplamento	
	M5 em carga	M5 aberta	M5 em carga	M5 aberta
Vmed MLG(kV)	240,1	241,2	240,1	241,2
Vo(kV)	250,9	252,1	250,3 (*)	252,1
Qo (MVar)	-67,4	-68,0	-69,9	-68,0
Po (MW)	0,22	0,22	0,24	0,22

- Os valores de tensão no terminal aberto da LT medidos nos ensaios de campo são cerca de 0,8 kV abaixo dos valores calculados nos load-flow sem o efeito do acoplamento.
- Os valores de MVar na LT em vazio, medidos nos ensaios de campo, são até 3,0 MVar acima dos valores calculados no load-flow sem o efeito do acoplamento.
- Com a LT M4 em carga e considerando o efeito do acoplamento, a tensão na LT em vazio é de 250,3 kV para um fator de acoplamento de 0,9964. Sem o fator de acoplamento a tensão seria de 251,2 kV, ou seja, 0,9 kV acima.

OBS.: Nos cálculos de load-flow foram utilizadas as seguintes mútuas de sequência positiva:
 LT M4: $X_m = -0,0051 / R_m = -0,0035$
 LT M5: $X_m = -0,0041 / R_m = +0,0034$

7.0 CÁLCULO DO EFEITO DO ACOPLAMENTO NA TENSÃO DA LT EM VAZIO

O tratamento analítico de todos estes fenômenos indicou que os efeitos encontrados seriam tão mais evidentes quanto maior fosse o carregamento das linhas. Uma vez que os ensaios foram sempre feitos na manhã de Domingo, por conta da disponibilidade para tantas manobras nas linhas, os carregamentos não eram elevados.

Foram então simulados vários casos para se obter uma correlação da variação da tensão de terminal aberto com o aumento da potência na linha.

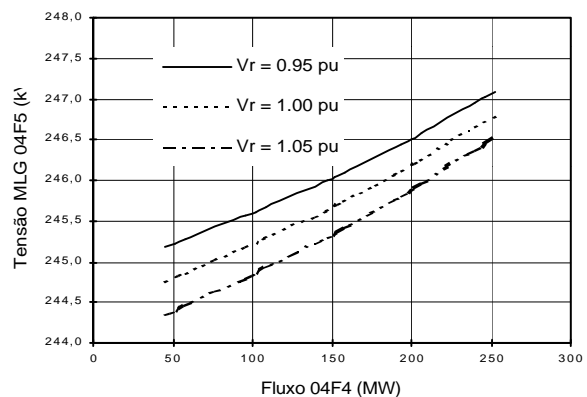


FIGURA 4

A Figura 4 mostra os valores calculados de tensão no terminal em vazio da LT 04F5 PAF-MLG, com a LT 04F4 em carga, em função do fluxo de potência ativa na LT 04F4, tendo como parâmetro a tensão V_r na barra receptora, para uma tensão de 230kV em PAF.

É importante salientar que estas LT podem ser carregadas com até 400MVA, o que levaria a valores ainda mais elevados de tensão no terminal aberto.

Como esta sobretensão é função também do sentido relativo do fluxo na linha em carga, já está em funcionamento um esquema de energização invertido. Ou seja fecha primeiro o terminal remoto (Milagres) e depois fecha o lado da geração em Paulo Afonso. Os estudos com a nova modelagem mostravam que isto reduziria a tensão, e isto já foi corroborado com valores de campo.

8.0 CÁLCULO DO EFEITO DO ACOPLAMENTO NA OFERTA DE REATIVO AO SISTEMA

O acoplamento de seqüência positiva tem como efeito uma redução da reatância série e um aumento da susceptância “shunt” da linha. Isto “faz surgir” um reativo adicional no sistema de transmissão. Na Figura 5 apresenta-se este efeito em função do carregamento da linha vizinha, por circuito e no trecho de menor comprimento.

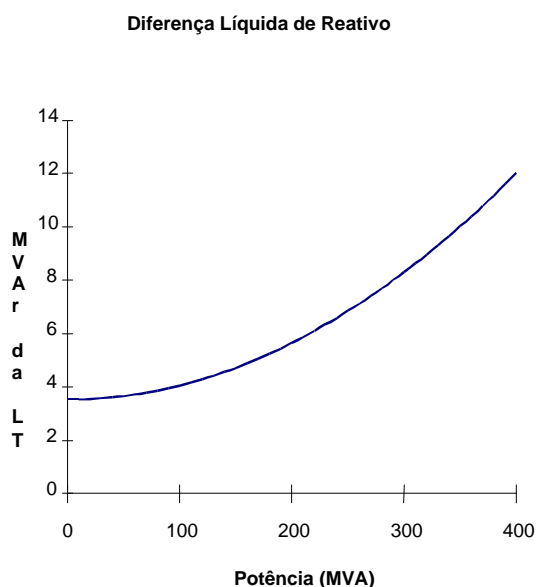


FIGURA 5- Variação do reativo adicional da LT em função da carga do circuito vizinho.

No caso das linhas FEX, o ganho de geração de Mvar por circuito, proporcionando pelo acoplamento de seqüência positiva, foi da ordem de 8,0% na condição de carga máxima. Este ganho é variável, sendo mais

acentuado quanto maior o comprimento da linha e o carregamento, justificando a diferença de até 50Mvar no carregamento dos compensadores estáticos, observada na operação em tempo real.

Este ganho proporcionado pelo acoplamento de seqüência positiva é importante para aumentar o limite de transmissão na carga máxima e, portanto, o esquema de transposição adotado preservou o acoplamento de seqüência positiva.

9.0 CONCLUSÕES

Os resultados dos ensaios e das simulações realizadas indicaram que os problemas eram causados pelo acoplamento entre os circuitos paralelos e pelas transposições inadequadas. Portanto, a solução adotada foi a adequação do esquema de transposição nos trechos PAF-MLG e BNB-FTZ e o desenvolvimento de uma metodologia para representar o acoplamento de seqüência positiva nas simulações de load-flow.

Dependendo do esquema de transposição e do faseamento adotado, o acoplamento de seqüência positiva reduz a impedância série e aumenta a susceptância “shunt” da linha. No caso das linhas FEX, o ganho de geração de Mvar, proporcionado pelo acoplamento de seqüência positiva, foi da ordem de 8,0% na condição de carga máxima. Este ganho é mais acentuado quanto maior o comprimento da linha e o carregamento.

Outro efeito importante do acoplamento é uma elevação ou redução da tensão no terminal aberto da linha em vazio, a depender do faseamento, estando o circuito paralelo em carga. Esta diferença também depende da magnitude e sentido do fluxo de MW e MVar, aumentando com o carregamento e podendo atingir valores de até 4kV para as linhas FEX, justificando as atuações aleatórias das proteções de sobretensão para uma mesma tensão pré-manobra.

Os problemas de operação com as linhas FEX da Área Norte não foram causados pela tecnologia de feixe expandido e sim pela não consideração nos estudos elétricos do efeito do acoplamento de seqüência positiva entre circuitos, agravado pelos desequilíbrios provocados pelas transposições inadequadas.

10 BIBLIOGRAFIA

[1] Recapacitação de Circuitos 230 kV com o Conceito de Feixe Expandido. Oswaldo Régis Jr, S. J. Gusmão Cavalcanti, Marcelo J. A. Maia, José Felipe A. G. Wavrik, Georgij Viktorovich Podporin - XIII SNPTEE, GLT, Camboriú, 1995.

[2] Linha de Potência Natural Elevada (LPNE): Adaptação do conceito para a recapacitação de linhas existentes Oswaldo Régis Jr, S. Gusmão Cavalcanti, Antônio Pessoa Neto, Fernando Dart. VII ERLAC-CE 22, 1997, Argentina.

