



GRUPO -IV

GRUPO DE ESTUDO GAT

ANÁLISE DA INSERÇÃO SEM SUCESSO DO REATOR 30 MVAR NO TERMINAL ABERTO DE RONDONÓPOLIS DEVIDO ÀS TENSÕES INDUZIDAS EM CIRCUITO 230 KV PARALELO ABERTO

Vanderlei Guimarães Machado* [1]

João Ferreira de Lima Filho**

Eber Hávila Rose *

*** Eletronorte**

**** Potência Engenharia**

RESUMO

Quando se manobra circuito em vazio e em paralelo com circuitos em operação e em carga, para o sucesso da manobra, normalmente as preocupações são voltadas para as tensões e correntes induzidas no circuito em vazio quando o mesmo tem reator paralelo para compensação reativa.

Estando o circuito vazio com seus terminais abertos, a manobra simples de inserção de seu reator, seja por disjuntor (reator manobrável) ou por chave (reator solidário), pode provocar sobretensões e sobrecorrentes induzidas, em função das características elétricas do circuito e do grau de compensação proporcionado pelo reator.

Isto aconteceu no sistema Mato Grosso, na configuração mostrada no Anexo 1, quando da tentativa de conexão do reator 30 Mvar/230 kV de Rondonópolis na LT aberta Barra do Peixe-Rondonópolis C1, resultando em atuação da proteção de sobrecorrente do referido reator e em insucesso da manobra.

O objetivo deste Informe Técnico é analisar, através de simulações digitais, as tensões e correntes induzidas no circuito 1 aberto da LT Barra do Peixe-Rondonópolis 230 kV, estando as linhas paralelas (C2 230 kV e C1 500 kV) em operação normal, com e sem o reator 30 Mvar/230 kV no terminal aberto Rondonópolis, visando buscar subsídios para justificar o insucesso da inserção deste reator durante o procedimento operativo da energização do circuito 1 com reator.

PALAVRAS-CHAVE

Tensões Induzidas, Proteção, Análise de Ocorrência, Transitórios Eletromagnéticos, Medição, Ressonância em linhas paralelas, Sequência Positiva e Sequência Zero.

1.0 - INTRODUÇÃO

A LT Barra do Peixe-Rondonópolis 230 kV C2 com 216,8 km, compacta, constituída com dois condutores por fase 795 MCM Tern, gera a vazio, com tensões nominais de 230 kV em seus terminais, 62,5 Mvar ("line charging").

Esta LT C2 é compensada por um reator 20 Mvar/230 kV no terminal Rondonópolis e possui grau de compensação de 32,0 %, considerando bypassada a compensação série existente no terminal Barra do Peixe.

A LT Barra do Peixe-Rondonópolis 230 kV C1 com 211,3 km, convencional, constituída por um condutor por fase 636 MCM Grosbeak, gera a vazio, com tensões nominais de 230 kV em seus terminais, 37,1 Mvar ("line charging").

Esta LT C1 compensada por reator 30 Mvar/230 kV no terminal Rondonópolis possui grau de compensação de 80,9 %, considerando bypassada a compensação série existente no terminal Barra do Peixe. Esta linha operou inicialmente desde Rio Verde até Rondonópolis com 452,6 km, compensada por este reator, sendo seccionada em Barra do Peixe no início de 2008.

Conforme Anexo 1, estes dois circuitos de 230 kV sofrem influência de indução eletromagnética de um circuito de 500 kV em paralelo, constituído por três condutores por fase 954 MCM.

No dia 10/05/08, a LT Barra do Peixe-Rondonópolis 230 kV C2 encontrava-se em operação normal e a LT Barra do Peixe-Rondonópolis 230 kV C1 estava desligada, com seus terminais abertos e não aterrados, em procedimento de preparação para energização, e com o reator 30 Mvar/230 kV no terminal Rondonópolis desconectado.

Nesta condição foram registradas em campo tensões induzidas pelas LTs Ribeirãozinho-Cuiabá 500 kV e Barra do Peixe-Rondonópolis C2 em operação, sobre a LT Barra do Peixe-Rondonópolis 230 kV C1 aberta sem reator, com

[1] vanderlei.machado@eletronorte.gov.br – Fone: + 55 (61) – 3429 – 6334. ELETRONORTE.

valor médio da ordem de 3,5 kV entre as fases A-B, B-C e C-A em ambos os terminais de Barra do Peixe e Rondonópolis, sem informações sobre a defasagem entre estas tensões.

Quando da conexão do reator 30 Mvar/230 kV de Rondonópolis na LT aberta Barra do Peixe-Rondonópolis C1, foi verificada atuação da proteção de neutro deste reator com registro de tensões fase neutro com valor médio de 65,7 kVef (65 kVef fase A, 64 kVef fase B e 68 kVef fase C), tensão residual de 208 kV (3V0) e tensões entre as fases A-B, B-C e C-A com valor médio de 2,7 kVef (2 kVef fase AB, 4 kVef fase BC e 2 kVef fase CA) e registro de correntes nas fases do reator com valor médio de 35,7 Aef (47,4 % da corrente nominal do reator) e corrente de neutro de 108 Aef (143,4 % da corrente nominal do reator), indicando tensões e correntes praticamente em fase, induzidas na LT aberta com o reator 30 Mvar/230 kV conectado no terminal de Rondonópolis e sugerindo análise de possível ressonância de seqüência zero.

As linhas de transmissão apresentam dois pontos onde ocorrem ressonâncias em regime permanente:

- Quando o grau de compensação de seqüência positiva $b_1=100\%$
- Quando o grau de compensação de seqüência zero $b_0 = C_0 / C_1$, sendo:
 - C0 a capacitância de seqüência zero da LT
 - C1 a capacitância de seqüência positiva da LT
 - b_0 o grau de compensação da LT considerando o valor de X0 de cada reator em lugar de X1
 - X0 a reatância de seqüência zero do reator de fase
 - X1 a reatância de seqüência positiva do reator de fase

No caso da LT Barra do Peixe-Rondonópolis 230 kV C1 com o reator 30 Mvar/230 kV solidamente aterrado em Rondonópolis, tem-se:

$b_1=80,9\%$, portanto, afastado 19,1 % do ponto de ressonância de seqüência positiva em regime permanente.
 $b_0 = 80,9\%$, considerando o reator solidamente aterrado.
 $C_0 = 6,2259$ nanofarads/km
 $C_1 = 8,7422$ nanofarads/km
 $C_0/C_1 = 71,2\%$, portanto, afastado 9,7 % do ponto de ressonância de seqüência zero em regime permanente.

As capacitâncias de seqüência zero C0 dependem também das características dielétricas do solo e o cálculo destas capacitâncias embute erros maiores que os associados às capacitâncias de seqüência positiva C1 e, considerando erro da ordem de 10 %, as tensões induzidas pelas LTs Ribeirãozinho-Cuiabá 500 kV e Barra do Peixe-Rondonópolis C2 em operação, sobre a LT Barra do Peixe-Rondonópolis 230 kV C1 aberta com reator 30 Mvar/230 kV em Rondonópolis teriam excitado a freqüência de ressonância de seqüência zero do circuito aberto e teriam provocado as tensões e correntes elevadas de fase e de neutro registradas na ocorrência 10/05/08 no sistema Mato Grosso.

2.0 - CONFIGURAÇÃO BASE E DADOS UTILIZADOS

A configuração base do Anexo 1 foi montada no ATP (Alternative Transients Program) com as LTs Ribeirãozinho-Cuiabá 500 kV e Barra do Peixe-Rondonópolis C2 em operação com carga e a LT Barra do Peixe-Rondonópolis 230 kV C1 aberta, tomando-se a configuração do campo no dia da ocorrência (10/05/08), com utilização de equivalentes em Barra do Peixe 230 kV e em Ribeirãozinho 500 kV, com simulação dos principais componentes, como a seguir descrito.

Os parâmetros das linhas com acoplamento eletromagnético foram calculados com a rotina Line Constants, com resultados para um trecho 'PI' de 17,6 km mostrado no Anexo 2.

As linhas foram representadas por 'PIs' acoplados de 17,6 km, considerando-se transposição 1/6, 1/3, 1/3 e 1/6.

A LT 500 kV (388 km) foi representada por 4 'PIs' na seqüência ABC e 8 'PIs' na seqüência BCA, não sendo representado o trecho que vai de Rondonópolis até Cuiabá. As LTs 230 kV foram representadas por 2 'PIs' na seqüência ABC, 4 'PIs' na seqüência BCA, 4 'PIs' na seqüência CAB e 2 'PIs' na seqüência ABC.

3.0 - RESULTADOS E ANÁLISE

3.1 LT Barra do Peixe-Rondonópolis 230 kV sem Reator

Simulações realizadas na configuração do Anexo 1, mostram tensões induzidas pelas LTs Ribeirãozinho-Cuiabá 500 kV e Barra do Peixe-Rondonópolis C2 em operação, sobre a LT Barra do Peixe-Rondonópolis 230 kV C1 aberta sem reator, com valor médio de 9,15 kVef fase-terra e com defasagem média de apenas 1,8 graus, no terminal de Rondonópolis, conforme figura 3.1-1.

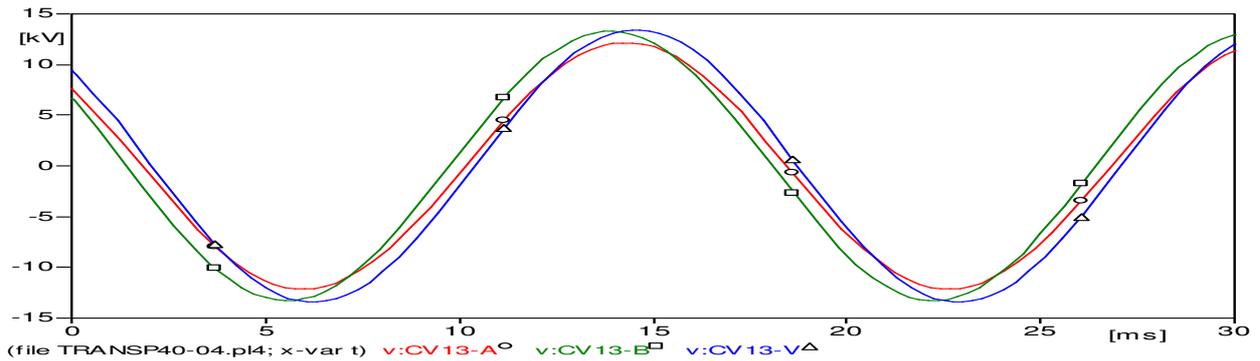


Figura 3.1-1 Tensões fase-terra no terminal aberto Rondonópolis 230 kV sem reator

A figura 3.1-2 mostra as tensões fase-fase, com valor médio de 1,8 kVef no terminal de Rondonópolis.

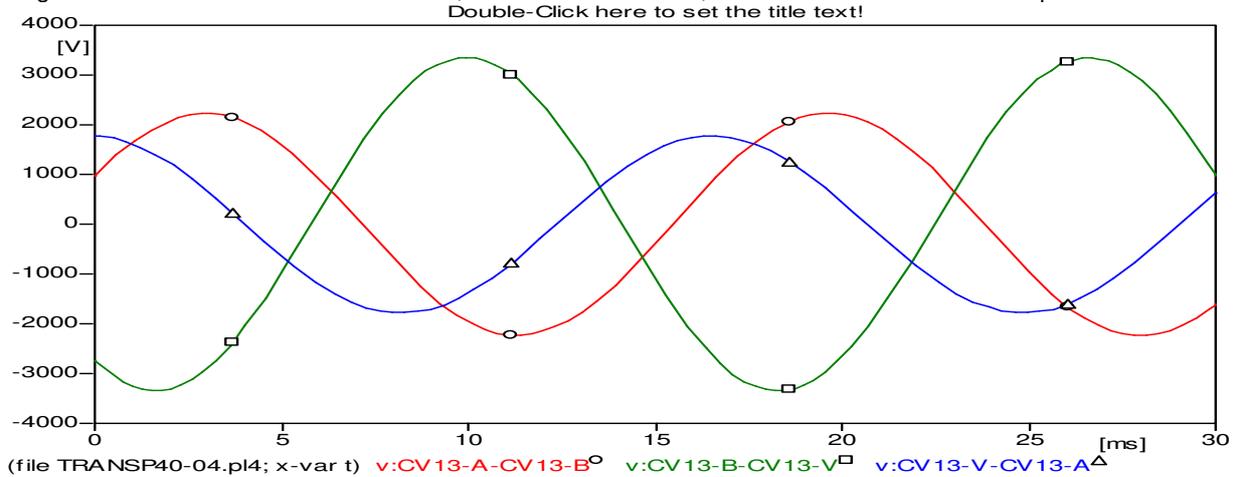


Figura 3.1-2 Tensões fase-fase no terminal aberto Rondonópolis 230 kV sem reator

Observe-se que a informação de registro em campo para as tensões entre fases no terminal vazio e sem reator de Rondonópolis 230 kV é de 3,5 kVef, frente ao valor simulado de 1,8 kVef.

Considerando que a medição de campo de 3,5 kV representa apenas 1,5 % da tensão nominal de 230 kV (medição no início da escala) está sujeita a imprecisões inerentes ao processo de medição, o valor simulado de 1,8 kVef é consistente e estes valores medidos e simulados mostram a baixa tensão induzida na LT Barra do Peixe-Rondonópolis 230 kV C1 aberta e sem reator, como era de se esperar.

3.2 LT Barra do Peixe-Rondonópolis 230 kV com Reator

Simulações realizadas na configuração do Anexo 1, mostram tensões induzidas pelas LTs Ribeirãozinho-Cuiabá 500 kV e Barra do Peixe-Rondonópolis C2 em operação, sobre a LT Barra do Peixe-Rondonópolis 230 kV C1 aberta com reator 30 Mvar/230 kV no terminal de Rondonópolis, com valor médio de 69,6 kVef fase-terra (71,6 kVef fase A, 70,1 kVef fase B e 67,1 kVef fase C) e com defasagem média de apenas 0,8 graus, no terminal de Rondonópolis, conforme figura 3.2-1.

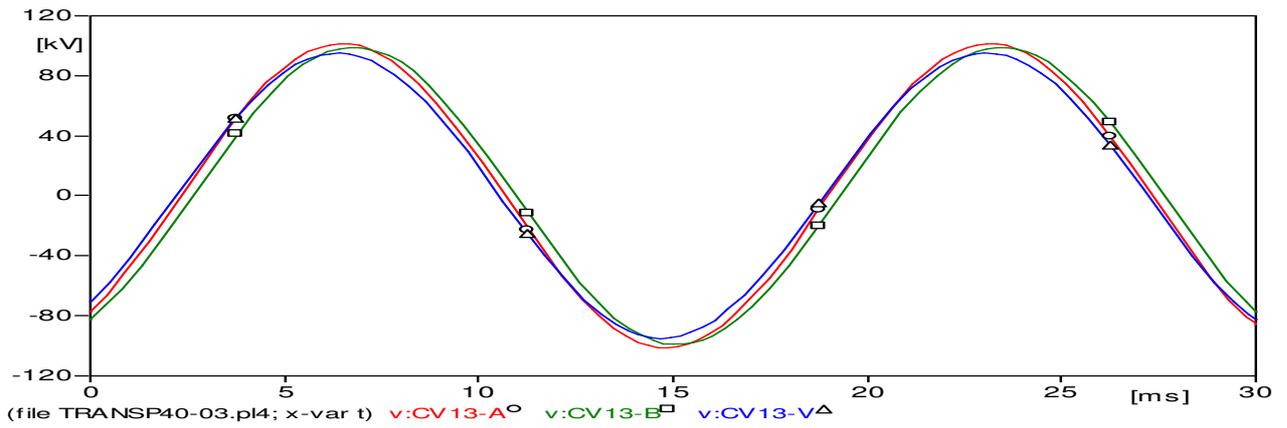


Figura 3.2-1 Tensões fase-terra no terminal aberto Rondonópolis 230 kV com reator

A figura 3.2-2 mostra as tensões fase-fase, com valor médio 8,03 kVef (7,97 kVef fase AB, 10,8 kVef fase BC e 5,32 kVef fase CA) no terminal aberto de Rondonópolis 230 kV com reator.

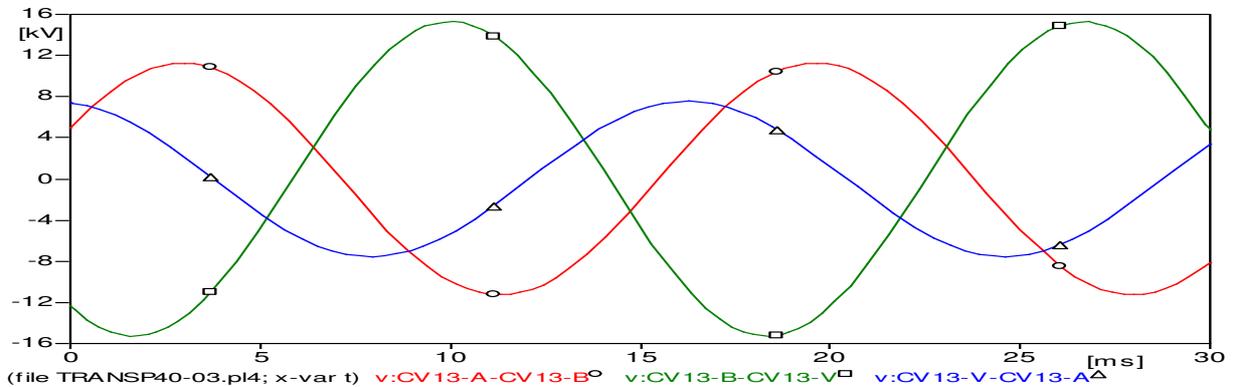


Figura 3.2-2 Tensões fase-fase no terminal aberto Rondonópolis 230 kV com reator

A figura 3.2-3 mostra as correntes de fase no reator 30 Mvar/230 kV de Rondonópolis, com valor médio de 39,4 Aef (40,6 Aef fase A, 39,7 Aef fase B e 38,0 Aef fase C).

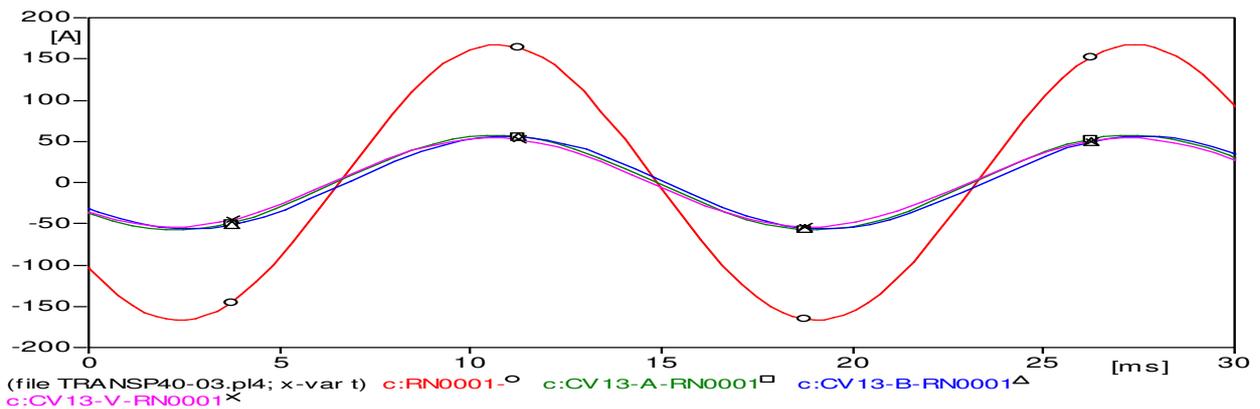


Figura 3.2-3 Correntes de fase no reator 30 Mvar/230 kV de Rondonópolis

A figura 3.2-3 mostra, também, a corrente de neutro no reator 30 Mvar/230 kV de Rondonópolis, com valor 118,2 Aef.

A análise comparativa simulação x medição em campo das tensões induzidas na LT Barra do Peixe-Rondonópolis 230 kV C1, no terminal Rondonópolis, com reator 30 Mvar/230 kV, é mais bem visualizada na tabela 3.2-1.

Tabela 3.2-1 Análise Comparativa Simulação x Medição em Campo com Reator

GRANDEZA	FASE	SIMULAÇÃO	MEDIÇÃO
TENSÃO FASE-NEUTRO	AN	71,6 kVef	65,0 kVef
	BN	70,1 kVef	64,0 kVef
	VN	67,1 kVef	68,0 kVef
TENSÃO FASE-FASE	AB	7,97 kVef	2,00 kVef
	BC	10,8 kVef	4,00 kVef
	CA	5,32 kVef	2,00 kVef
CORRENTE DE FASE NO REATOR	A	40,6 Aef	35,0 Aef
	B	39,7 Aef	35,0 Aef
	C	38,0 Aef	37,0 Aef
CORRENTE DE NEUTRO NO REATOR	N	118,2 Aef	108,0 Aef

Observe-se que a informação de registro em campo para a tensões entre fases no terminal vazio e com reator de Rondonópolis 30 Mvar/230 kV é de 2,0 kVef e 4,0 kVef, frente aos respectivos valores simulados de 5,32 kVef e 10,8 kVef.

Considerando que a medições em campo de 2 kV e 4 kV representam, respectivamente, apenas 0,9 % e 1,8 % da tensão nominal de 230 kV (medições no início da escala), estão sujeitas a imprecisões inerentes ao processo de medição. Os valores simulados de 5,32 kVef e 10,8 kVef são consistentes.

Os valores de tensão fase-neutro e os valores de corrente de fase e neutro se apresentaram dentro de margem de erro aceitáveis para análise comparativa simulação x medição em campo.

4.0 - CONCLUSÃO

É de fundamental importância a análise prévia de tensões e correntes induzidas em circuitos compensados, a serem manobrados em vazio e que correm paralelos a circuitos em carga, para se evitar insucesso na manobra e manter a integridade física dos equipamentos associados aos circuitos sob manobra e garantir a segurança pessoal.

O cálculo teórico de ressonância de sequência zero indicou um afastamento em torno de 10% do ponto de ressonância, mesmo assim foram encontradas tensões e correntes induzidas elevadas. Isto ocorreu em função de alguma variação entre a análise teórica e os valores práticos, mas principalmente pela alta indução provocada pelo circuito de 500 kV. Nestes casos são imprescindíveis as simulações com ATP com representação detalhada.

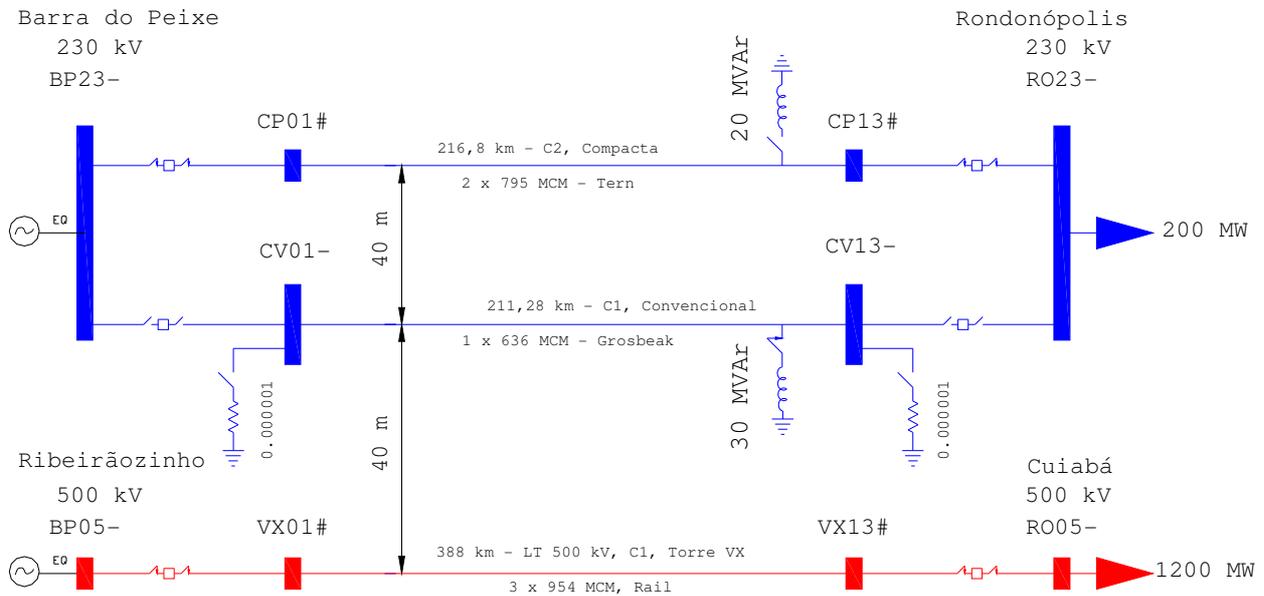
Foi verificada uma significativa influência da correta representação das transposições, principalmente do circuito de 500 kV, nos resultados.

O programa ATP (Alternative Transients Program) é adequado para análise de tensões e correntes induzidas em circuito aberto devidas ao acoplamento eletromagnético de circuitos em carga, desde que se modele adequadamente este acoplamento através da rotina Line Constants.

A representação da linha por modelo 'PI' em cascata com transposição 1/6, 1/3, 1/3 e 1/6 se mostrou adequada para reproduzir consistentemente as tensões e correntes induzidas medidas em campo.

Os registros em campo de baixo valores de tensão (cerca de 2 % da tensão nominal) parecem embutir maior imprecisão, inerente ao processo de medição, que os registros de valores mais elevados (cerca de 50 % da tensão nominal).

ANEXO 1 – CONFIGURAÇÃO ATP



ANEXO 2 – ARQUIVO ATP LINE CONSTANTS

```

BEGIN NEW DATA CASE
LINE CONSTANTS
METRIC
BRANCH CV01-ACV02-ACV01-BCV02-BCV01-VCV02-VCP01#ACP02#ACP01#BCP02#BCP01#VCP02#V
BRANCH CG01#ACG02#ACG01#BCG02#BCG01#VCG02#V
$ERASE
C
C Arquivo: BPRD3LT.ATP
C
C CALCULO DE PARAMETROS DE LT 230 KV - TORRE CONVENCIONAL
C
C Condutor 1 x Grosbeak 636 MCM/fase 775 A 374.3 mm2 CAA
C
C Parela, a 40 m, LT 230 kV Compacta, Torre Raquete
C
C Condutor 2 x Tern 795 MCM/Fase 2 x 875 A 2 x 431,6 mm2 CAA
C
C Paralela, a 50 m, LT 500 kV Cara de Gato
C
C Condutor 3 x 954 MCM/Fase 3 x 980 A
C
C Cabos PR: EHS * 5/16   Diametro: 0.7920 cm
C
C LTs utilizadas no trecho
C Barra do Peixe - Rondonopolis - C1
C
C Temperatura a 60 Graus Centigrados
C
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
C 000000001111111111222222222233333333334444444444555555555566666666667777777777
C
C 4-8 9-16 19-26 27-34 35-42 43-50 51-58 59-66 67-72
C I FI FI FI FI FI FI FI FI F I F
C SKIN RESIS REACT DIAM HORIZ VTOWER VMID SEPAR ALPHA

```

C CIRCUITO 1 - LT 230 kV - 1 x 636 MCM - Convencional

1.3157	.104398	4	2.5146	-46.50	30.000	7.500
2.3157	.104398	4	2.5146	-40.00	30.000	7.500
3.3157	.104398	4	2.5146	-33.50	30.000	7.500

C CIRCUITO 2 - LT 230 kV - 2 x 795 MCM - Compacta Raquete

4.3749	.080635	4	2.7000	-2.679	30.000	7.500
4.3749	.080635	4	2.7000	-2.221	30.000	7.500
5.3749	.080635	4	2.7000	-0.229	32.500	10.000
5.3749	.080635	4	2.7000	0.229	32.500	10.000
6.3749	.080635	4	2.7000	2.221	30.000	7.500
6.3749	.080635	4	2.7000	2.679	30.000	7.500

C CIRCUITO 3 - LT 500 kV - 3 x 954 MCM - Cara de Gato

7.3751	.069598	4	2.9591	39.771	30.396	9.396
7.3751	.069598	4	2.9591	40.229	30.396	9.396
7.3751	.069598	4	2.9591	40.000	30.000	9.000
8.3751	.069598	4	2.9591	49.771	35.296	14.296
8.3751	.069598	4	2.9591	50.229	35.296	14.296
8.3751	.069598	4	2.9591	50.000	34.900	13.900
9.3751	.069598	4	2.9591	59.771	30.396	9.396
9.3751	.069598	4	2.9591	60.229	30.396	9.396
9.3751	.069598	4	2.9591	60.000	30.000	9.000

C CIRCUITO 1 Cabos Para Raios

0.5000	4.25261	4	0.7920	-44.70	35.700	15.450
0.5000	4.25261	4	0.7920	-35.30	35.700	15.450

C CIRCUITO 2 Cabos Para Raios

0.5000	4.13364	4	0.7920	-2.450	35.150	22.900
0.5000	4.13364	4	0.7920	2.450	35.150	22.900

C CIRCUITO 3 Cabos Para Raios

0.5000	3.28153	4	0.9140	41.350	40.296	21.396
0.5000	3.28153	4	0.9140	58.650	40.296	21.396

BLANK - FIM DOS DADOS DE CONDUTORES

C 1000.0	60.0	1	111 111	1 001.000	0
1000.0	60.0	1		17.6063	0 44

\$PUNCH

BRANCH CV01-ACV02-ACV01-BCV02-BCV01-VCV02-VCP01#ACP02#ACP01#BCP02#BCP01#VCP02#V

BRANCH CG01#ACG02#ACG01#BCG02#BCG01#VCG02#V

BLANK - FIM DOS DADOS DE CONDUTORES

BLANK - FIM DO CALCULO DE PARAMETROS DE LINHA

BEGIN NEW DATA CASE

BLANK - FIM DO CASO