

ENERGIZAÇÃO A VAZIO DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO TRIFÁSICA - ESTUDO COMPARATIVO TNA X EMTP - EFEI

Prof. Paulo César Rosa
Professor Auxiliar 3 da EFEI
Prof. José Tarcísio Assunção
FEI São João Del Rei - MG
Prof. João Roberto Cogo
Professor Adjunto da EFEI

Artigo publicado na Revista Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico
Vol. XII nº 2, 1986 - pág.: 37 a 55

RESUMO

Devido à necessidade de resistir a oscilação de tensão provenientes de chaveamento, e em que estas afetam consideravelmente o custo de um sistema; é importante uma estimativa precisa das sobre tensões de chaveamento sob várias condições de operação.

Conseqüentemente, é necessário assegurar que ao fazer um estudo de sobre tensões de chaveamento, que se conheça quais os fatores que podem afetar o resultado e que precisão pode ser obtida.

Atualmente o cálculo das oscilações de chaveamento, podem ser feitos no TNA (Transient Network Analyser) ou Computadores Digitais e a precisão dos resultados de ambos os métodos será afetada pelo modo pelo qual o sistema é representado.

Neste trabalho foram comparados os resultados obtidos por várias Empresas e Universidades nos ensaios de uma linha de transmissão em TNA com os resultados do programa para computadores digitais EMTP (versão EFEI).

ABSTRACT

The need to withstand the switching surges can affect the cost of a system considerably so that an accurate estimate of switching overvoltages under various conditions of operation is important. It is, therefore, necessary to ensure that in making a study of switching surges should know what factors may affect the result and what accuracy can be attained.

At the present, a transient network analyzer (TNA) or a digital computer is used the accuracy of calculation will be affected by the way in which the real system is represented.

In this work is presented a comparison of results obtained of several working groups with the program for digital computers EMTP (EFEI version).

1 - FATORES QUE AFETAM OS RESULTADOS

1.1 - INTRODUÇÃO

Os resultados de alguns estudos feitos em diferentes TNA's podem diferir um do outro por muitas razões. Algumas destas estão associadas com a representação do sistema real em um modelo, outras, com a performance do modelo propriamente dito.

Na modelagem de sistemas requer-se decisões quanto á escolha dos materiais usados na representação das indutâncias e resistências de seqüência positiva em função da freqüência, o comportamento do retorno de terra, o número de seções PI usadas na representação das linhas, etc.

Nos testes descritos aqui, a representação dos circuitos está em concordância com a representação utilizada por todos os participantes, de modo que algumas variações são próprias da construção e do uso dos modelos. Estas variações podem dar origem a diferenças, tanto aleatórias quanto sistemáticas, entre resultados individuais.

Diferenças aleatórias podem ser causadas por ligeiras imprecisões no instante de chaveamento, pela flutuação do ponto de referência das tensões ou pela posição da linha zero nos oscilogramas e na sua leitura. Algumas podem também originar-se de pequenas diferenças entre as características dos modelos de elementos em determinado TNA.

Diferenças sistemáticas entre os resultados de diferentes TNA's pode originar-se de diferentes métodos de modelagem dos elementos conduzindo a diferentes características de amortecimento, ligeiras não-linearidades e diferentes resistências, indutâncias e capacitâncias de fuga. A necessidade de selecionar o valor discreto mais próximo do calculado, pode também originar diferenças sistemáticas.

2 - PARTICIPANTES DO TESTE

Os testes em TNA foram realizados por várias instituições utilizando o mesmo modelo do circuito para permitir a comparação dos resultados. Logo abaixo é citado os nomes dos participantes.

- AEG, Alemanha;
- Brown Boveri (BBC) Suíça;
- CESI, Itália;
- Electricité de France (EDF), França;
- Electrical Research Association (ERA);
- Eidgenossische Technische Hochschule (ETH);
- General Electric (GE) - Estados Unidos;
- Siemens, Alemanha;
- Westinghouse (W), Estados Unidos.

3 - COMPARAÇÃO DOS TESTES E SIMULAÇÃO DIGITAL

O circuito representado para os testes de comparação está mostrado na FIGURA 1. Trata-se de uma linha trifásica de 400 [KV] e 202,8 [Km] com as seguintes características:

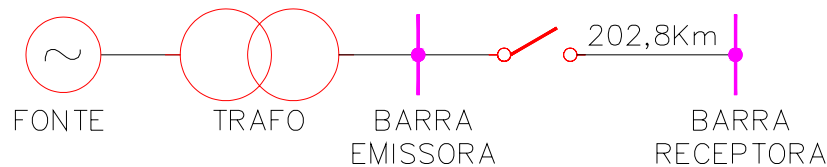


FIGURA 1 - SISTEMAS USADOS PARA OS TESTES

3.1 - FONTE

A fonte foi considerada como uma indutância concentrada com impedância de seqüência positiva e negativa iguais. Dois valores para impedância foram usados; 127 e 255 [Ω] puramente indutiva à 50 [Hz].

Tensão nominal igual a 400 [KV], logo tensão fase-terra (de pico) é igual a 326,6 [KV].

3.2 - LINHA DE TRANSMISSÃO

A linha de transmissão possui as seguintes características:

- reatância de seqüência positiva: $X_1 = 0,318 \Omega/ Km$
- capacitância de seqüência positiva: $C_1 = 11,86 nF/ Km$
- resistência de seqüência positiva: $R_1 = 0,03953 \Omega/ Km$
- reatância de seqüência zero: $X_0 = 1,015 \Omega/ Km$
- capacitância de seqüência zero: $C_0 = 7,66 nF/ Km$
- resistência de seqüência zero: $R_0 = 0,26133 \Omega/ Km$

A linha foi considerada perfeitamente simétrica e representada por doze seções PI. Nos modelos o amortecimento foi considerado como resistência variável com a frequência, conforme mostra o gráfico da FIGURA 2.

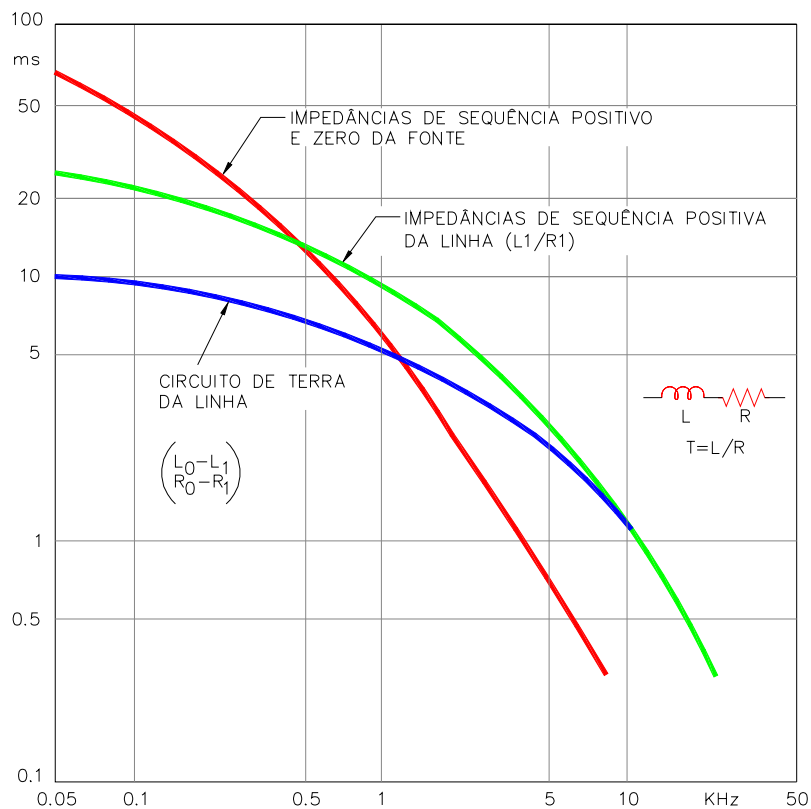


FIGURA 2 - CONSTANTES DE TEMPO DOS ELEMENTOS DOS TNA's X FREQUÊNCIA

Na simulação digital (programa EMPT-EFEI), a linha foi considerada perfeitamente transposta e representada pelo modelo de parâmetros distribuídos com resistência concentrada (modelo trifásico), e susceptâncias:

$$B_1 = 3,7259 \mu\text{mho} / \text{Km}$$

$$B_0 = 2,4065 \mu\text{mho} / \text{Km}$$

Na FIGURA 3, tem-se o modelo usado na simulação digital.

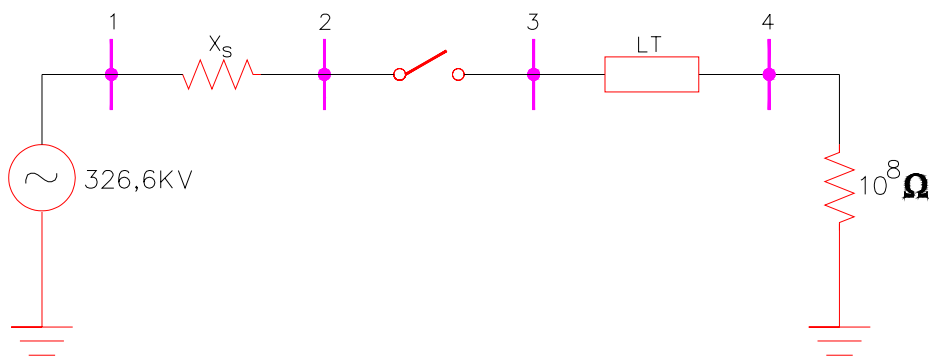


FIGURA 3 - MODELO DO SISTEMA USADO NA SIMULAÇÃO DIGITAL
 X_s - IMPEDÂNCIA DA FONTE
 LT - PARÂMETROS DA LT (R, X, B)

4 - TESTES E COMPARAÇÕES FEITAS

Foram comparados dois testes (TNA X EMTP - EFEI), todos com a linha em vazio, sem cargas residuais, como segue:

Teste A: Fechamento monopolar no pico da tensão da fonte (fase R), modelo do transformador omitido;

Teste B: Fechamento tripolar com dispersão dos pólos do disjuntor, modelo do transformador omitido; na seguinte seqüência:

Fase R - fechada 3,05 [ms] após a referência de tensão;

Fase S - fechada 8,05 [ms] após a referência de tensão;

Fase T - fechada 5,55 [ms] após a referência de tensão.

É tomada como referência de tensão, a passagem da tensão por zero vinda de negativo para positivo. Consegue-se localizar esta referência no programa EMTP, tomando os seguintes ângulos de fase para a tensão da fonte:

$$\text{Fase R} = V_{\phi N} \underline{270^\circ}$$

$$\text{Fase S} = V_{\phi N} \underline{150^\circ}$$

$$\text{Fase T} = V_{\phi N} \underline{30^\circ}$$

e mantendo os tempos de fechamento citados para o teste B. No teste A faz-se o tempo de fechamento igual a 5 [ms] (pico de tensão).

5 - CONCLUSÕES

Em todos os testes, os oscilogramas foram feitos nas sobre tensões fase-terra tanto no lado emissor como no lado receptor da linha. Uma escala comum foi usada em todos os TNA's para facilitar as comparações. Todas as tensões foram expressas em pu tendo como base a tensão da barra antes do fechamento (326,6 [KV] - fase-terra).

A máxima sobre tensão para condição medida e simulada é mostrada na TABELA 1 para uma fonte de impedância de 255 [Ω] e na TABELA 2 uma impedância de fonte de 127 [Ω]. Para cada teste, o valor médio das sobre tensões medidas foram calculadas. As diferenças entre os valores médios e as maiores e menores sobre tensões medidas são expressas como porcentagem da média em cada caso.

TABELA 1 - SOBRE TENSÕES OBTIDAS EM TNA E EMTP-EFEI $X_{\text{fonte}} = 255 [\Omega]$

Essai Test	Surtension Overvoltage		AEG (p.u)*	CEST ₁ (p.u)	CEST ₂ (p.u)	ERA (p.u)	ETH (p.u)	G.E. (p.u)	Siemens (p.u)	W (p.u)	BBC (p.u)	Valeur Moyenne Mean value (p.u)	Differences (%) **	EGU (p.u)	Monash (p.u)	EMPT EFEI	DIF.
	$\frac{At}{a}$	Phase															
a	D S.E.	R	2.12	2.00	2.05	1.90	2.03	2.05	2.05	1.95	2.10	2.03	+ 4.5 - 6.5	2.00	2.05	2.09	1.44 - 9.1
	A R.E.	R	2.40	2.34	2.39	2.19	2.38	2.30	2.35	2.15	2.40	2.32	+ 3.5 - 7.3	2.10	2.31	2.48	- 3.2 - 13
b	D S.E.	R	1.67	1.69	1.71	1.63	1.68	1.70	1.60	1.65	1.70	1.67	+ 2.4 - 4.2	1.57	1.72	2.24	- 23 - 27
	D S.E.	S	2.05	2.06	2.13	1.98	1.98	2.00	2.00	2.10	1.98	2.03	+ 5 - 3.0	1.90	1.98	2.19	- 2.7 - 9.6
	D S.E.	T	1.95	1.97	2.08	1.99	1.98	2.00	2.05	1.90	1.85	1.98	+ 5 - 6.5	1.75	1.91	2.04	1.96 - 9.3
	A R.E.	R	1.84	1.97	1.92	1.83	1.88	1.90	1.85	1.85	1.85	1.87	+ 5.4 - 2.1	1.71	1.87	2.51	- 21.5 - 27.1
	A R.E.	S	2.34	2.31	2.37	2.14	2.33	2.25	2.20	2.30	2.10	2.26	+ 4.9 - 7.1	2.20	2.20	2.49	- 4.8 - 15.7
	A R.E.	T	2.12	2.37	2.28	2.26	2.21	2.20	2.25	2.15	2.16	2.22	+ 6.8 - 4.5	2.10	2.21	2.30	3.04 - 7.83

(*) p.u. de la tension de barres avant la manoeuvre de fermeture.

(**) differences em p. 100 de la valeur moyenne prise comme base.

(*) p.u. of the bus-bar voltage before the closing operation.

(**) Differences in % on mean value base.

TABELA 2 - SOBRE TENSÕES OBTIDAS EM TNA E EMTP-EFEI $X_{\text{fonte}} = 127 [\Omega]$

Essai Test	Surtension Overvoltage		AEG (p.u)*	BBC (p.u)	CEST ₂ (p.u)	EDF (p.u)	ERA (p.u)	ETH (p.u)	GE (p.u)	W (p.u)	Valeur Moyenne Mean value (p.u)	Differences (%) **	EGU (p.u)	Monash	EMPT EFEI	DIF.
	$\frac{At}{a}$	Phase														
a	D S.E.	R	1.42	-	1.46	1.50	1.42	1.50	1.47	1.55	1.47	+ 5 - 3.5	1.38	1.35	1.42	4.73 - 4.05
	A R.E.	R	1.85	-	1.83	1.85	1.72	1.80	1.70	1.80	1.79	+ 3.5 - 5	1.81	1.78	1.87	- 1.1 - 9.1
	D S.E.	R	1.58	1.55	1.63	1.50	1.59	1.60	1.55	1.60	1.57	+ 4 - 4.5	1.49	1.55	1.62	0.62 - 7.4
	D S.E.	S	1.62	1.70	1.78	1.75	1.72	1.75	1.73	1.65	1.71	+ 4 - 5.5	1.63	1.67	1.575	13 2.85
b	D S.E.	T	1.72	1.89	1.87	1.85	1.83	1.85	1.73	1.70	1.80	+ 5.0 - 5.5	1.77	1.70	1.853	1.9 - 8.26
	A R.E.	R	2.03	2.05	2.08	2.00	2.05	2.10	2.00	2.05	2.04	+ 3 - 2	2.09	1.98	2.088	0.6 - 4.2
	A R.E.	S	2.12	2.16	2.18	2.05	2.21	2.25	2.10	2.00	2.13	+ 5.5 - 6.0	1.81	2.06	2.187	2.88 - 8.55
	A R.E.	T	2.26	2.15	2.37	2.35	2.31	2.35	2.31	2.20	2.29	+ 3.5 - 6.5	2.09	2.19	2.32	1.29 - 7.33

(*) p.u. de la tension de barres avant la manoeuvre de fermeture.

(**) differences em p. 100 de la valeur moyenne prise comme base.

(*) p.u. of the bus-bar voltage before the closing operation.

(**) Differences in % on mean value base.

Na FIGURA 4 é mostrada as superposições das curvas de sobre tensões obtidas nos TNA's, para a fase S, no terminal receptor da linha e $X_{\text{fonte}} = 127 \text{ } [\Omega]$. Na FIGURA 5 tem-se o mesmo estudo, agora obtido através do programa EMTP versão EFEI.

A seguir são apresentadas as curvas resultantes da simulação no EMTP-EFEI para os casos estudados (testes A e B).

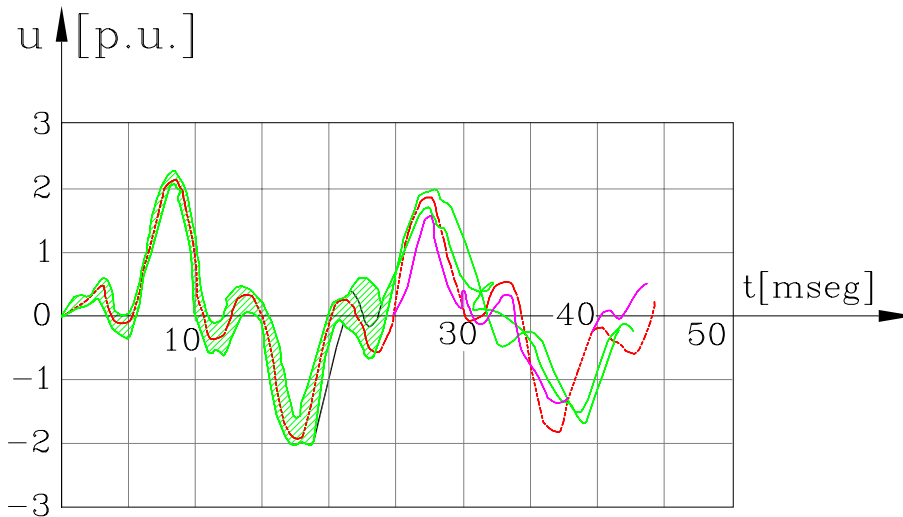


FIGURA 4 - SUPERPOSIÇÃO DOS OSCILOGRAMAS DO TESTE B ($X_{\text{fonte}} = 127 \text{ } [\Omega]$), FASE S, TERMINAL RECEPTOR DA LINHA

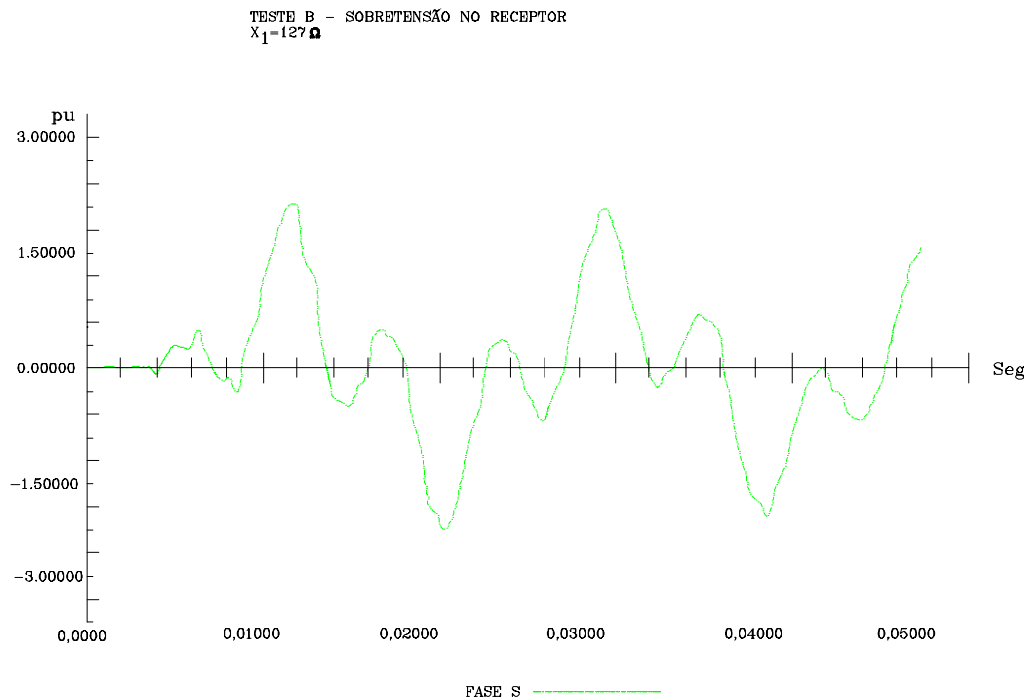
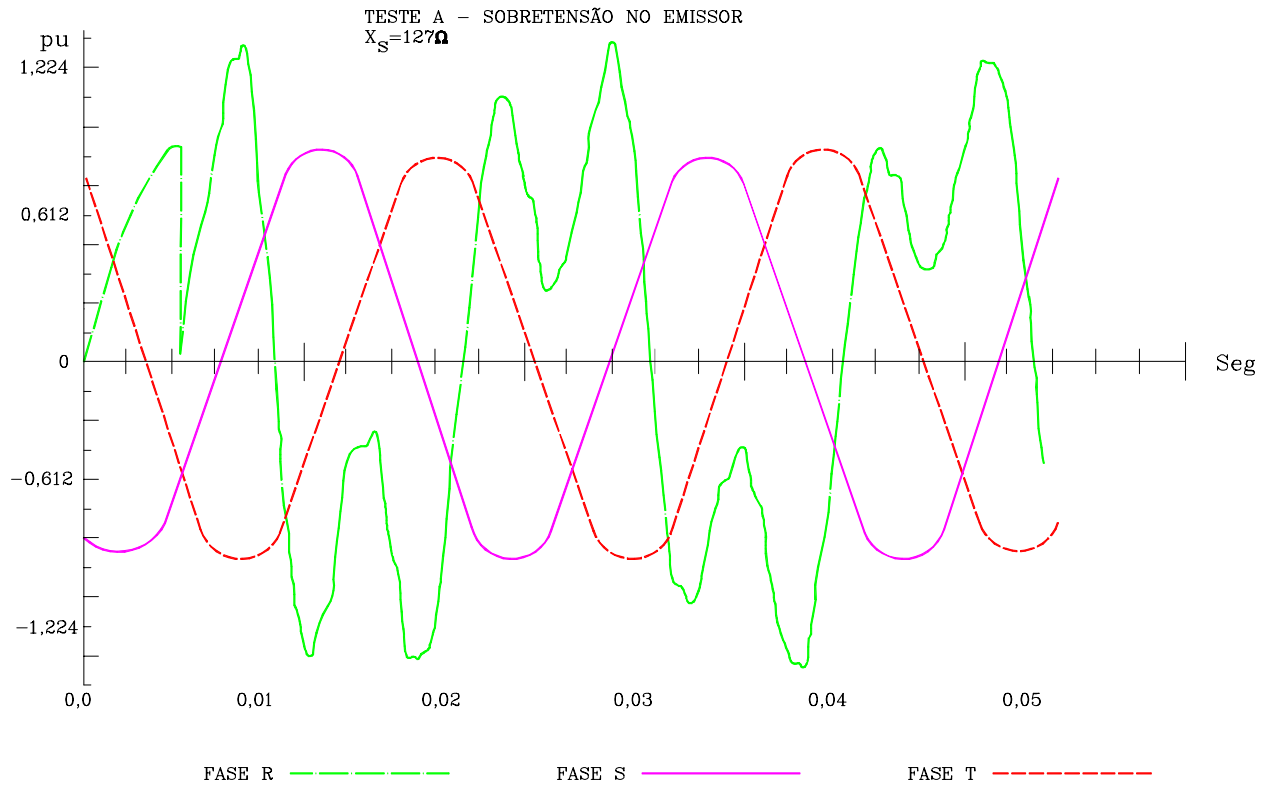
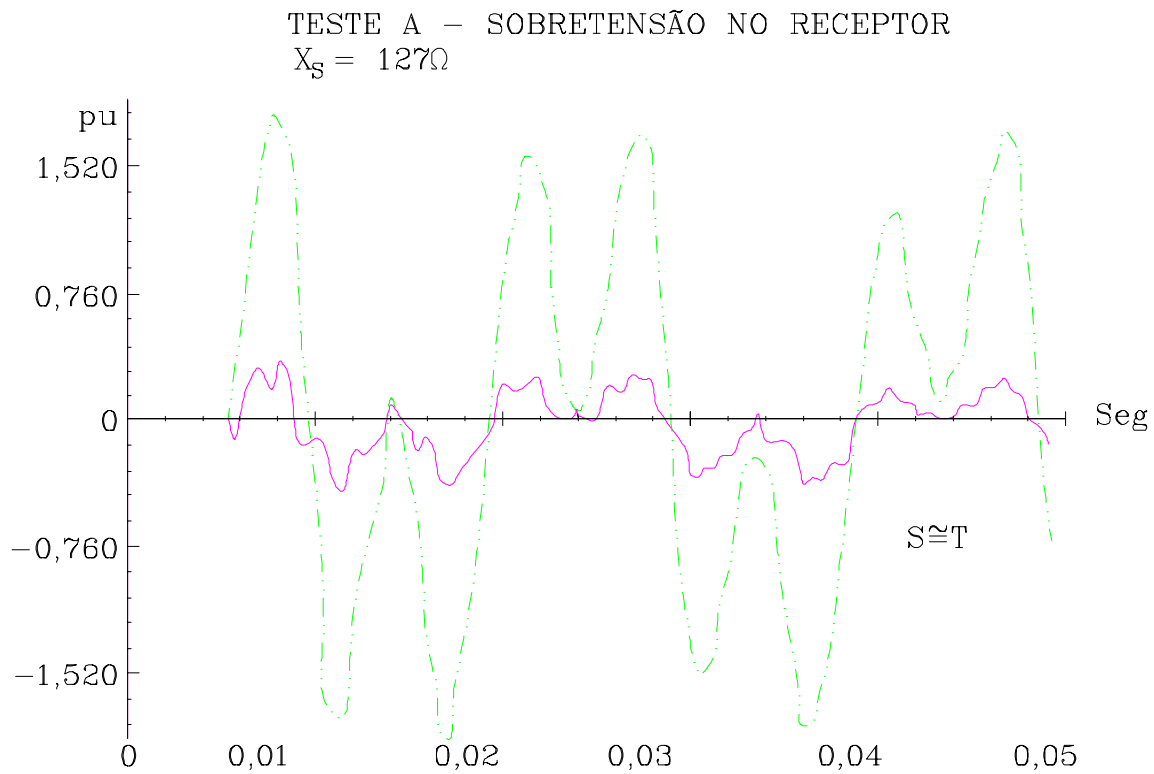


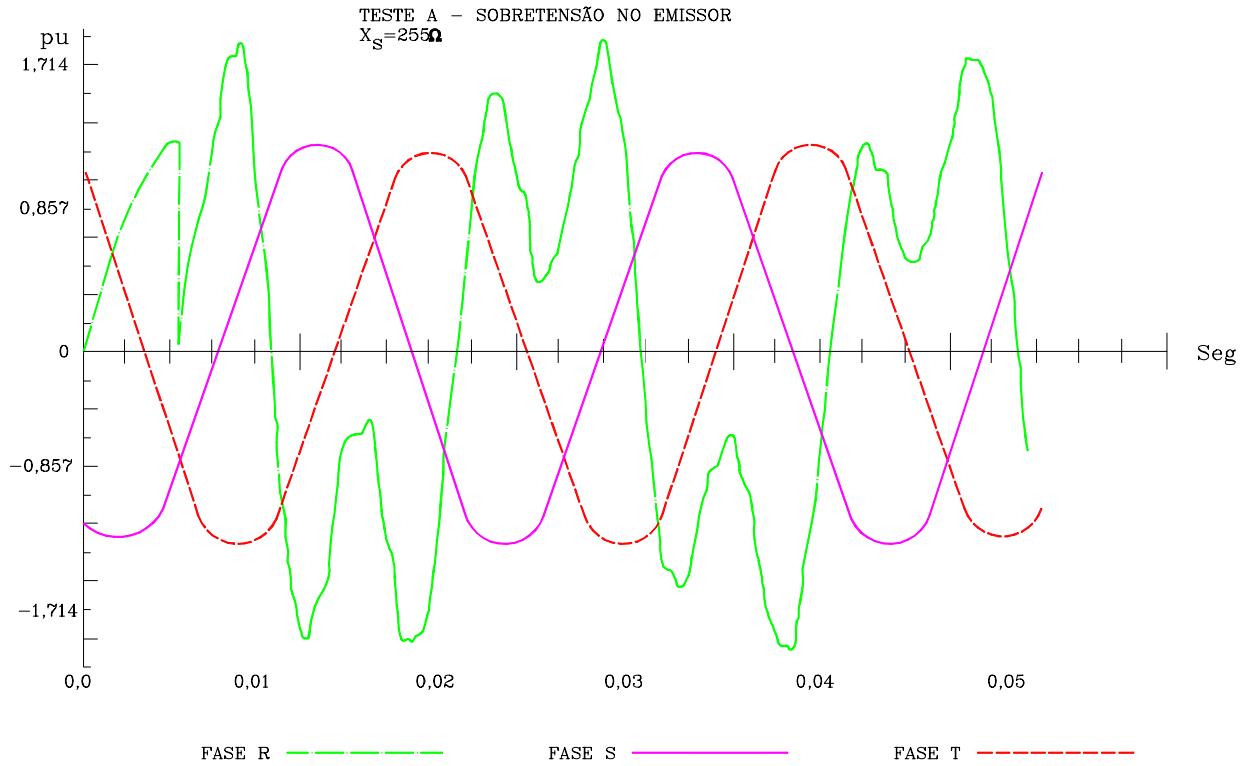
FIGURA 5 - TESTE B - SOBRE TENSÃO NO RECEPTOR $X_s = 127 \text{ } [\Omega]$



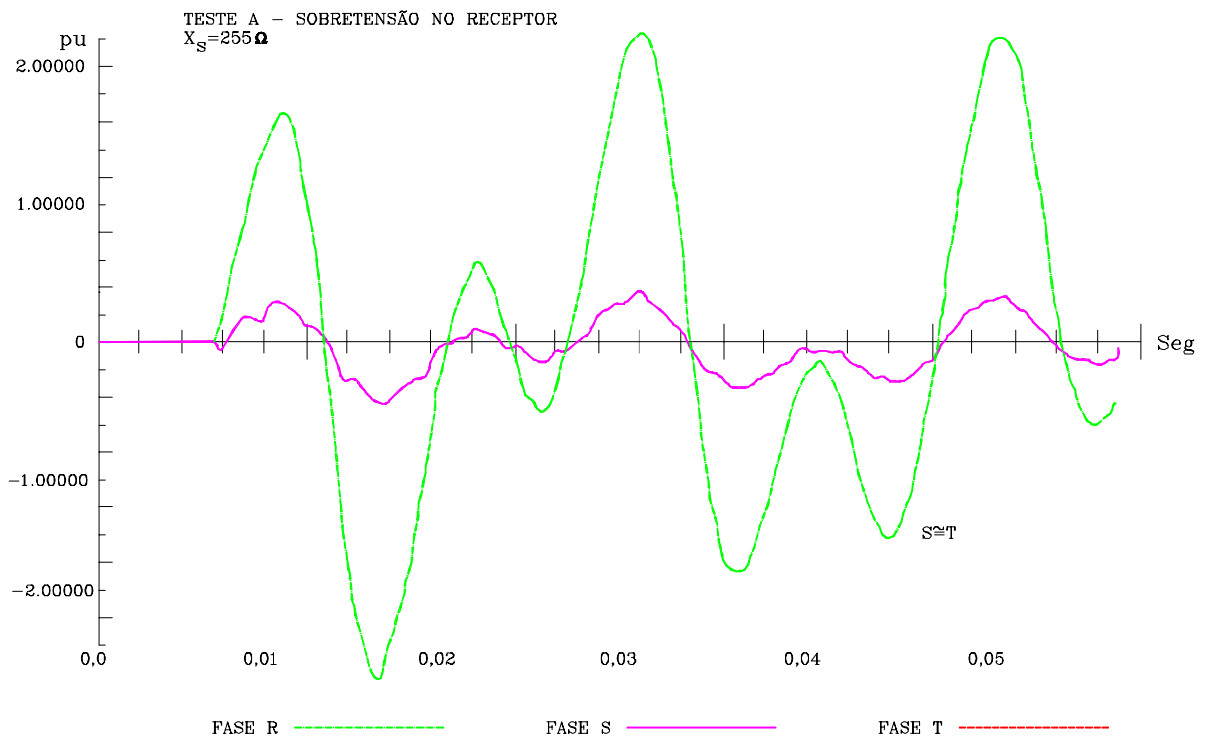
TESTE A - SOBRE TENSÃO NO EMISSOR $X_S = 127 [\Omega]$



TESTE A - SOBRE TENSÃO NO RECEPTOR $X_S = 127 [\Omega]$

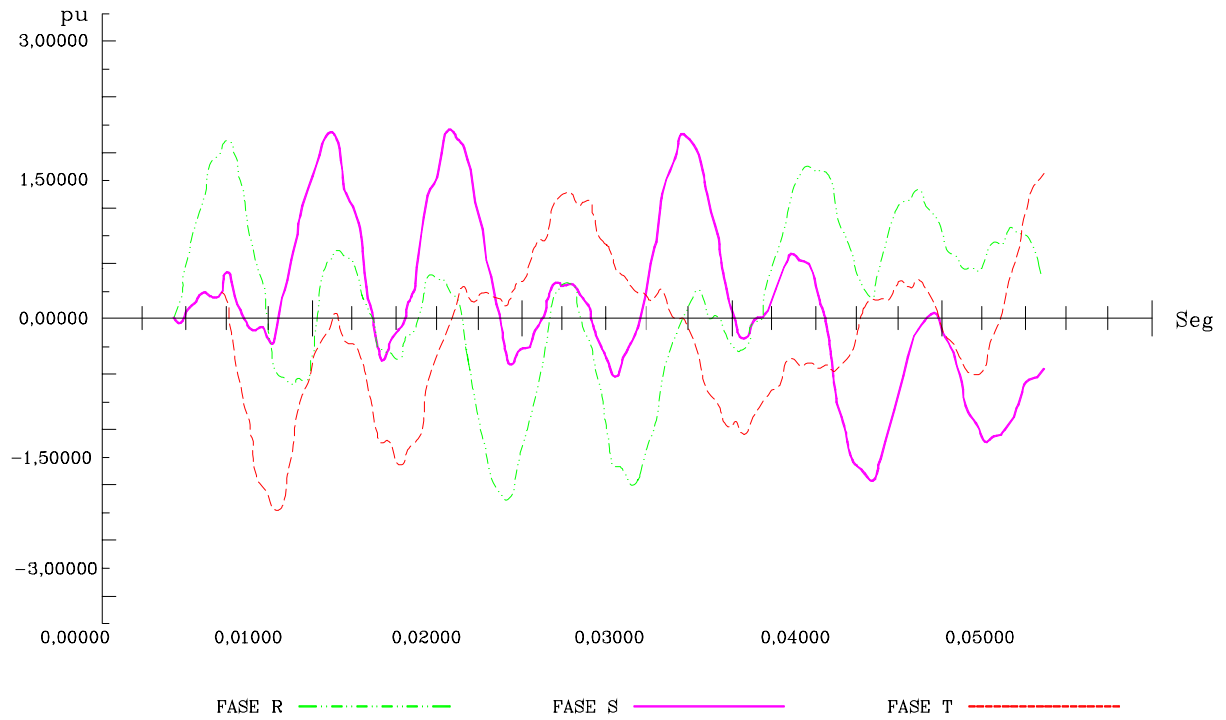


TESTE A - SOBRE TENSÃO NO EMISSOR $X_s = 255 [\Omega]$



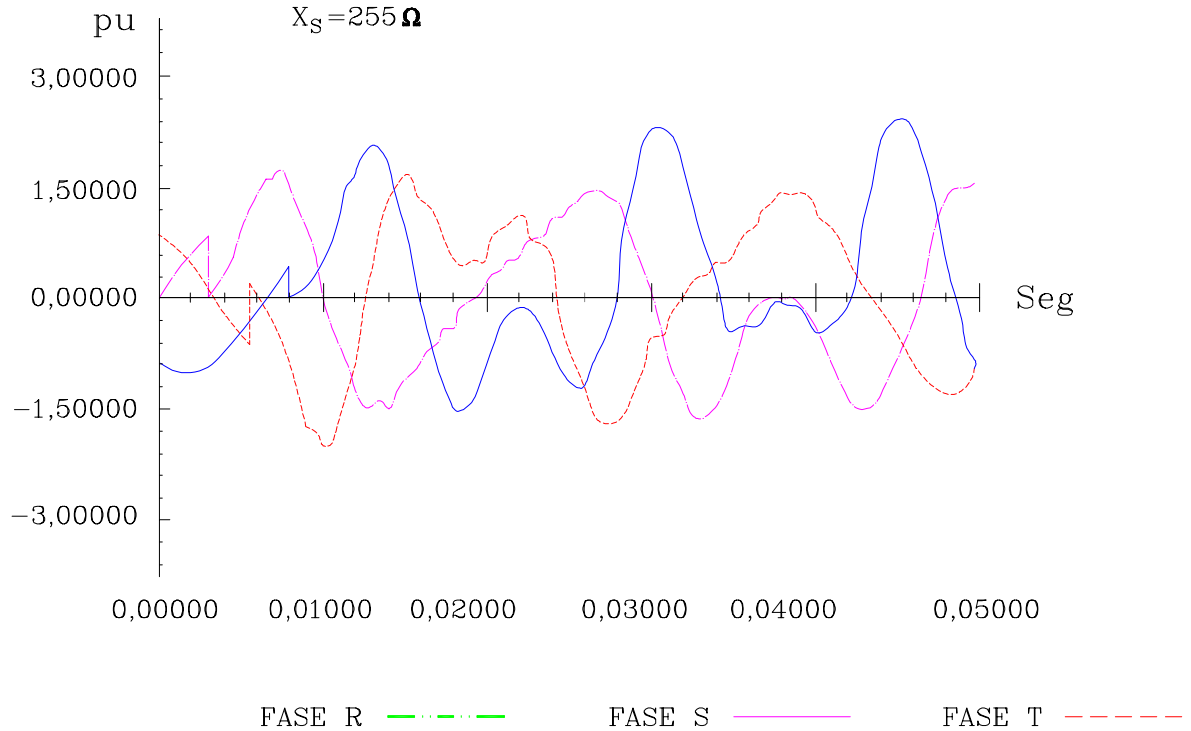
TESTE A - SOBRE TENSÃO NO RECEPTOR $X_s = 255 [\Omega]$

TESTE B - SOBRETENSÃO NO RECEPTOR
 $X_s = 127 \Omega$

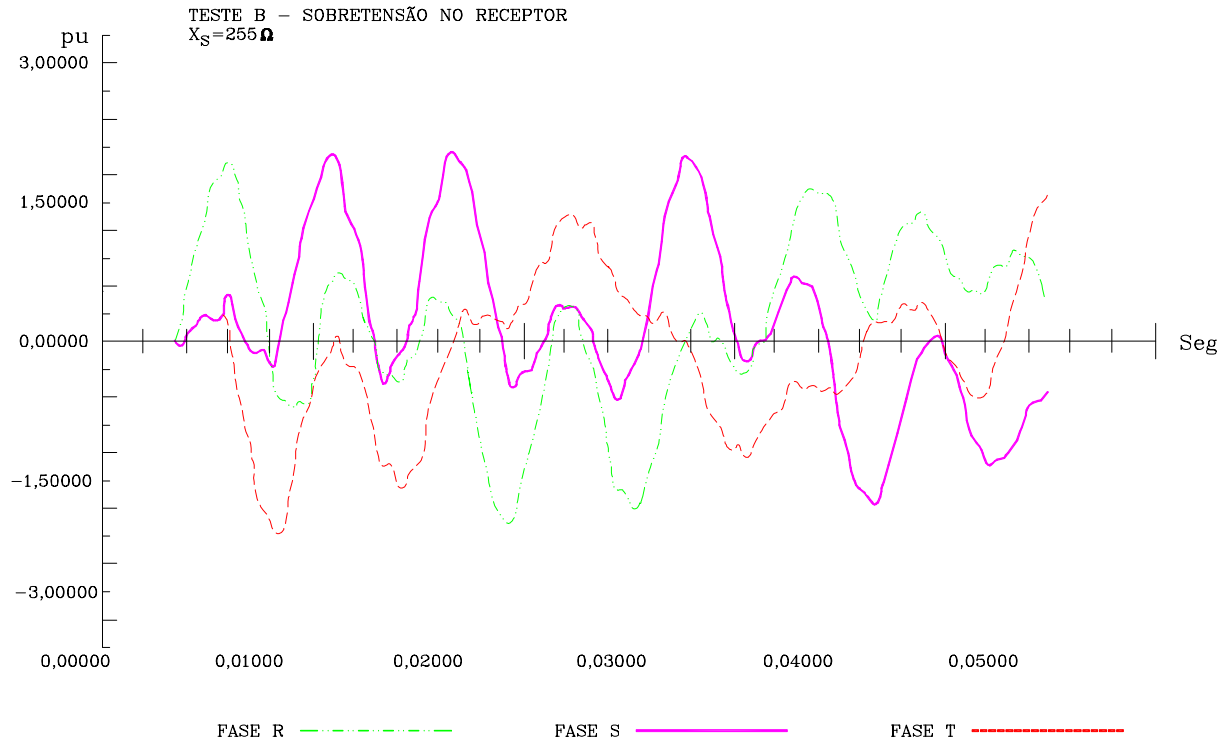


TESTE B - SOBRE TENSÃO NO RECEPTOR $X_s = 127 [\Omega]$

TESTE B - SOBRETENSÕES NO EMISSOR
 $X_s = 255 \Omega$



TESTE B - SOBRE TENSÕES NO EMISSOR $X_s = 255 [\Omega]$



TESTE B - SOBRE TENSÃO NO RECEPTOR $X_s = 255 [\Omega]$

6 - BIBLIOGRAFIA

- [1] - CIGRE - Working Group 13.05, "The Calculation of Switching Surges - I. A Comparison of Transient Network Analyser results"; Electra nº 19, PP 67-98, Nov. 1971;
- [2] - Apostila de Sobre Tensões em Sistemas Elétricos, Curso de Pós Graduação - 1985. Prof. João Roberto Cogo. EFEI;
- [3] - Manual de uso do EMTP (EFEI).