



**SEMINÁRIO DE TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA EM LINHAS DE MEIA ONDA**  
**CAMPINAS, 26 e 27 de NOVEMBRO de 2013**



# Estudo de Transitórios da Manobra de Energização da Linha de Meia Onda Teste sem Defeitos

**Autores: Profa. Dra. Maria Cristina Tavares – FEEC/UNICAMP**  
**Eng. Elson Gomes - ITAI**

**Moderador: Eng. Marcelo Maia – Chesf**

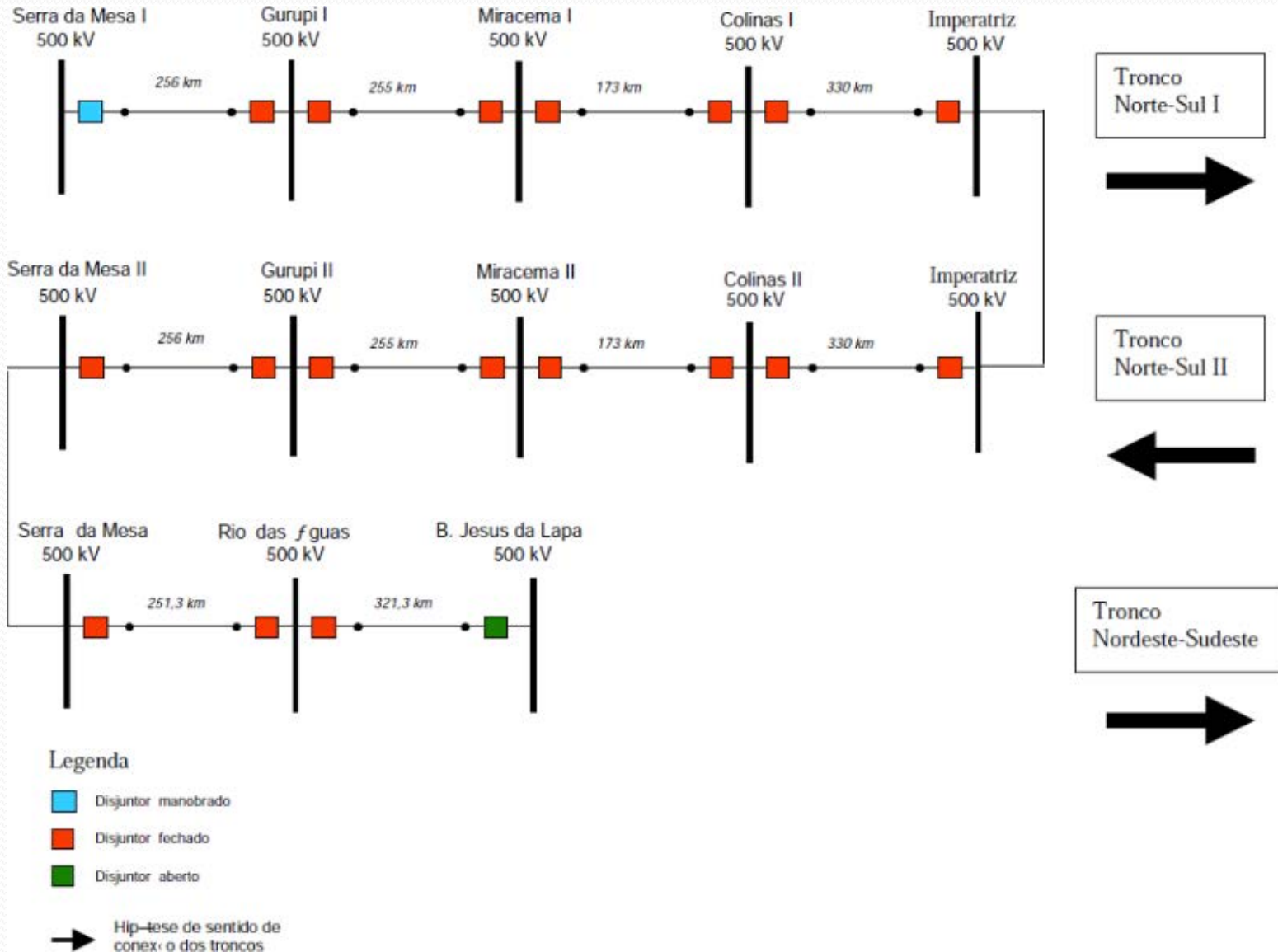
# Introdução

- Motivação: Identificar as sobretensões transitórias que ocorrerão durante a manobra de energização da Linha Teste em vazio.
- Objetivo geral: Obtenção das máximas perturbações que podem ocorrer durante o teste com intuito de evitar possíveis danos aos ativos.
- Objetivo específico: Comparar os resultados obtidos com as simulações realizadas. Definir medidas mitigadoras, se forem necessárias.

# Introdução

- A Linha de Meia Onda Teste é formada por linhas de 500 kV com características similares;
- Estas linhas em série formam uma única linha de 2600km;
- Este comprimento corresponde ao de uma transmissão em meia onda em 60 Hz.

# Linha de Meia Onda Teste



# Preparação do Teste

- As linhas existentes são convencionais (250-350 km);
- Alto nível de compensação em derivação e em série;
- Para reproduzir a linha de meia onda:
  - Todos os reatores em derivação devem ser removidos;
  - Todos os capacitores série devem ser curto-circuitados;
  - Os disjuntores das subestações intermediárias devem ficar travados na posição fechada;
  - O disjuntor da subestação terminal deve ficar travado na posição aberta.
- Os pára-raios existentes nas linhas foram mantidos em serviço em todas as subestações, para reduzir o tempo de preparação para o teste.

# Linhas parecidas reproduzem uma Linha de Meia Onda ?

| Tronco           | Resistência unitária<br>[ $\Omega/\text{km}$ ] | Indutância unitária<br>[mH/km] | Capacitância unitária<br>[ $\mu\text{F}/\text{km}$ ] |
|------------------|--|--------------------------------|--|
| Norte-Sul 1      | 0,0159   | 0,7070                         | 0,0161   |
| Norte-Sul 2      | 0,0160   | 0,7109                         | 0,0163   |
| Nordeste-Sudeste | 0,0160   | 0,7240                         | 0,0160   |

- Sequência positiva

| Tronco           | Resistência unitária<br>[ $\Omega/\text{km}$ ] | Indutância unitária<br>[mH/km] | Capacitância unitária<br>[ $\mu\text{F}/\text{km}$ ] |
|------------------|--|--------------------------------|--|
| Norte-Sul 1      | 0,3714   | 4,1166                         | 0,0073   |
| Norte-Sul 2      | 0,3482   | 3,7445                         | 0,0095   |
| Nordeste-Sudeste | 0,3482   | 3,7577                         | 0,0093   |

- Sequência zero

# Testes de validação

- Análise de sensibilidade dos parâmetros elétricos das linhas;
- Comprimento dos trechos formadores de uma linha de meia onda teste;
- Estabelecimento de valores limites para reprodução do teste em outros locais.
- Testes realizados com programa desenvolvido – quadripolos;
- Testes realizados com PSCAD.

## New Line Structure Characteristics

| Silhoutte | Horizontal Distance [m] | SIL [ $\Omega$ ] | Unitary Resistance [ $\Omega/\text{km}$ ] | Unitary Indutance [mH/km] | Unitary Capacitance [ $\mu\text{F}/\text{km}$ ] |
|-----------|-------------------------|------------------|---|---------------------------|---|
| NS-1      | 4.5                     | 209.594          | 0.0159                                    | 0.707                     | 16.123  |
| Line 1    | 5.175                   | 215.563          | 0.0159                                    | 0.727                     | 15.680  |
| Line 2    | 5.625                   | 219.277          | 0.0159                                    | 0.740                     | 15.418  |
| Line 3    | 6.3                     | 224.492          | 0.0159                                    | 0.758                     | 15.067  |
| Line 4    | 7.2                     | 230.850          | 0.0159                                    | 0.780                     | 14.661  |
| Line 5    | 7.875                   | 234.225          | 0.0160                                    | 0.796                     | 14.397  |
| Line 6    | 8.775                   | 240.598          | 0.0160                                    | 0.814                     | 14.088  |
| Line 7    | 9.675                   | 245.509          | 0.0160                                    | 0.832                     | 13.819  |
| Line 8    | 10.575                  | 250.019          | 0.0160                                    | 0.848                     | 13.583  |





UNICAMP

## Sensitivity Analysis for Different Trunks

- The sensitivity analysis consisted of varying the section length and the section position inside the AC-Link Test of the trunk with higher SIL.



- Each trunk was replaced by the transmission lines created before. While one trunk was varied the other two were replaced by NS-1 line parameters.



UNICAMP

TMO  
 $\lambda/2$   
2013

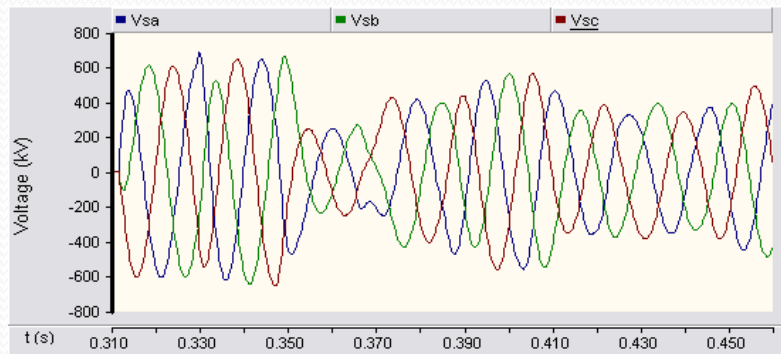
Seminário de Transmissão  
de Energia em Linhas de  
Meia Onda

Campinas, SP - Brasil

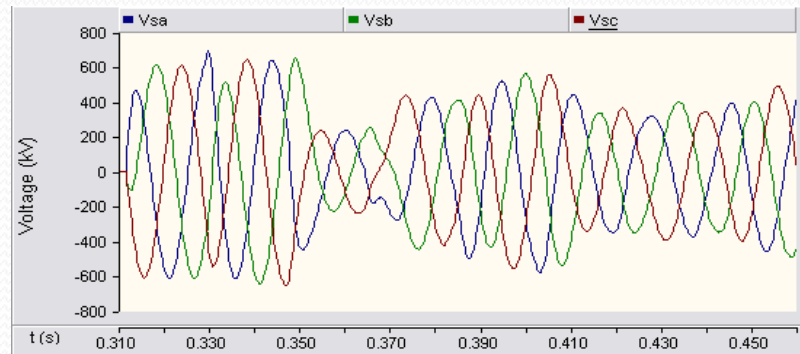
CCUEC - UNICAMP

26 e 27 de Novembro

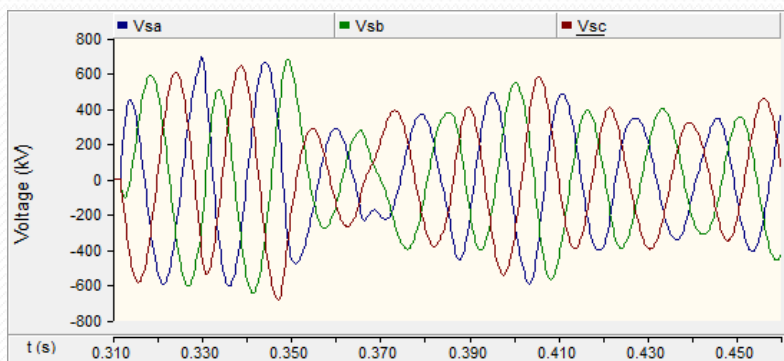
# Time Domain Simulation



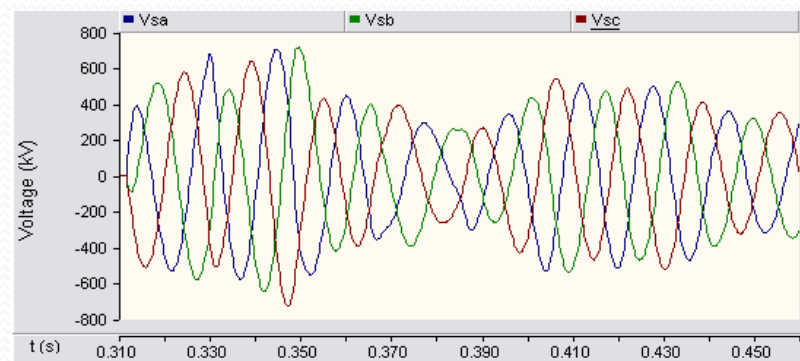
Voltage at receiving end of AC-Link Test during energization maneuver.



Voltage at receiving end of NS-1 line during energization maneuver.



Voltage at receiving end of AC-Link Test with replacement of trunk 2 for the line 2 (SIL of 220  $\Omega$ ) during energization maneuver.



Voltage at receiving end of AC-Link Test with replacement of trunk 2 for the line 8 (SIL of 250  $\Omega$ ) during energization maneuver.



UNICAMP

TMO  
 $\lambda/2$   
2013

Seminário de Transmissão  
de Energia em Linhas de  
Meia Onda

Campinas, SP - Brasil

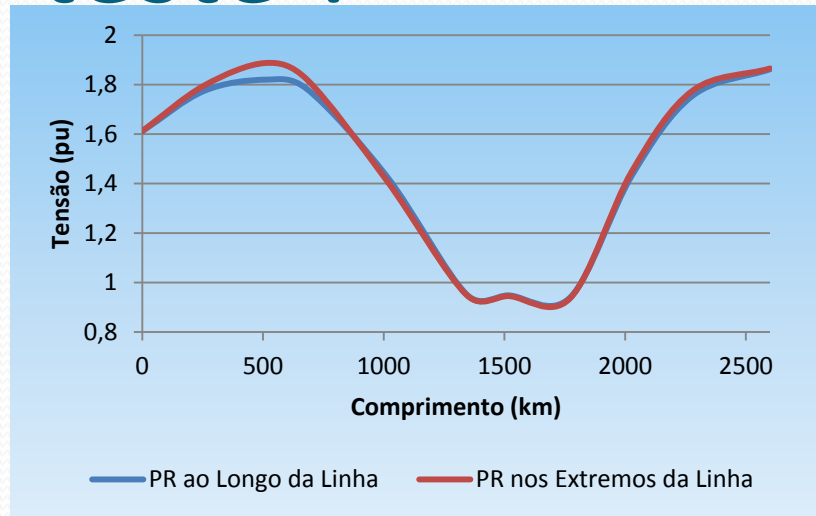
CCUEC - UNICAMP

26 e 27 de Novembro

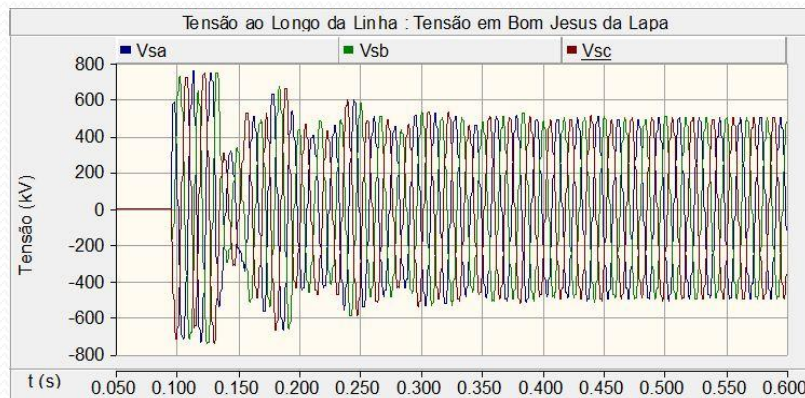
## Conclusions

- The use of lines with similar electrical parameters, such as the AC-Link Test, is suitable for field energization test.
- For the observed case, in which the lines have SIL between 209 and 212  $\Omega$ , the replacement of any part of the line with trunks that has a SIL of up to 220  $\Omega$  was considered acceptable, not changing the switching overvoltages and not disturbing the voltages signals in steady state.
- It is possible to use lines with higher SIL differences if the length of this trunk not exceed about 400 km.

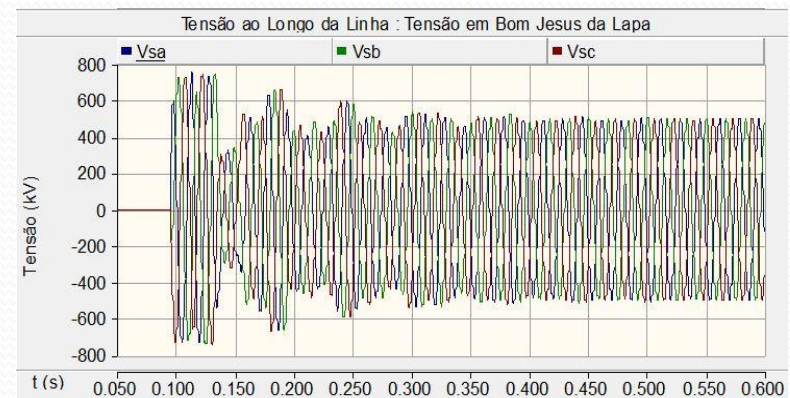
# Manutenção dos PR compromete o teste ?



- Máximas tensões transitórias ao longo do Elo CA Teste considerando pára-raios nos extremos e ao longo de toda a linha



- Pára-raios no terminal transmissor e receptor



- Pára-raios ao longo da linha

# **Estudo de transitórios eletromagnéticos**

---

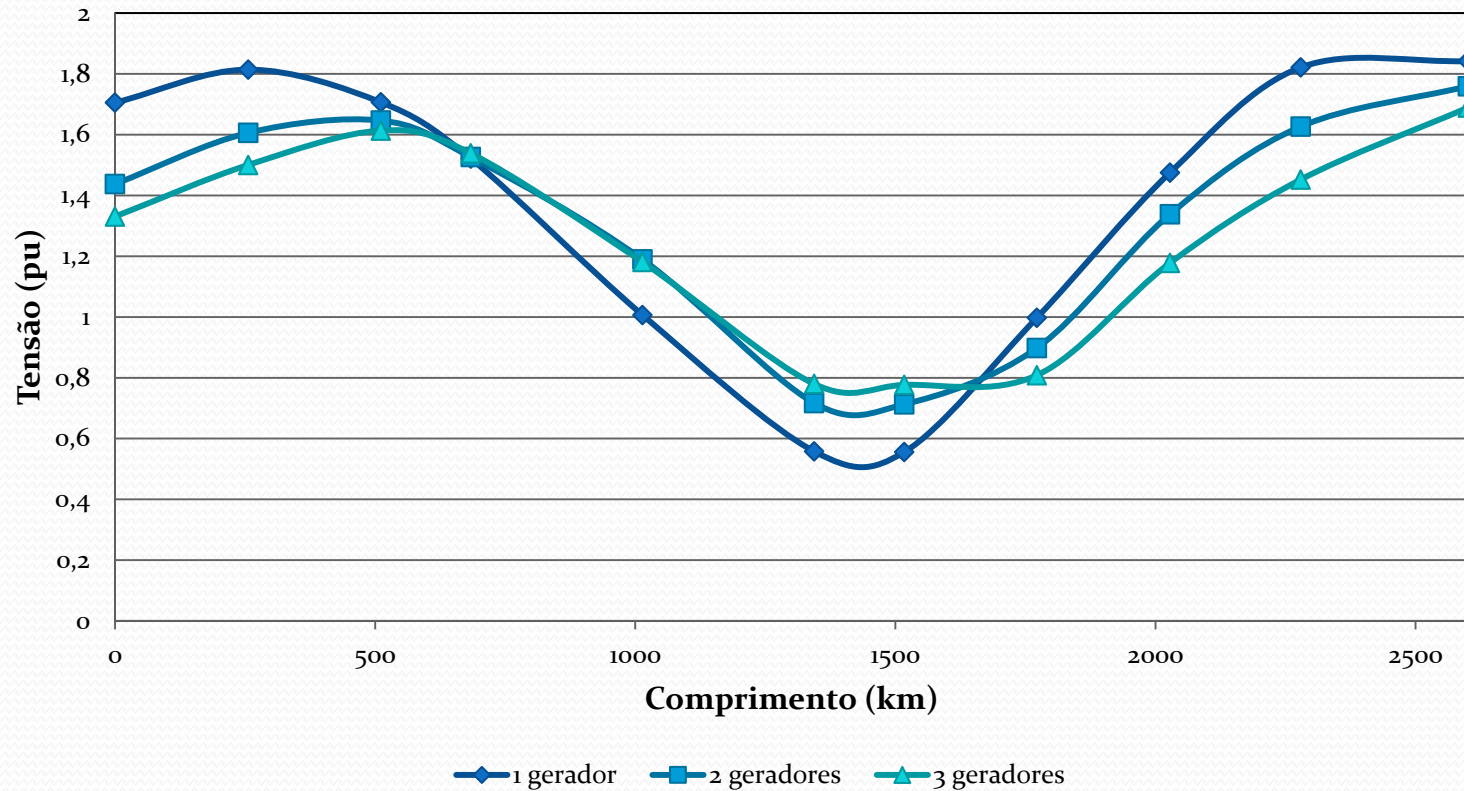
- ✓ **As simulações foram implementadas em ATP e PSCAD.**
- ✓ **Devido ao comprimento da linha os transitórios não são severos (elevada atenuação).**
- ✓ **Energização da linha sem defeito.**
  - ✓ **Suportabilidade das linhas de 500 kV não foi ultrapassada;**
  - ✓ **Sobretensões obtidas muito abaixo dos limites de suportabilidade dos equipamentos:**
  - ✓ **A manobra de energização pode ser direta ou com o uso de resistor de pré-inserção (resistor mantido por 20 ms).**

# Energização da Linha Teste

- Foi variado o número de unidades geradoras de 1 - 3;
- Foram analisadas três condições de energização:
  - O Elo CA Teste de 2600 km energizado de maneira direta, sem métodos de redução de tensões transitórias além dos pára-raios;
  - O Elo CA Teste de 2600 km energizado utilizando resistor de pré-inserção de 400  $\Omega$ , retirado após 8 ms de sua inserção.
  - O Elo CA Teste de 2600 km energizado utilizando resistor de pré-inserção de 400  $\Omega$ , retirado após 20 ms de sua inserção.

# Energização Direta

# Máximas tensões transitórias ao longo do Elo CA Teste para energização direta



- Menores sobretensões com 3 unidades geradoras;



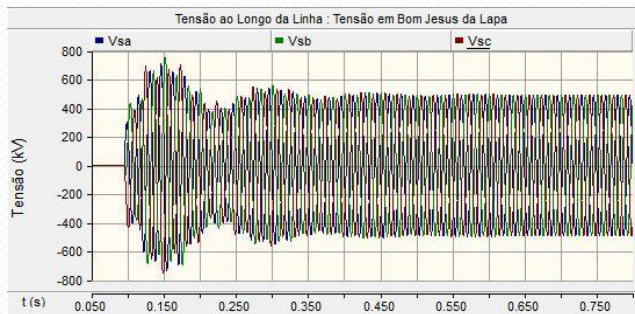
# Simulação estatística

- 500 casos simulados.

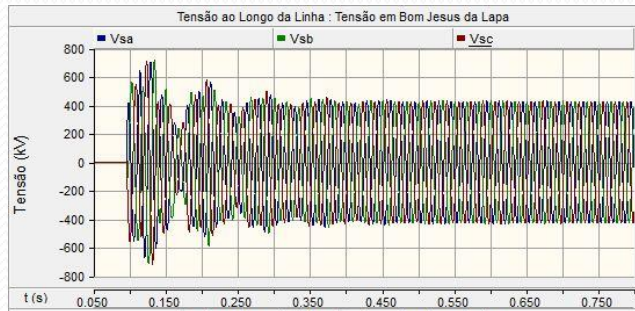
| SE  | Ponto da<br>LT (%) | Tensão<br>pré-<br>manobra<br>em Serra<br>da Mesa I<br>(pu) | Intervalo<br>de<br>observação<br>(ms) | Sobretensão Fase-terra<br>(pu) |      |
|-----|--------------------|--|---------------------------------------|--------------------------------|------|
|     |                    |  |                                       | Méd.                           | Máx. |
| SM1 | 0,0                | 1,1  | 0-150                                 | 1,60                           | 1,80 |
| GU1 | 9,85               |  |                                       | 1,70                           | 1,85 |
| MI1 | 19,65              |  |                                       | 1,65                           | 1,85 |
| CO1 | 26,31              |  |                                       | 1,45                           | 1,70 |
| IMP | 39,00              |  |                                       | 1,00                           | 1,20 |
| CO2 | 51,69              |  |                                       | 0,40                           | 0,75 |
| MI2 | 58,35              |  |                                       | 0,45                           | 0,75 |
| GU2 | 68,15              |  |                                       | 0,80                           | 1,05 |
| SM2 | 78,00              |  |                                       | 1,30                           | 1,55 |
| RIE | 87,67              |  |                                       | 1,60                           | 1,85 |
| BJL | 100                |  |                                       | 1,75                           | 1,90 |

# Tensões transitórias

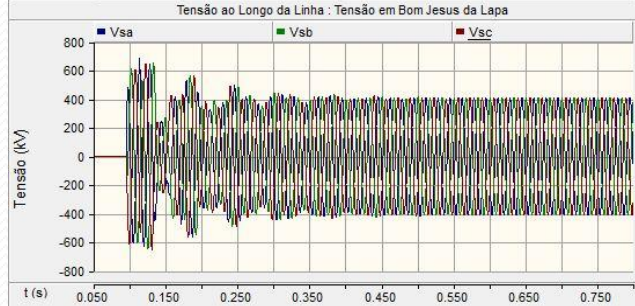
- Regime permanente em torno de 300 ms.
- subestação terminal



1 gerador

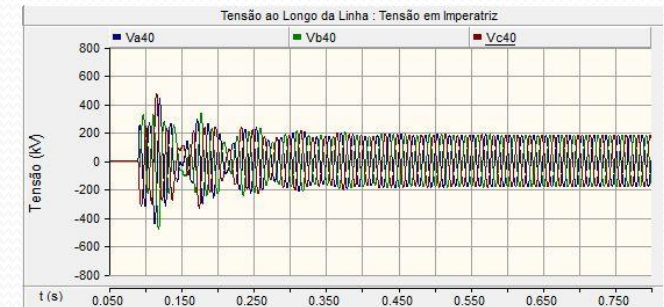
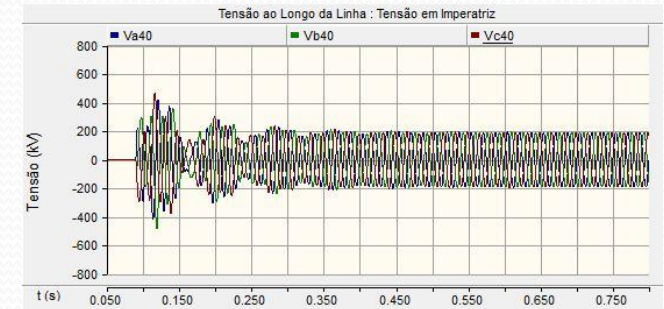
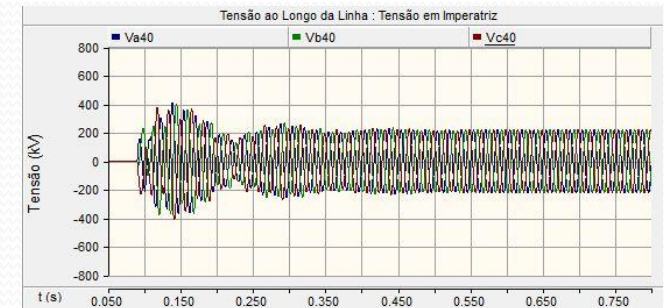


2 geradores



3 geradores

meio da linha

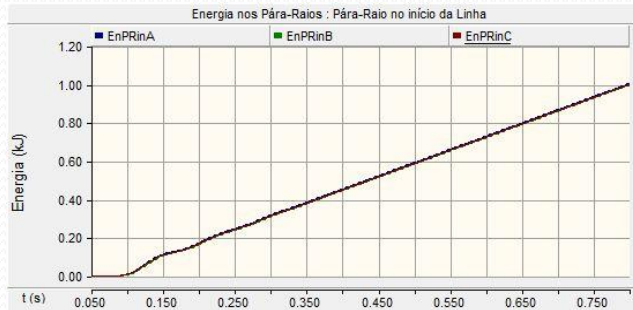


# Energia absorvida pelos pára-raios

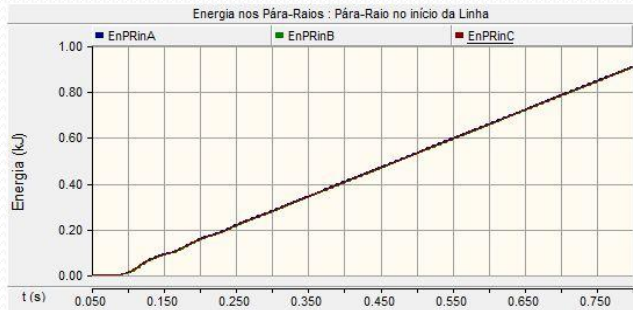
- Valores baixos – capacidade dos PRs – 4,8 MJ



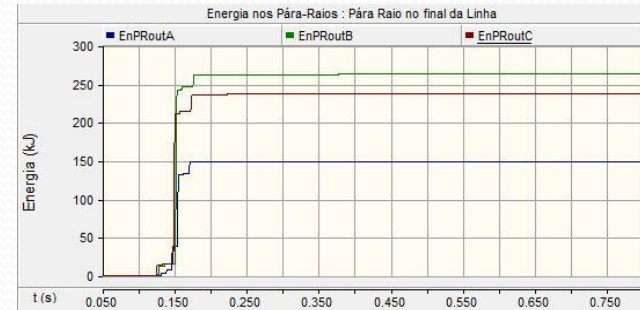
1 gerador



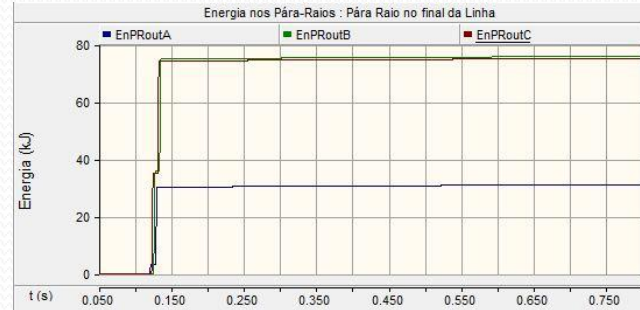
2 geradores



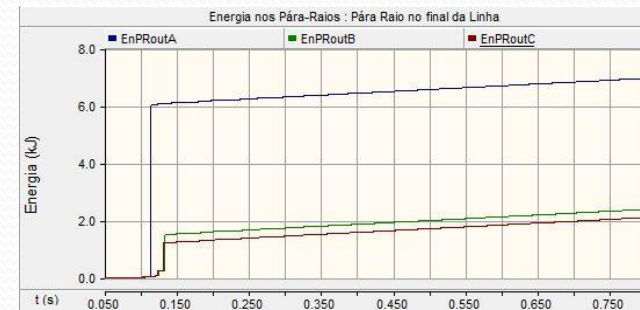
3 geradores



300 kJ



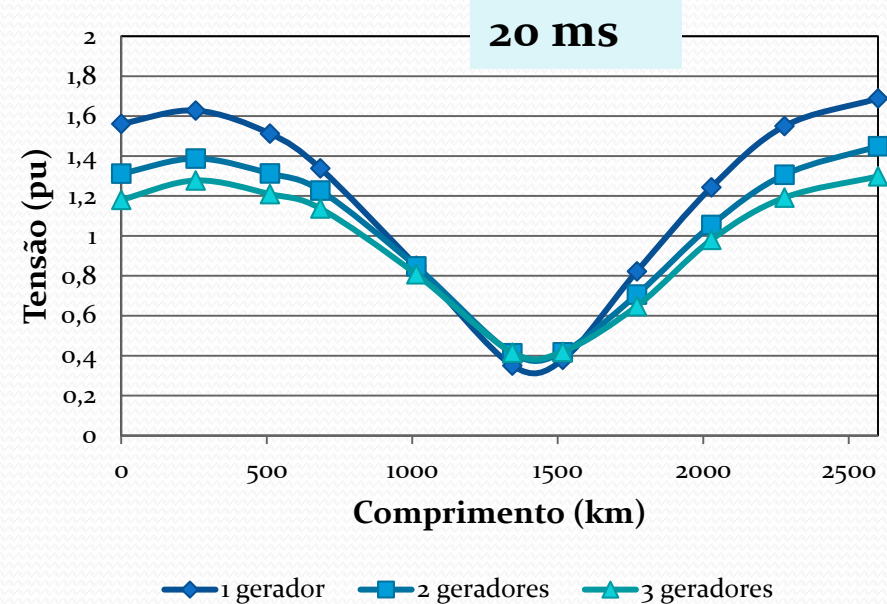
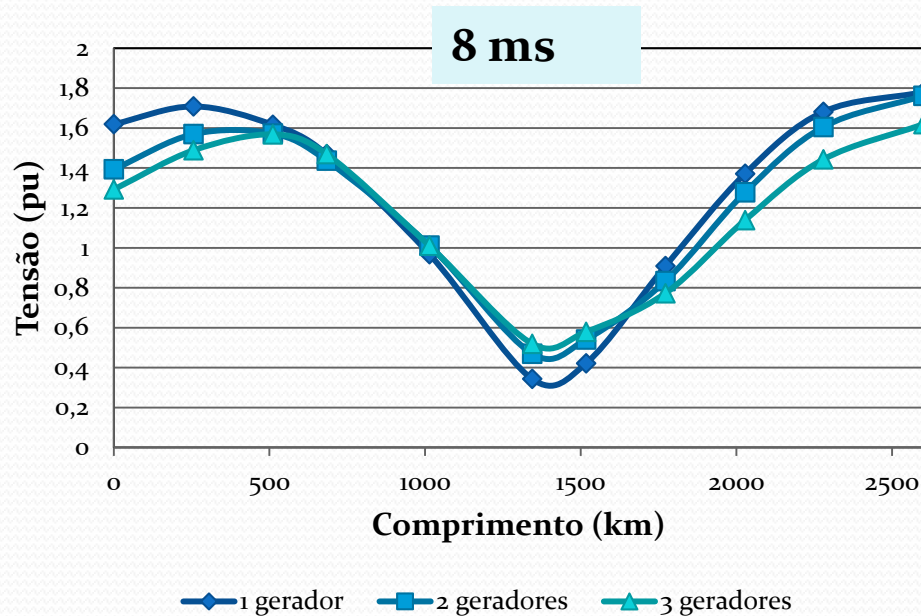
80 kJ



8 kJ

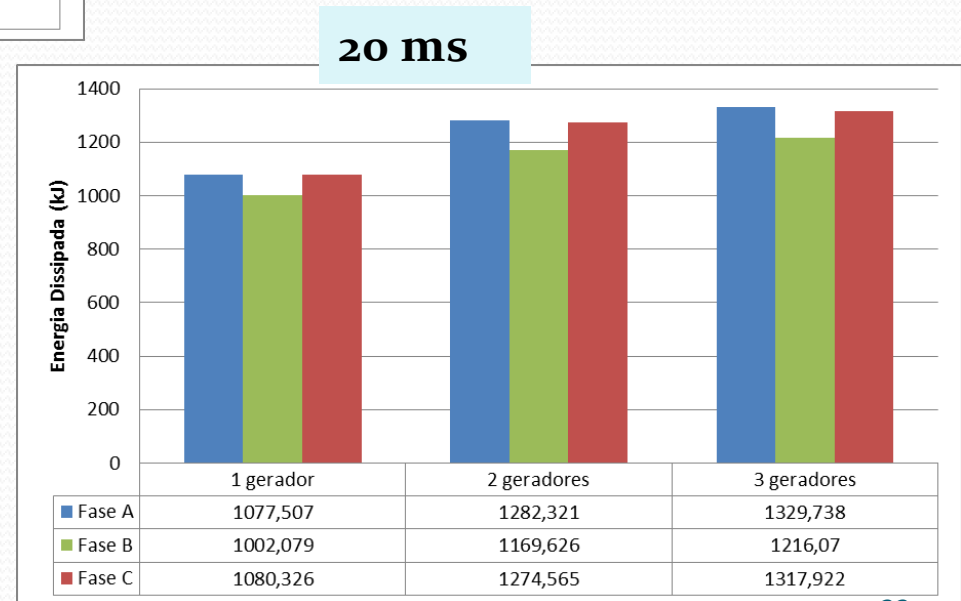
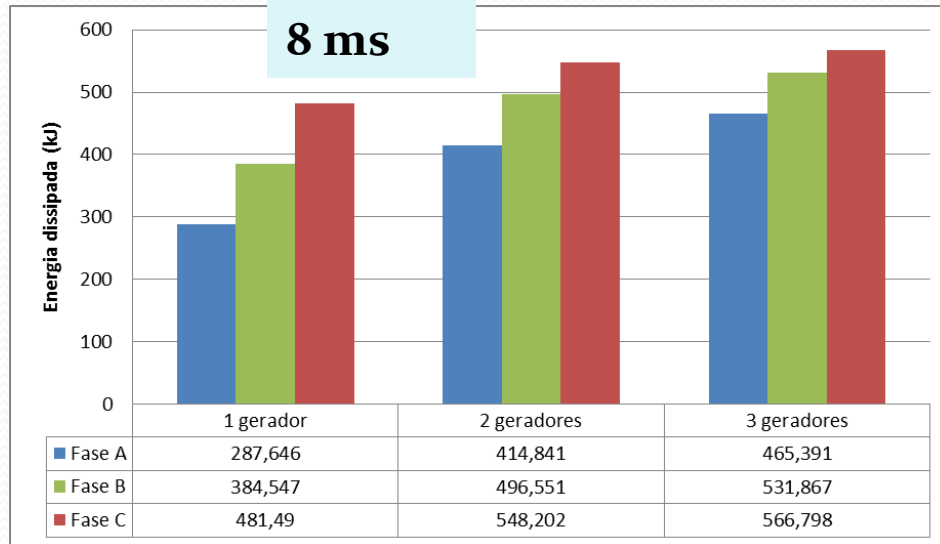
# Energização com Resistor de Pré-Inserção de 400 Ohms – 8 ms e 20 ms

# Máximas tensões transitórias ao longo da Linha Teste



- Sobretensões inferiores às obtidas durante a energização direta;
- Linha de meia onda deveria manter resistor por 20 ms.
- No ensaio o resistor será mantido por 8 ms.

# Energia dissipada nos resistores de pré-inserção



# Linha Meia Onda Teste x LT curta equivalente

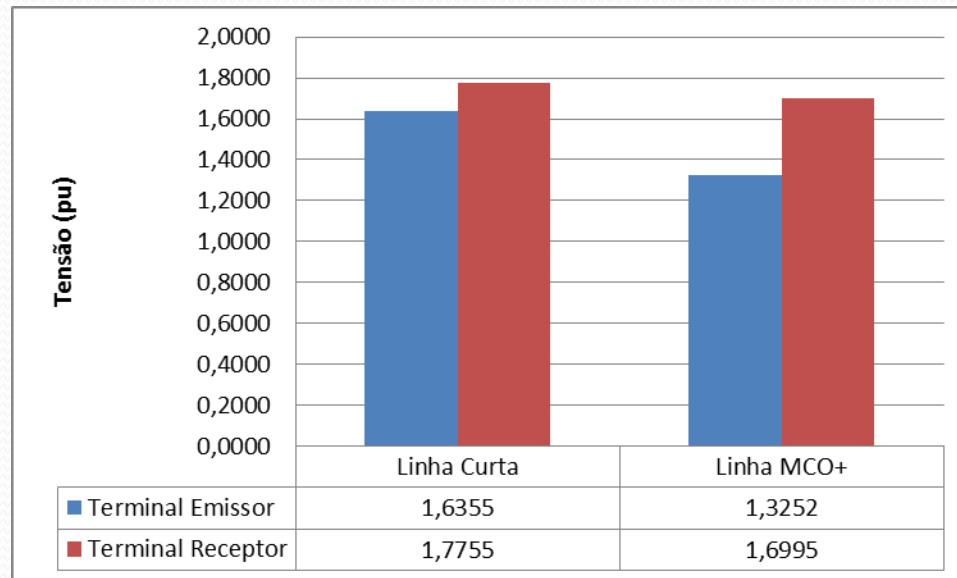


## Analisar desempenho de linha de comprimento elétrico equivalente

- A manobra de energização foi realizada considerando tensão pré-manobra igual a 0,9 pu (450 kV);
- Realizadas energizações direta e com resistor de pré-inserção inseridos durante 8 e 20 ms.
- Foram analisados dois circuitos:
  - Linha Teste de 2600 km com pára-raios instalados nas extremidades;
  - Uma linha de 133 km (Linha de Transmissão Curta) representada pelos parâmetros da interligação Norte-Sul I, possuindo pára-raios nas extremidades da linha.



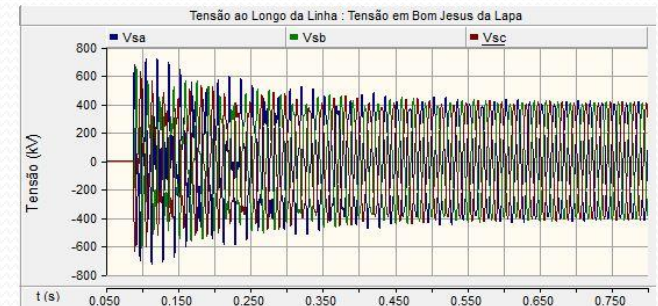
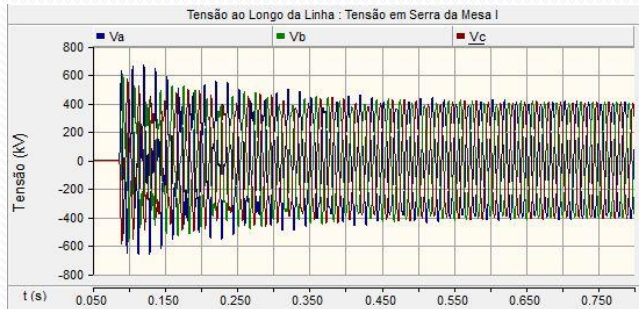
# Energização direta



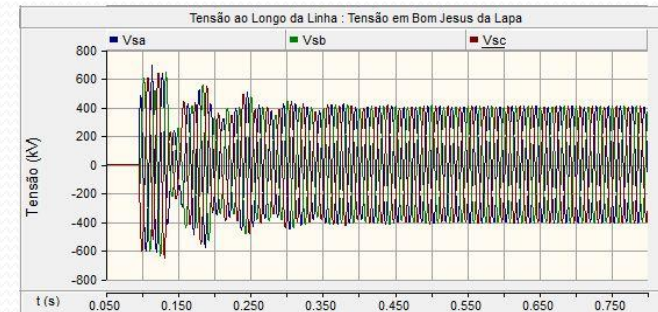
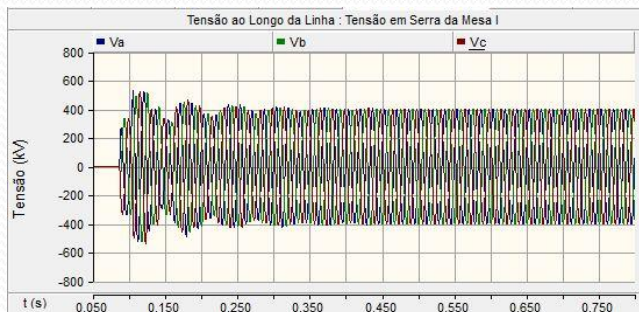
- A Linha Teste apresenta sobretensões inferiores à Linha Curta durante a energização direta.

# Tensões nos terminais das linhas

Linha Curta  
(133 km)

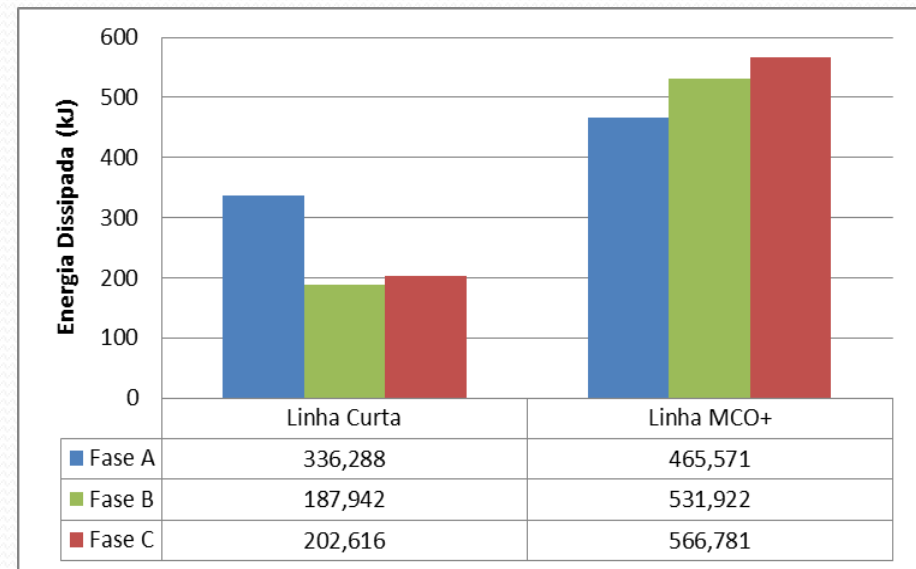
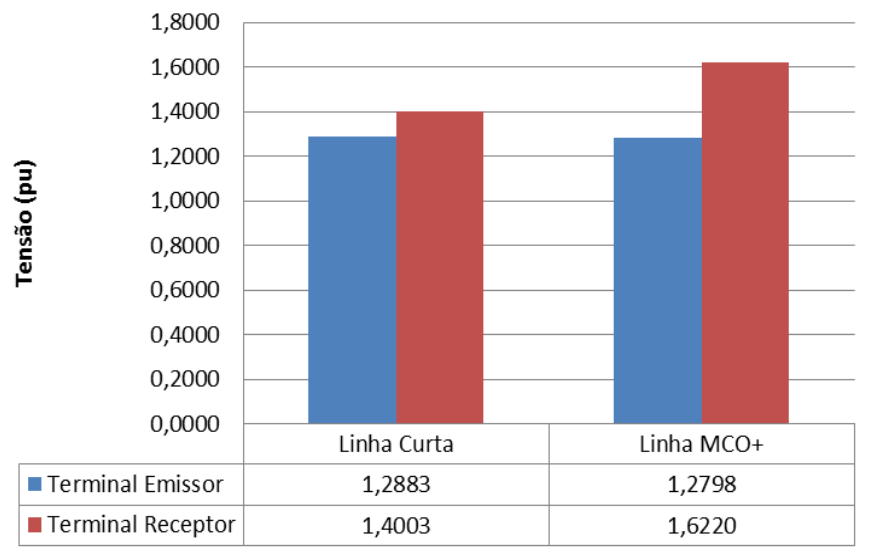


Elo CA Teste



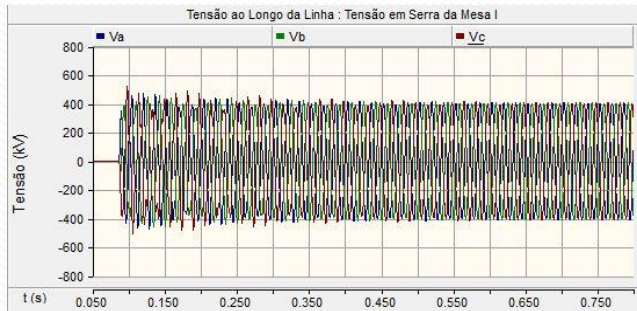
- A Linha de Meia Onda atinge o regime permanente mais rapidamente

# Máximas tensões transitórias durante energização com resistor de pré-inserção (8 ms)

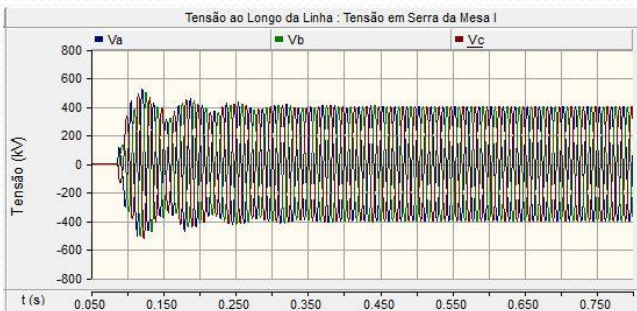
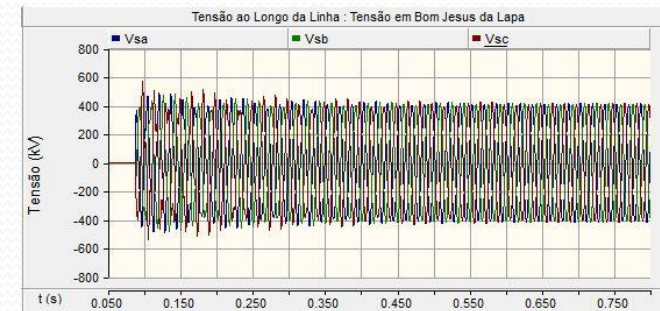


- O tempo de inserção dos resistores por 8 ms não é eficaz para Linha de Meia Onda.

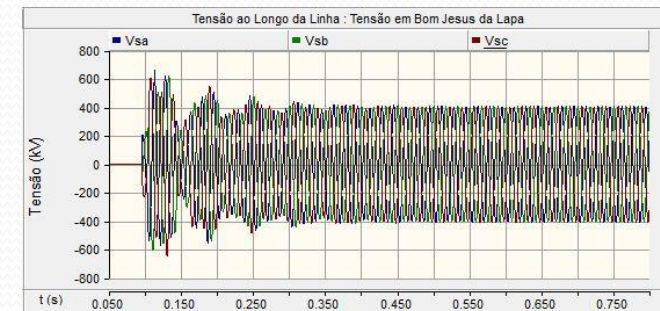
# Tensão nos terminais das linhas : com resistor de pré-inserção (8 ms)



Linha Curta  
(133 km)

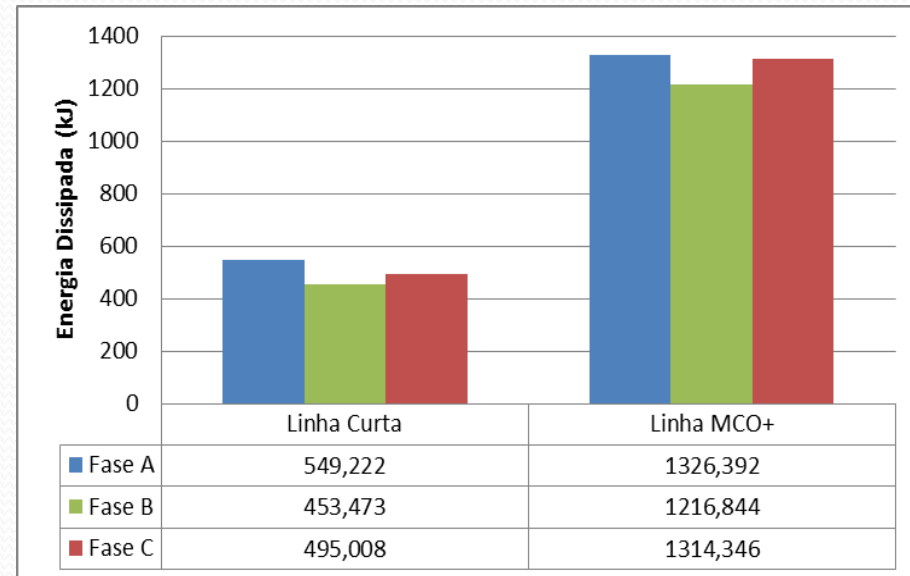
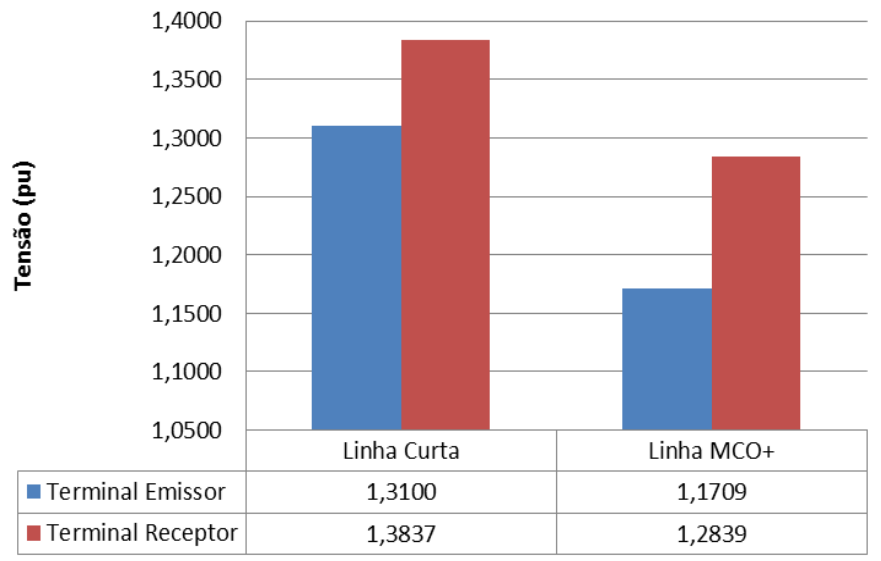


Elo CA Teste



- Linha de Meia Onda atinge o regime permanente rapidamente.

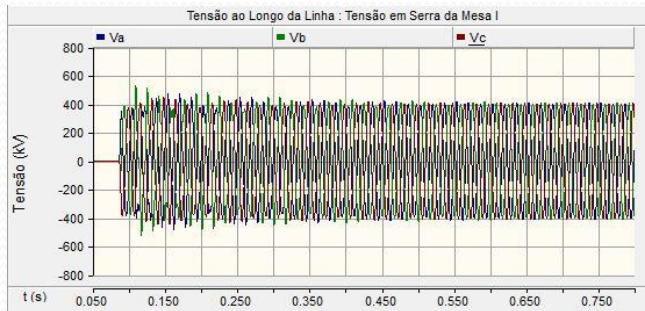
# Tensões transitórias : com resistor de pré-inserção (20 ms)



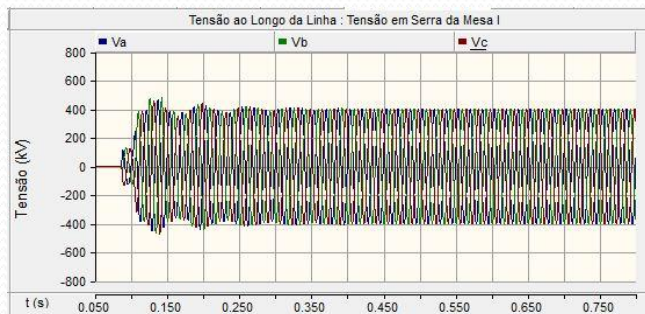
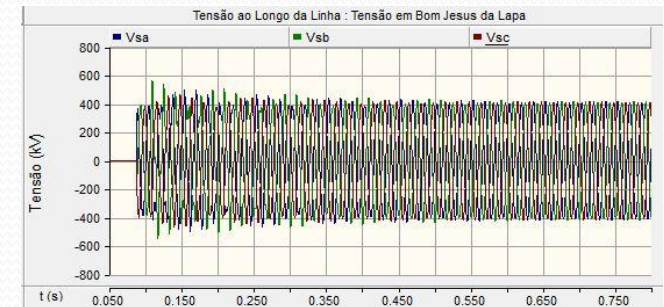
- Tempo adequado para a linha de meia onda



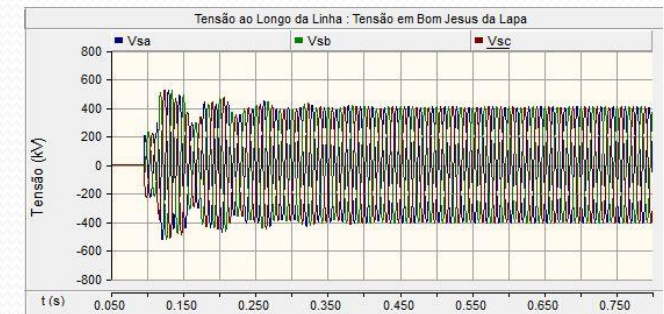
# Tensão nos terminais : com resistor de pré-inserção (20 ms)



Linha Curta  
(133 km)



Elo CA Teste



A Linha Teste atinge o regime permanente mais rapidamente.  
As sobretensões são reduzidas.

# Conclusões

- Quanto maior a potência de curto do terminal emissor menores as sobretensões ao longo da linha de meia onda na manobra de energização;
- Para o Ensaio deveremos utilizar somente 01 unidade geradora;
- Foi mostrado que as sobretensões transitórias obtidas não são severas mesmo para esta condição;
- No caso de energização direta as máximas sobretensões no final da linha serão da ordem de 1,90 pu;
- No caso de energização com resistor de pré-inserção por 8 ms as máximas sobretensões no terminal remoto ficam em torno de 1,60 pu;
- Se o resistor fosse mantido por 20 ms a tensão no terminal em vazio atingiria valores da ordem de 1,30 pu;

# Conclusões

- Suportabilidade das linhas de 500 kV não foi ultrapassada;
- Sobreensões obtidas muito abaixo dos limites de suportabilidade dos equipamentos;
- A Linha Teste representa adequadamente uma linha de meia onda;
- Os pára-raios existentes nas subestações intermediárias podem ser mantidos durante o ensaio, pois não comprometem os resultados.