



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



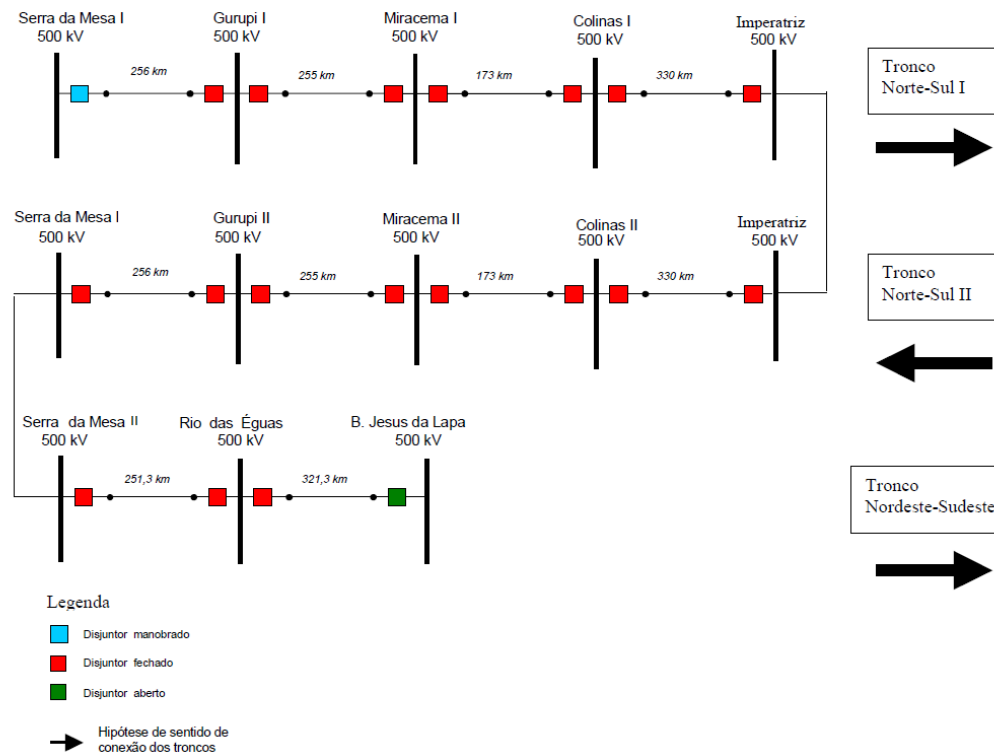
TRANSITÓRIOS EM GERADORES SÍNCRONOS CAUSADOS PELA ENERGIZAÇÃO DE LINHA DE TRANSMISSÃO DE POUCO MAIS DE MEIO COMPRIMENTO DE ONDA

Responsável pelos estudos: Prof. Walmir Freitas

Apresentação: Prof. Luiz Carlos P. da Silva

Objetivos

- Determinar os transitórios em geradores síncronos causados pela energização de linha de transmissão de pouco mais de meio comprimento de onda.
- Determinar os transitórios em geradores síncronos causados pela ocorrência de curtos-circuitos equilibrados e desequilibrados em linha de transmissão de pouco mais de meio comprimento de onda.



Sistema simulado

- Dois cenários foram investigados:
 - ✓ Cenário 1: foram empregadas três máquinas de 472,6 MVA para realizar a energização do tronco de pouco mais de meio comprimento de onda.
 - ✓ **Cenário 2:** foi empregada apenas uma máquina de 472,6 MVA para realizar a energização do tronco de pouco mais de meio comprimento de onda (resultados utilizados nesta apresentação).
 - ✓ Todas as simulações foram realizadas utilizando o programa PSCAD/EMTDC;
- Os dados do gerador da Usina Hidrelétrica de Serra da Mesa foram obtidos no site do Operador Nacional do Sistema (ONS) através do uso do sistema: *Casos de Referência – Estabilidade – Transitórios Eletromecânicos* de novembro de 2010 (ANATEM).

Dados elétricos dos geradores de Serra da Mesa no formato empregado pelo programa PSCAD/EMTDC

The image displays four windows from the PSCAD/EMTDC software, showing the configuration parameters for a synchronous machine and its static exciter.

[sync_machine] Synchronous Machine - Configuration

Machine name	SM1
No. of Q-axis Damper Windings	One
Data Entry Format:	Generator
Multimass interface:[Enables Speed Ctrl]	DISABLE
Armature Resistance as:	Resistance
D-axis Saturation	Disabled
Type of settings for initial condition	None
Machine scaling factor?	No
Graphics Display	3 phase view

[sync_machine] Synchronous Machine - Basic Data

Rated RMS Line-to-Neutral Voltage	8.660254 [kV]
Rated RMS Line Current	18.19038 [kA]
Base Angular Frequency	376.992 [rad/s]
Inertia Constant	5.5 [s]
Mechanical Friction and Windage	0.0 [pu]
Neutral Series Resistance	1.0E5 [pu]
Neutral Series Reactance	0 [pu]
Iron Loss Resistance	300.0 [pu]
Number of coherent machines	1.0

[sync_machine] Synchronous Machine - Generator Data Format

Armature Resistance [Ra]	0.00 [pu]
Armature Time Constant [Ta]	0.332 [s]
Potier Reactance [Xp]	0.220 [pu]
D: Unsaturated Reactance [Xd]	0.934 [pu]
D: Unsaturated Transient Reactance [Xd']	0.289 [pu]
D: Unsat. Transient Time (Open) [Tdo]	5.303 [s]
D: Unsat. Sub-Trans. Reactance [Xd'']	0.272 [pu]
D: Unsat. Sub-Trans. Time (Open) [Tdo'']	0.091 [s]
D: Real Transfer Admit (Armat-Field)	1.0E+2 [pu]
D: Imag Transfer Admit (Armat-Field)	0.0 [pu]
Q: Unsaturated Reactance [Xq]	0.611 [pu]
Q: Unsaturated Transient Reactance [Xq']	0.228 [pu]
Q: Unsat. Transient Time (Open) [Tqo]	0.85 [s]
Q: Unsat. Sub-Trans. Reactance [Xq'']	0.290 [pu]
Q: Unsat. Sub-Trans. Time (Open) [Tqo'']	0.205 [s]
Air Gap Factor	1.0

[exc_scrx] Solid State Exciter - Configuration

Rectifier Smoothing Time Constant	0.02 [s]
Controller Lead Time Constant	1.5 [s]
Controller Lag Time Constant	1.0 [s]
Exciter Time Constant	0.02 [s]
Exciter Gain	100 [pu]
Maximum Field Voltage	5 [pu]
Minimum Field Voltage	-5 [pu]
L-G Voltage Base	8.66 [kV]
Line Current Base	5.02 [kA]
Reverse Resistance	15000 [ohm]
Exciter Voltage Supply	Independent
4 quadrant operation	No
Time constants => 0-Short;1-Normal	1
Extra Input Signal?	No
Connected to a node loop with	3 phase view

Máquina de polos salientes + sistema de excitação estático

- Visto que o regulador de velocidade e a turbina hidráulica não foram modelados, optou-se por empregar o modo *velocidade constante* para simular a máquina. Neste modelo, as equações da máquina são empregadas para análise de transitório, mas a velocidade é considerada constante durante todo o período de simulação.
- O valor da impedância de aterramento do estator tem influência nos transitórios de tensão e corrente do gerador durante defeitos desequilibrados. Nesta análise optou-se por apresentar os resultados para as duas situações extremas, *i.e.*, estator isolado e solidamente aterrado

Casos analisados

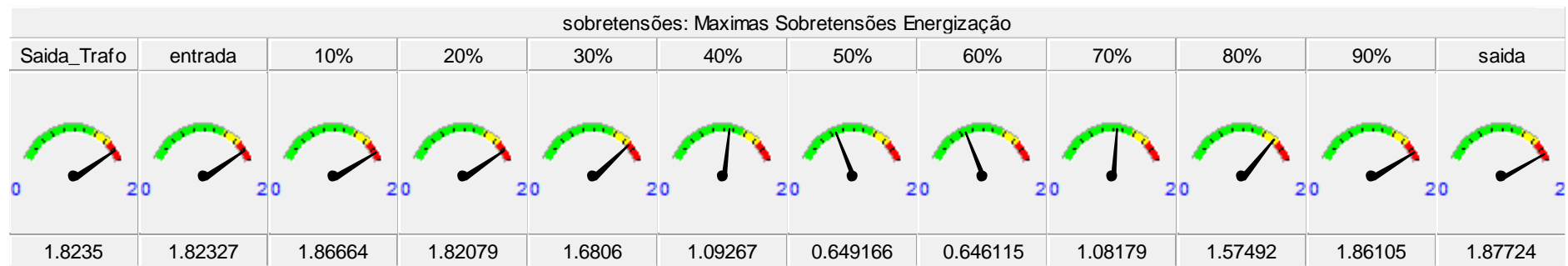
- Gerador com Controle Automático de Tensão
 - ✓ Energização
 - ✓ Defeitos:
 - Curto-circuito trifásico em 78,2 % (3/4 da linha)
 - Curto-circuito monofásico em 78,2% (3/4 da linha)
- Gerador com Excitação Constante
 - ✓ Energização
 - ✓ Defeitos:
 - Curto-circuito trifásico em 78,2 % (3/4 da linha)
 - Curto-circuito monofásico em 78,2% (3/4 da linha)
- Gerador com Controle Automático de Tensão – Tensão de Excitação Reduzida
 - ✓ Energização
 - ✓ Defeitos:
 - Curto-circuito trifásico em 78,2 % (3/4 da linha)
 - Curto-circuito monofásico em 78,2% (3/4 da linha)
- Gerador com Excitação Constante – Tensão de Excitação Reduzida
 - ✓ Energização
 - ✓ Defeitos:
 - Curto-circuito trifásico em 78,2 % (3/4 da linha)
 - Curto-circuito monofásico em 78,2% (3/4 da linha)

Gerador com controle automático de tensão: Energização

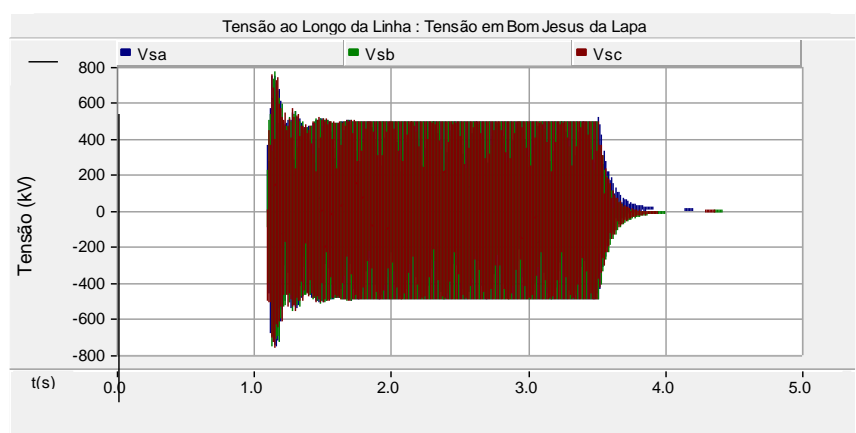
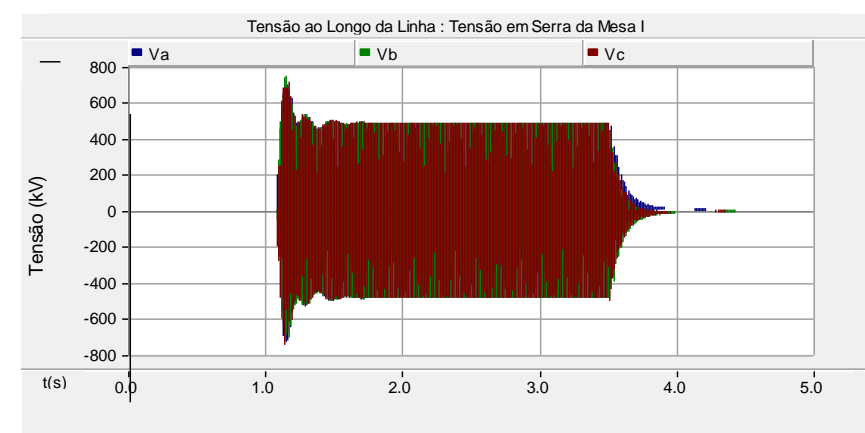
Os resultados de energização foram obtidos com base nas seguintes premissas:

- Antes da energização o gerador está operando em vazio com controle de tensão ajustado para manter a tensão terminal em 1,0 pu. Nestas condições, verificou-se que 1 segundo de simulação é suficiente para o sistema operar em regime permanente.
- Realizou-se a energização sem controle de passagem por zero da tensão e sem resistor de pré-inserção de forma a manter os resultados conservadores. Os disjuntores de energização das três fases, instalados após os transformadores, foram fechados simultaneamente em $t = 1,086$ s e abertos em $t = 3,5$ s. Os valores máximos de sobretensões na rede nessas condições ao longo da linha são da ordem de 1,88 pu, tendo seu valor mínimo no meio da linha (50% - 60%) em torno 0,42 pu.

Gerador com controle automático de tensão: Energização

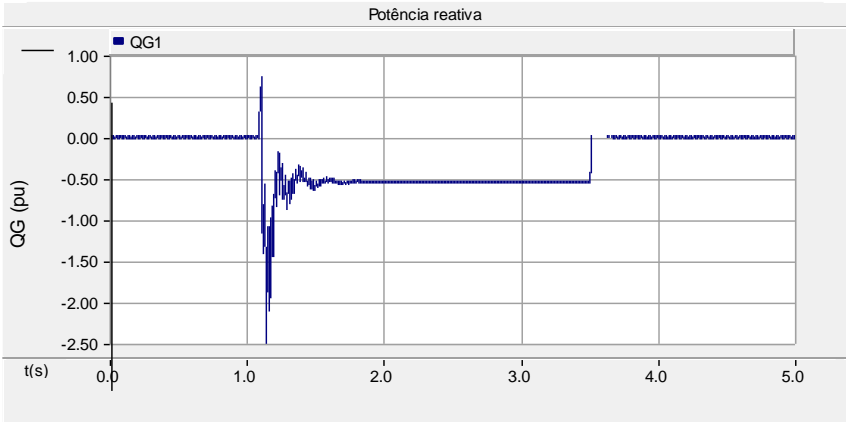
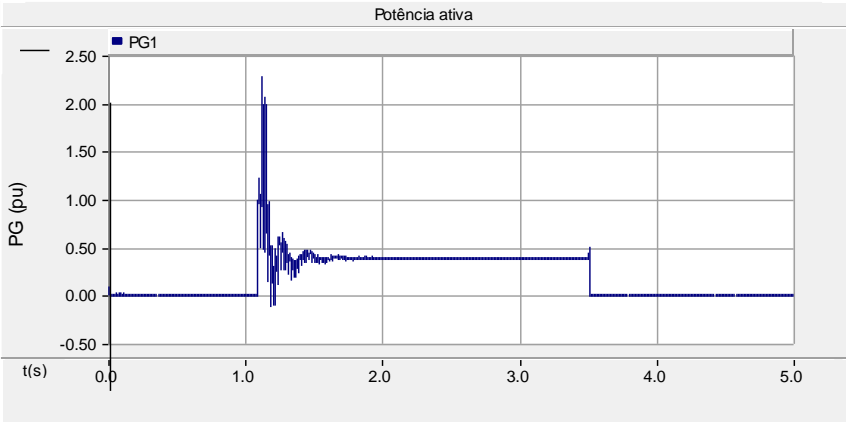


Valores máximos de sobretensões na rede

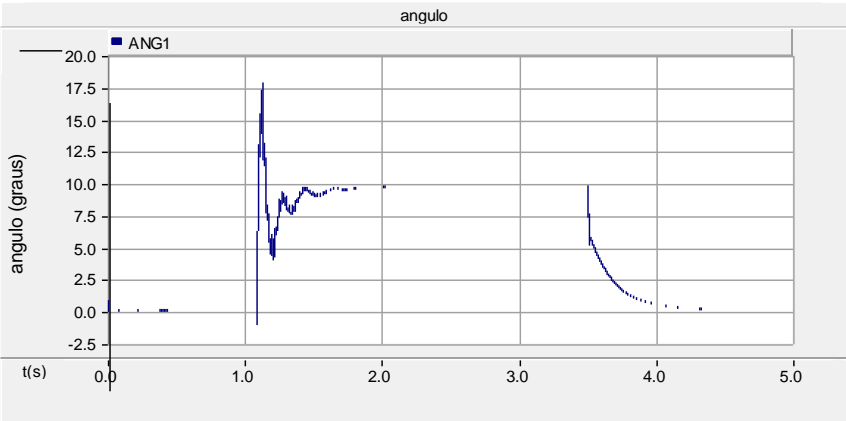
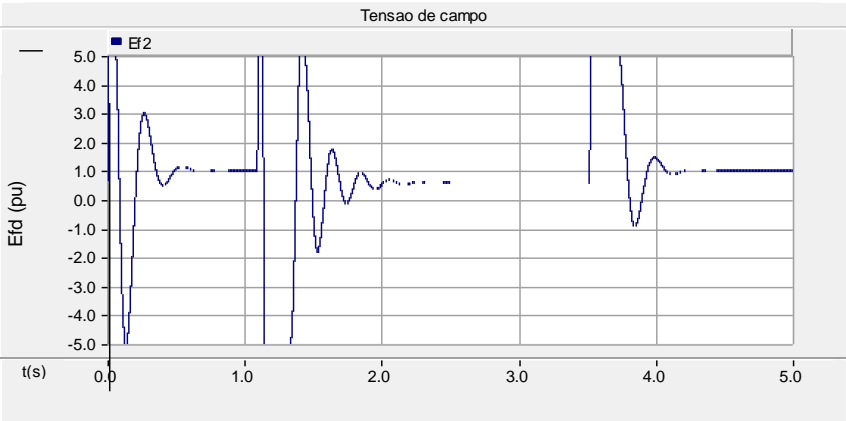


Formas de ondas das tensões no início e no final da linha

Gerador com controle automático de tensão: Energização

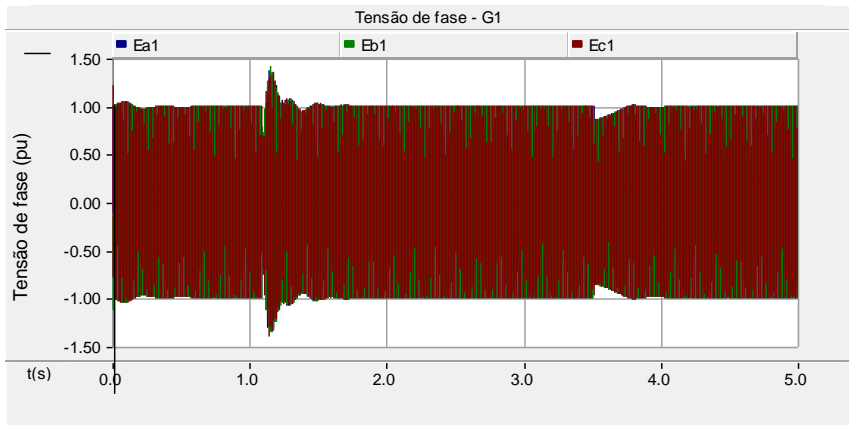
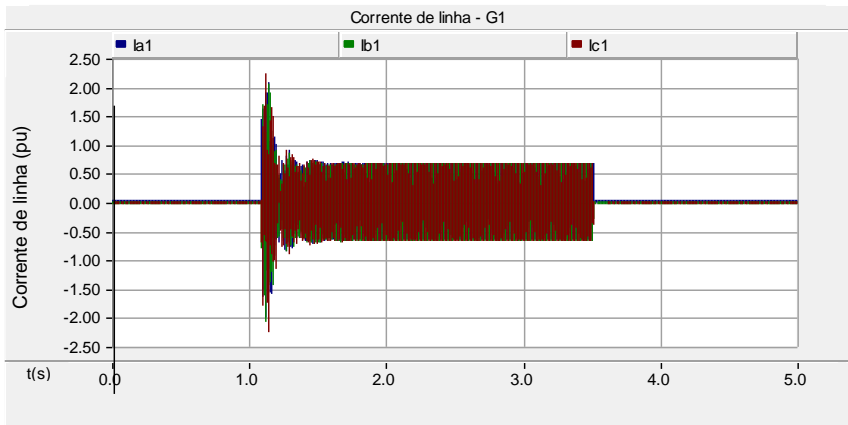


Comportamento das potências ativa e reativa injetadas pelo gerador

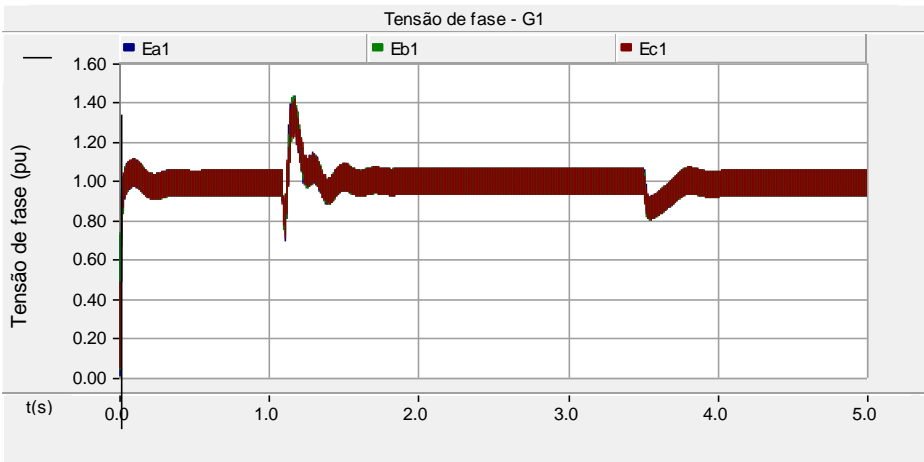


Comportamento da tensão de campo e do ângulo do rotor

Gerador com controle automático de tensão: Energização

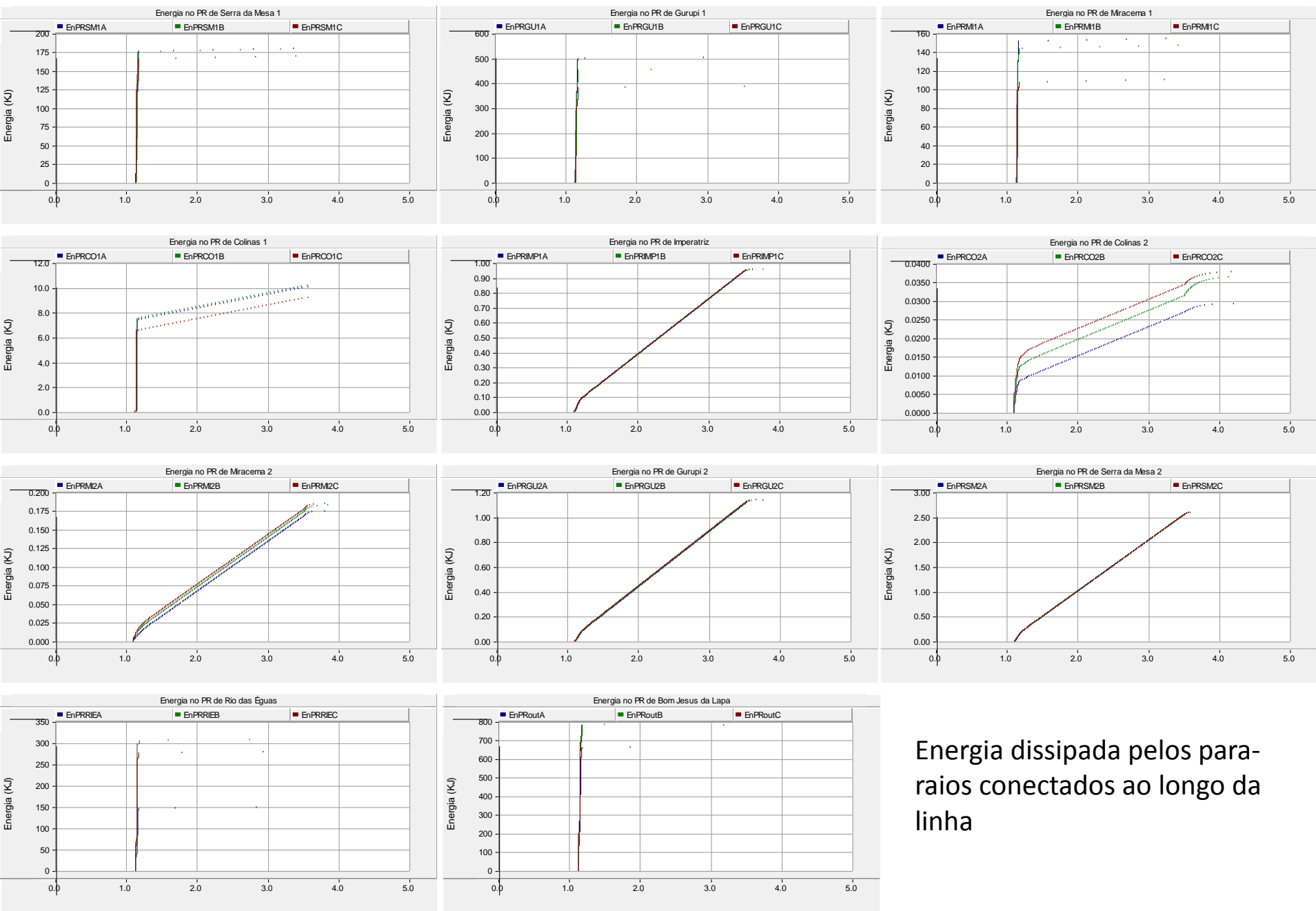


Formas das ondas de tensões e correntes fornecidas pelo gerador



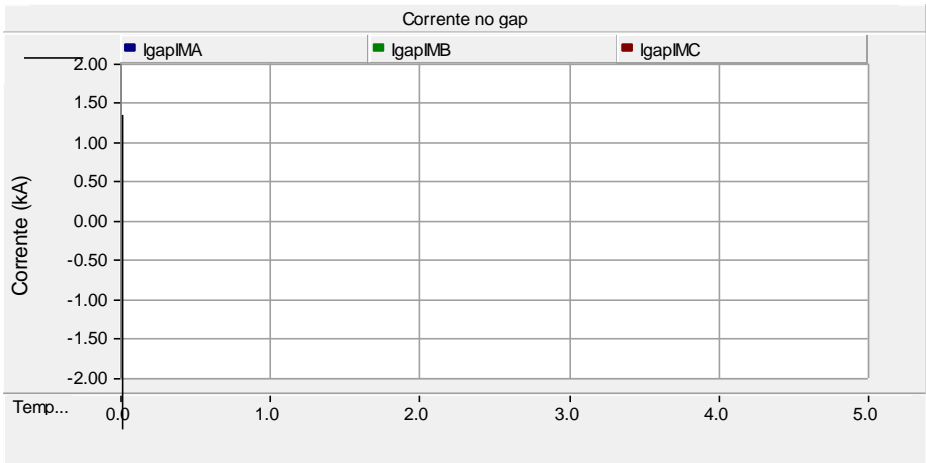
Valor eficaz da tensão de fase nos terminais do gerador

Gerador com controle automático de tensão: Energização



Energia dissipada pelos para-raios conectados ao longo da linha

Gerador com controle automático de tensão: Energização



Comportamento do gap conectado ao longo da linha (SE Imperatriz)

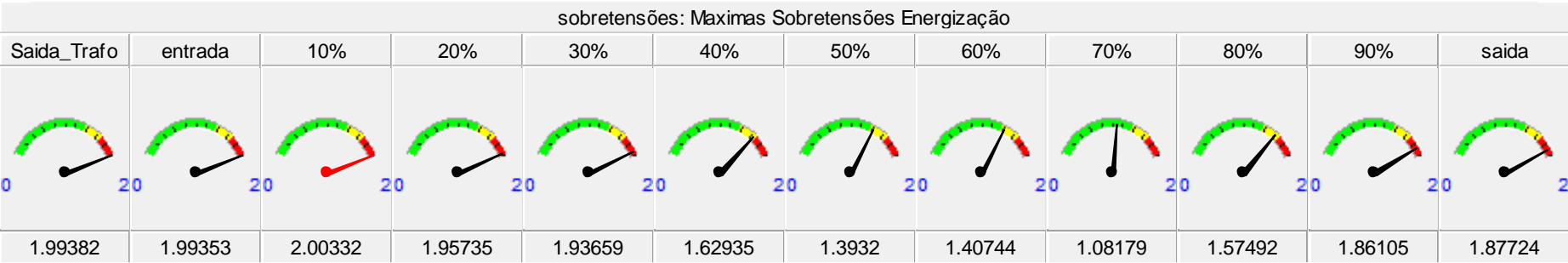
Gerador com controle automático de tensão: Defeitos

A análise dos transitórios das variáveis dos geradores durante curtos-circuitos tem dois objetivos principais: (1) garantir que o gerador não será exposto a transitórios extremos que possam acarretar em avarias sérias e (2) garantir que o sistema de proteção é capaz de detectar a situação de forma a desenergizar o circuito.

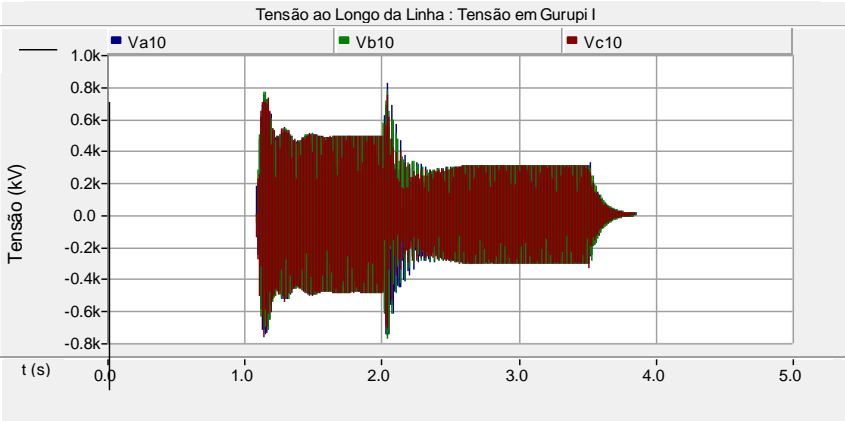
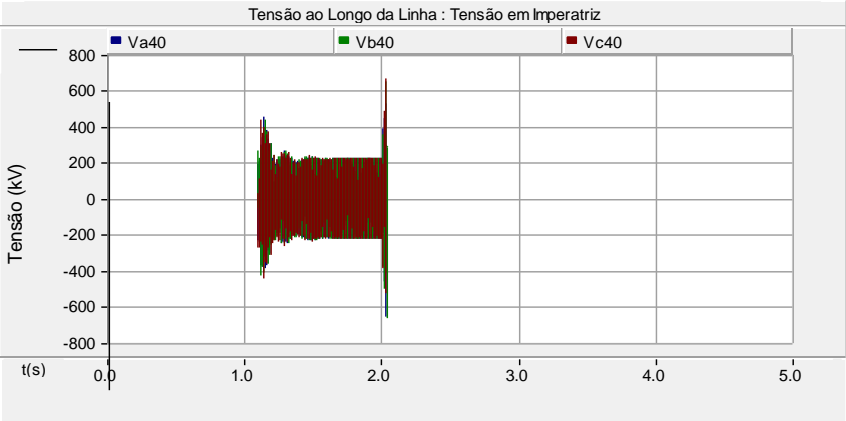
Independente do tipo de curto-circuito aplicado, as seguintes premissas foram adotadas:

- A linha é energizada em $t = 1,086$ s e desenergizada em $t = 3,5$ s;
- A falta é aplicada em $t = 2,0$ s e eliminada em $t = 2,50$ s;
- O valor de resistência de falta é de 10 Ohms;
- A distância do ponto de aplicação da falta é em relação ao lado de alta do transformador do gerador (Subestação Serra da Mesa I);
- Durante curtos-circuitos desequilibrados (fase-terra) a forma de aterramento do gerador tem influência sobre a análise do sistema de proteção. Visto que durante a realização destes estudos, não havia informações precisas sobre a forma de aterramento dos geradores em Serra da Mesa, optou-se por analisar os dois extremos: gerador com neutro isolado (resistência de aterramento igual a 1×10^5 Ohms) e solidamente aterrado (resistência de aterramento igual a 0 Ohm);
- Os curtos-circuitos trifásicos e monofásicos foram aplicados em aproximadamente 3/4 de comprimento de linha visto que é sabido que tal localização causa as maiores sobretensões no sistema;
- Todos os resultados foram obtidos considerando energização com tensão plena, ou seja o gerador foi ajustado para manter 1,0 pu de tensão terminal.

Gerador com controle automático de tensão: Defeitos – ¾ da linha; curto trifásico

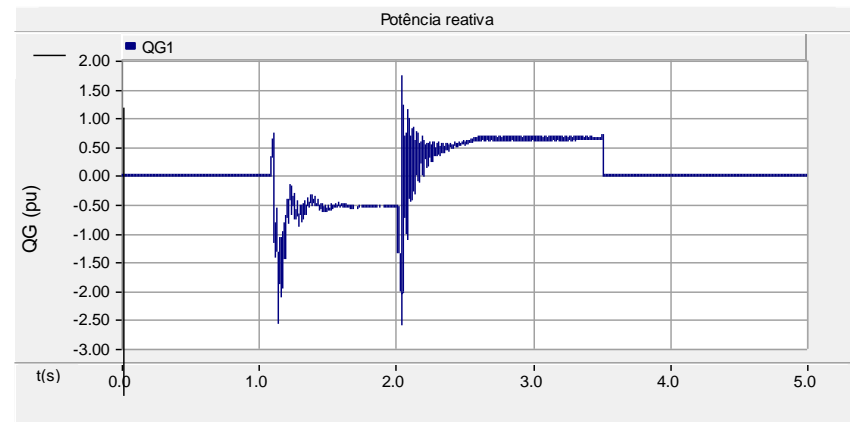
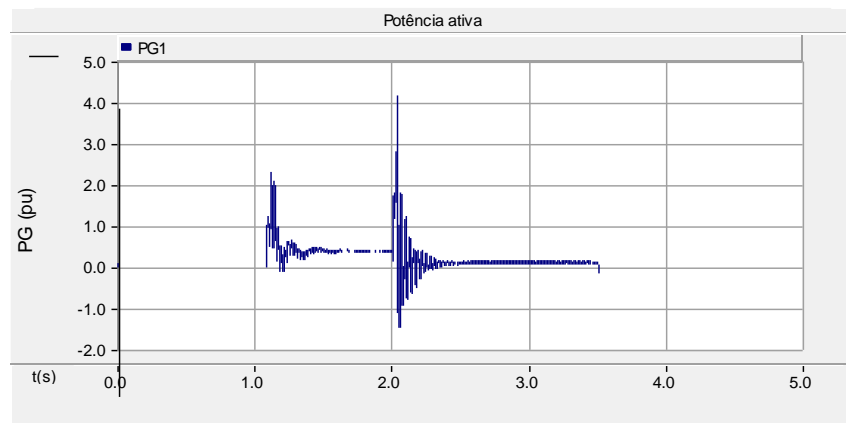


Valores máximos de sobretensões na rede (curto-circuito trifásico em 78,2%)

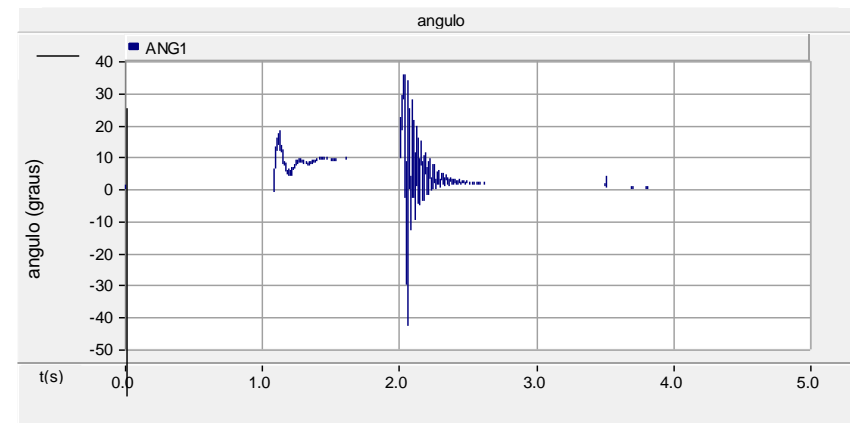
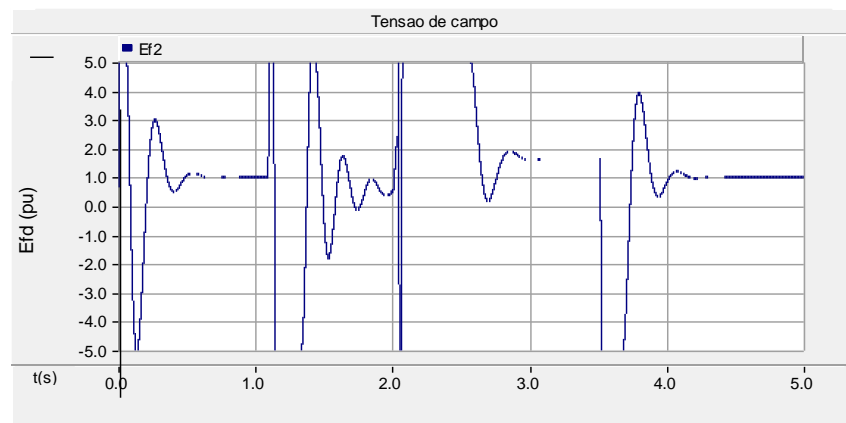


Formas das ondas das tensões na Subestação Imperatriz e Gurupi I

Gerador com controle automático de tensão: Defeitos – $\frac{3}{4}$ da linha; curto trifásico

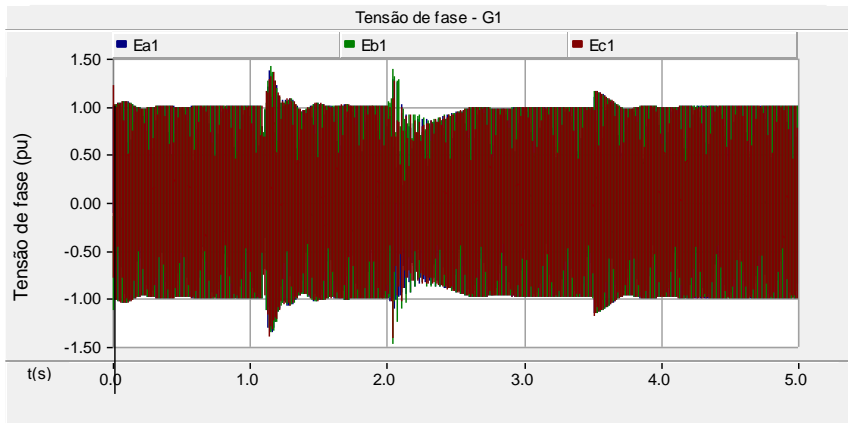
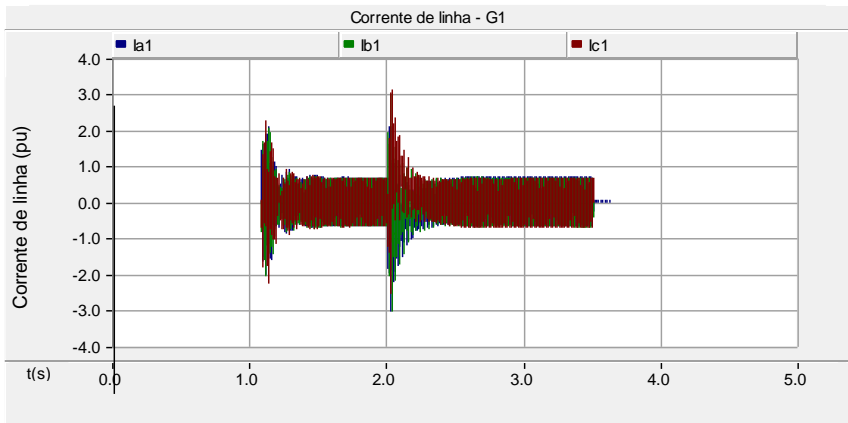


Comportamento das potências ativa e reativa injetadas pelo gerador

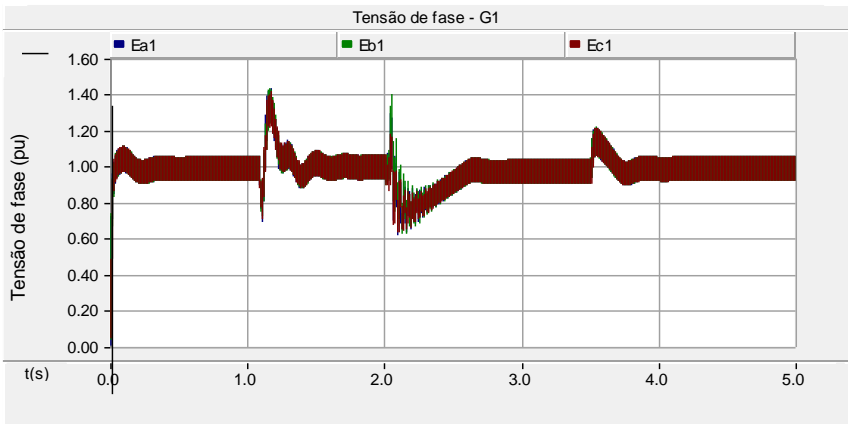


Comportamento da tensão de campo e do ângulo do rotor

Gerador com controle automático de tensão: Defeitos – ¾ da linha; curto trifásico

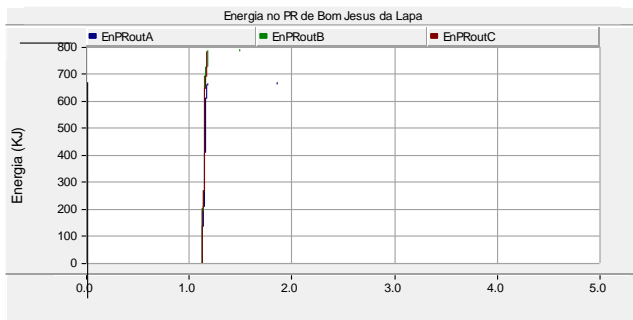
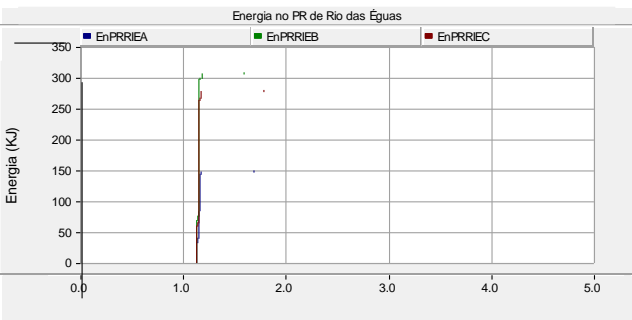
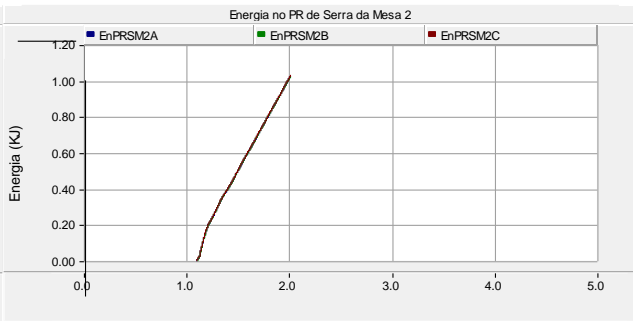
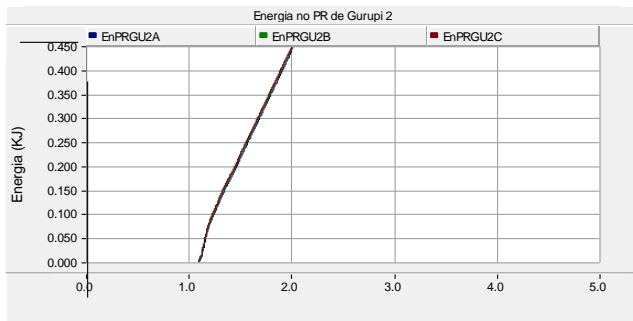
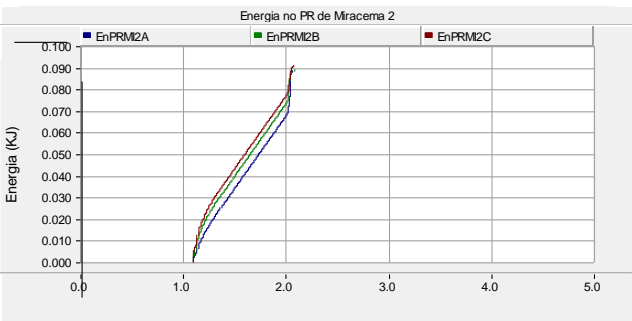
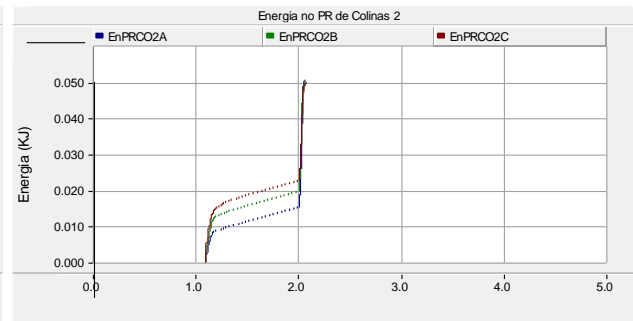
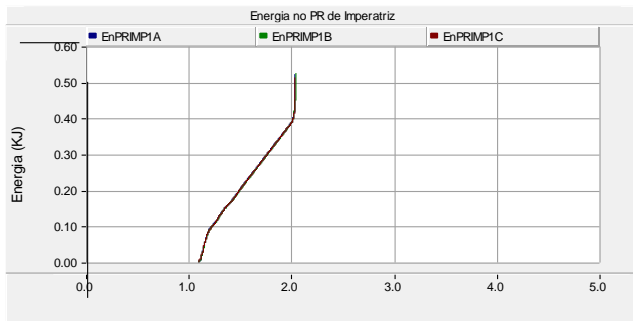
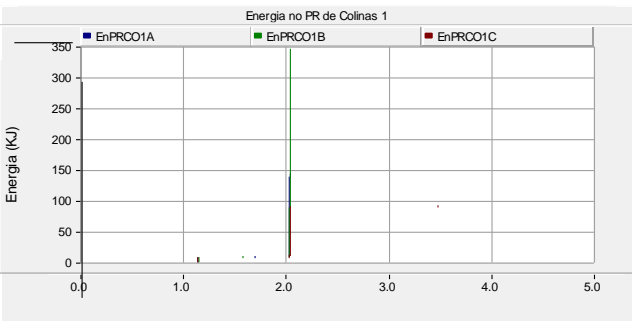
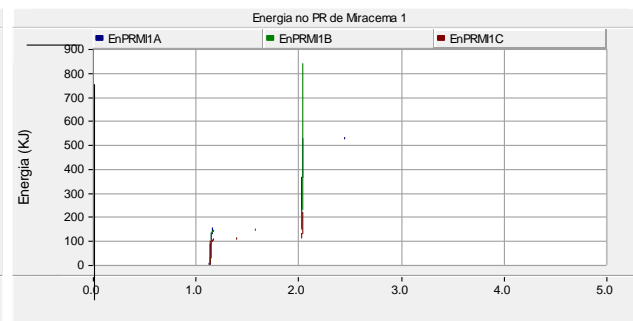
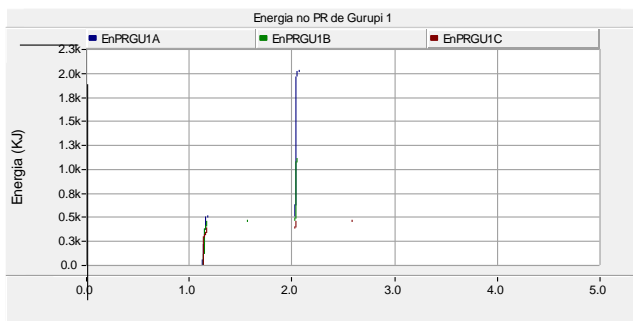
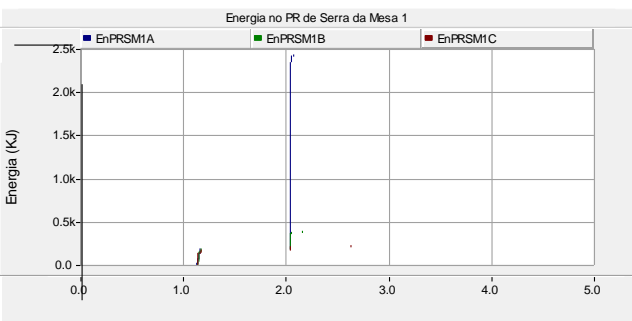


Formas das ondas de tensões e correntes fornecidas pelo gerador



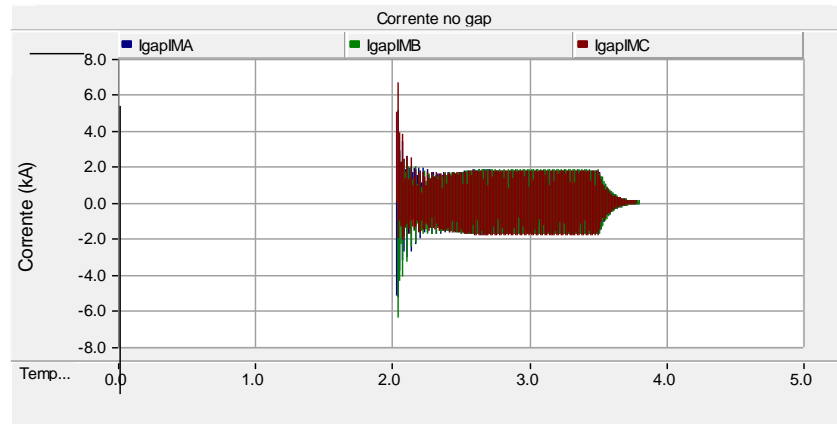
Valor eficaz da tensão de fase nos terminais do gerador

Gerador com controle automático de tensão: Defeitos – ¾ da linha; curto trifásico



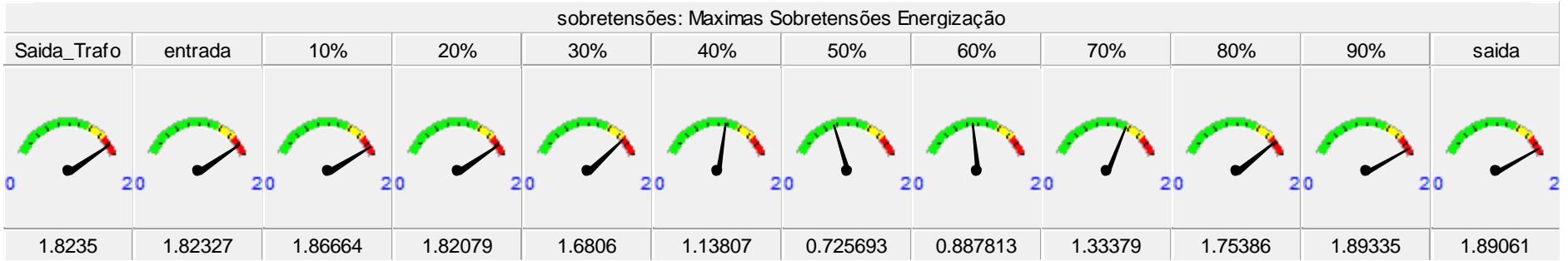
Energia dissipada pelos para-raios conectados ao longo da linha

Gerador com controle automático de tensão: Defeitos – $\frac{3}{4}$ da linha; curto trifásico

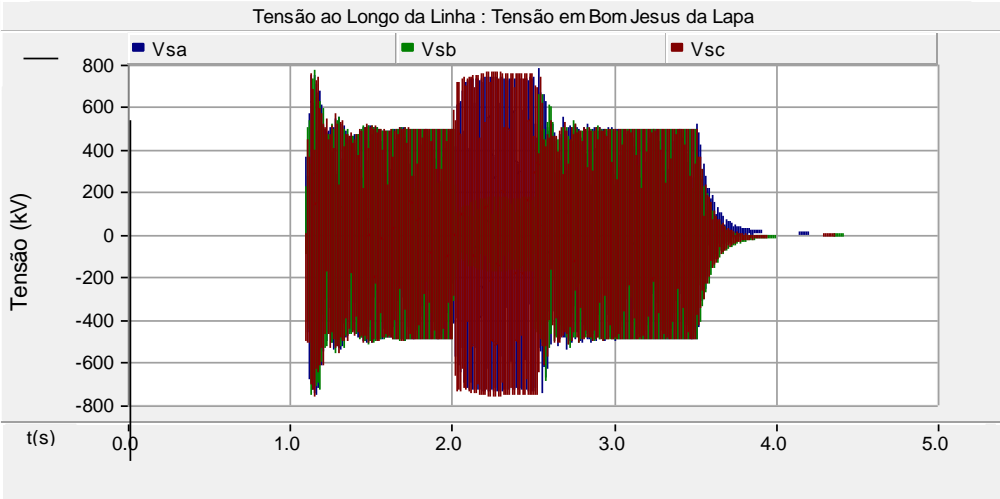


Comportamento do gap conectado ao longo da linha (SE Imperatriz)

Gerador com controle automático de tensão: Defeitos – ¾ da linha; curto monofásico

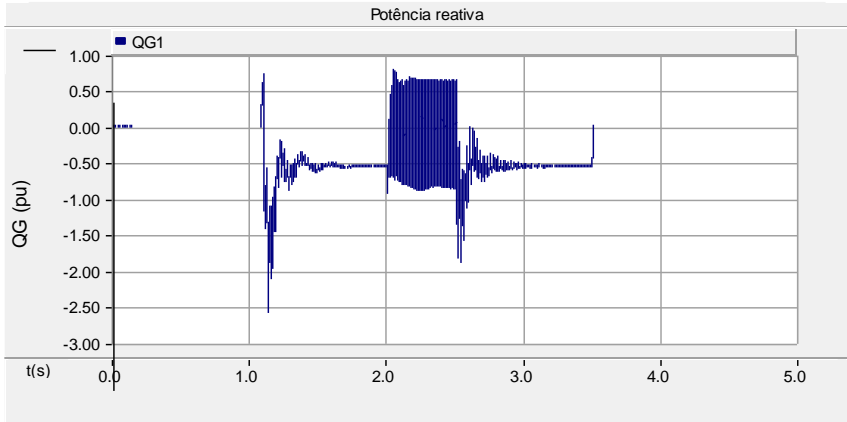
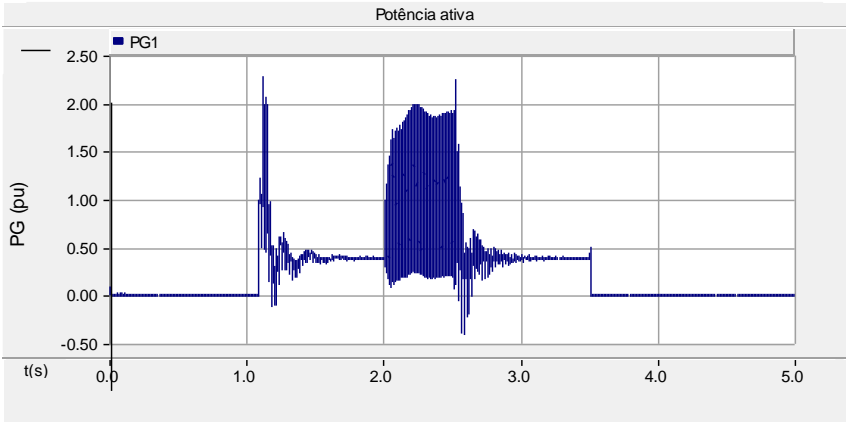


Valores máximos de sobretensões na rede (curto-circuito fase-terra em 78,2%)

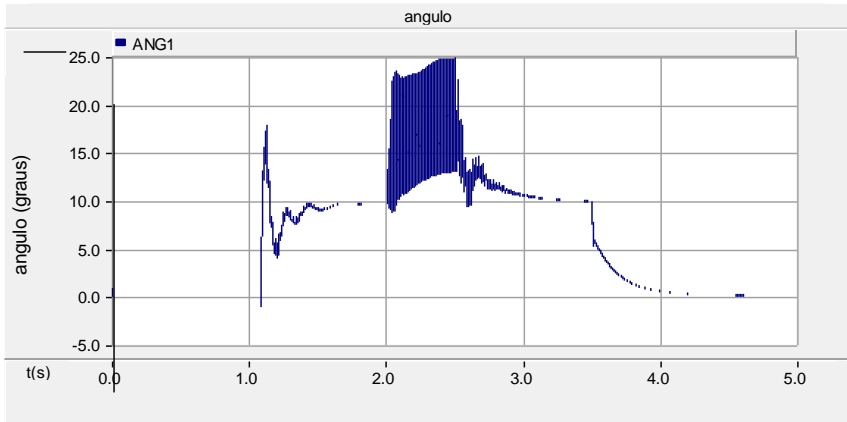
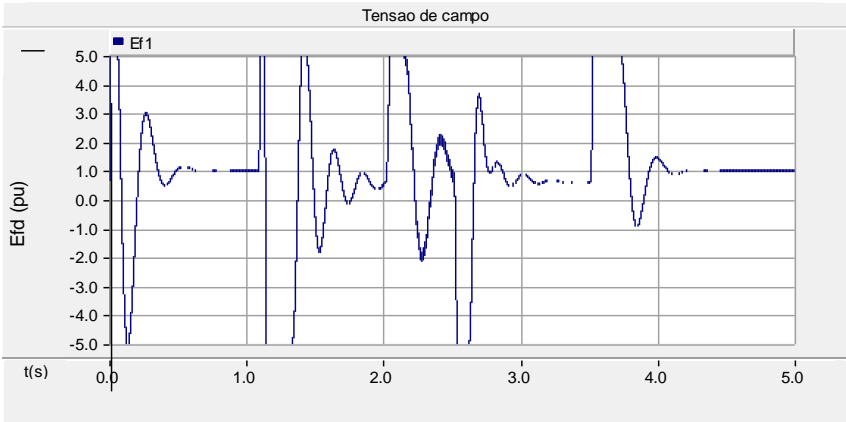


Formas das ondas das tensões na Subestação Jesus da Lapa

Gerador com controle automático de tensão: Defeitos – ¾ da linha; curto monofásico

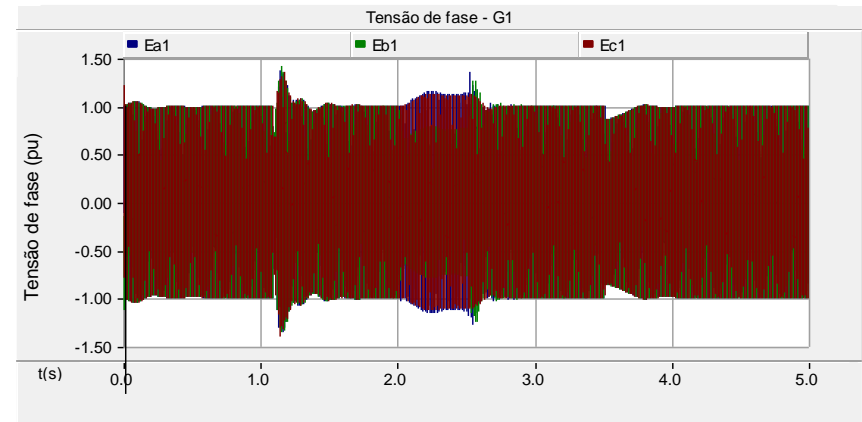
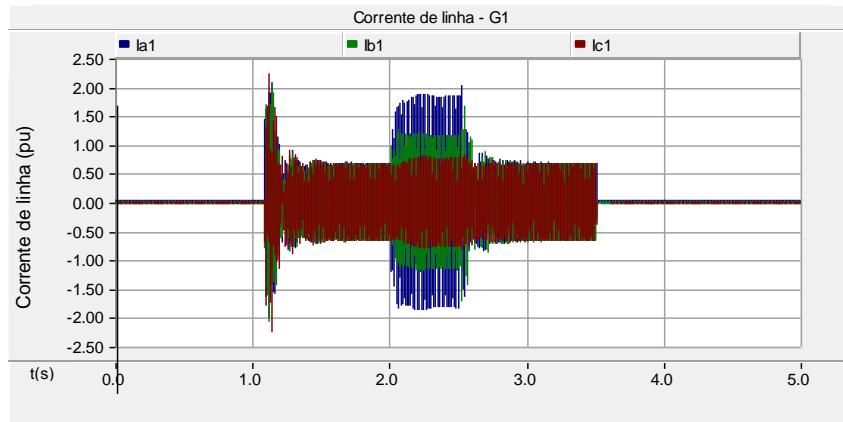


Comportamento das potências ativa e reativa injetadas pelo gerador

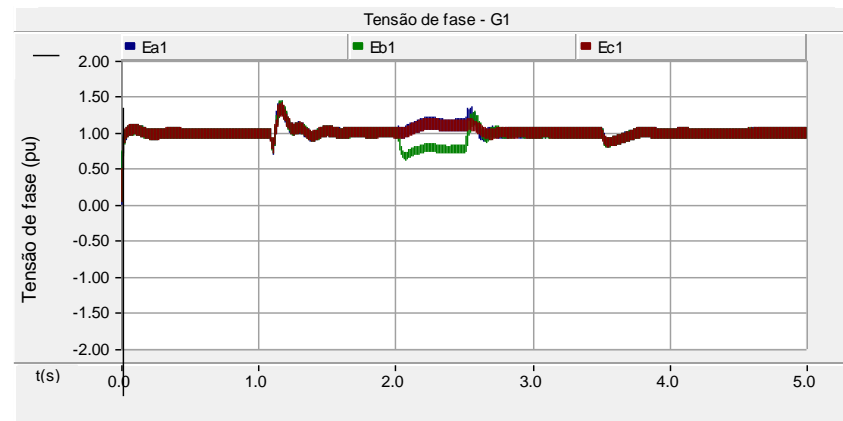


Comportamento da tensão de campo e do ângulo do rotor

Gerador com controle automático de tensão: Defeitos – $\frac{3}{4}$ da linha; curto monofásico

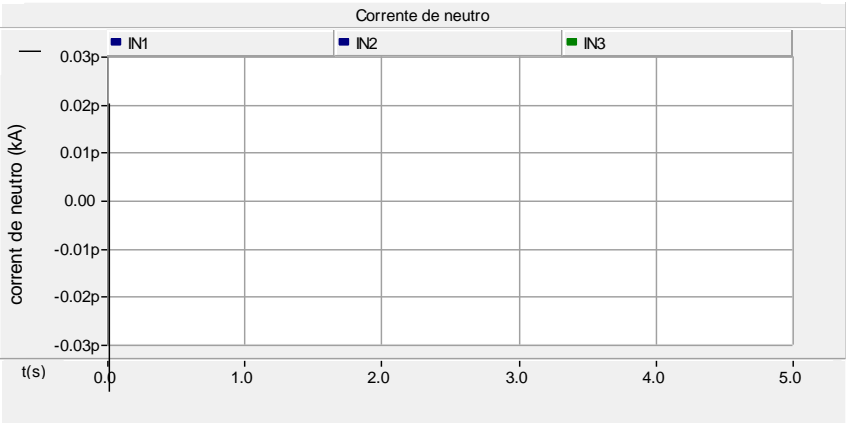
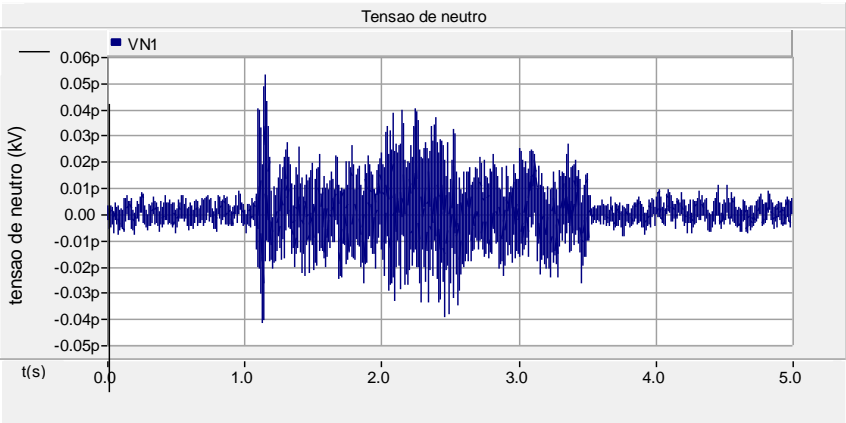


Formas das ondas de tensões e correntes fornecidas pelo gerador

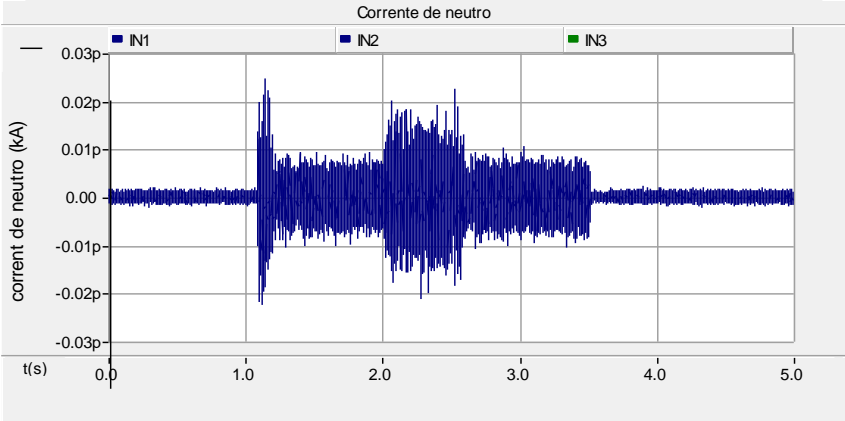
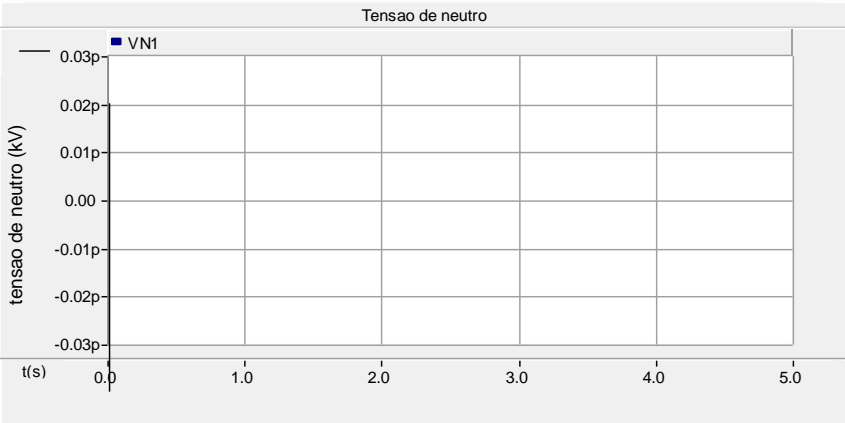


Valor eficaz da tensão de fase nos terminais do gerador

Gerador com controle automático de tensão: Defeitos – ¾ da linha; curto monofásico



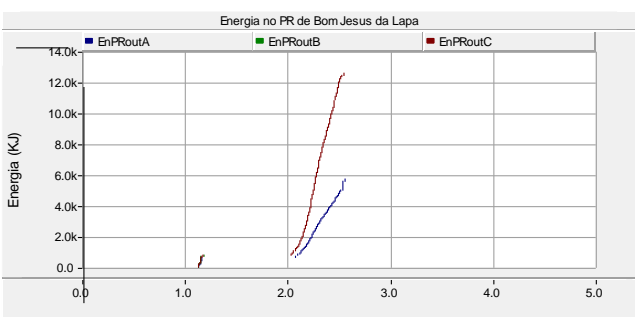
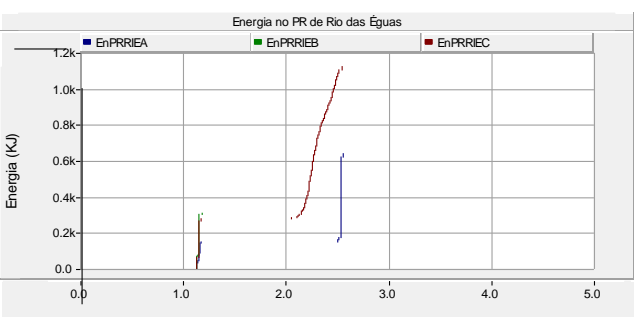
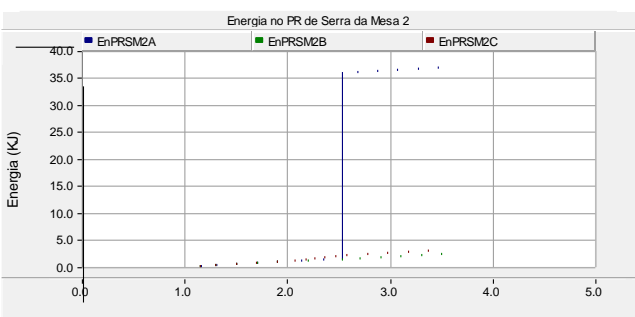
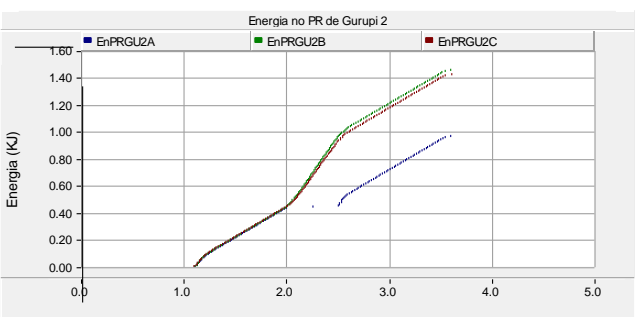
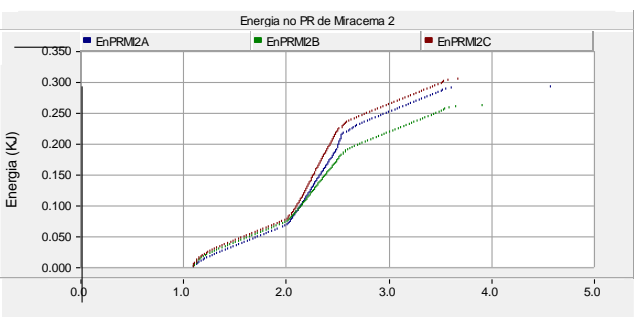
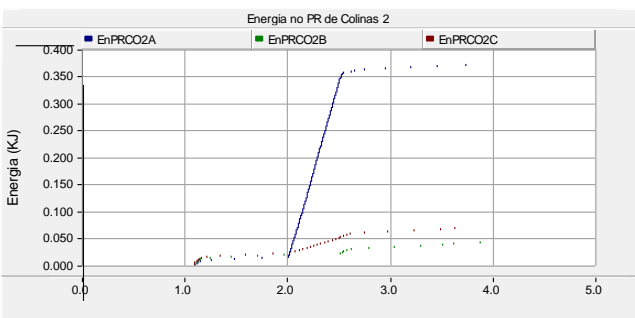
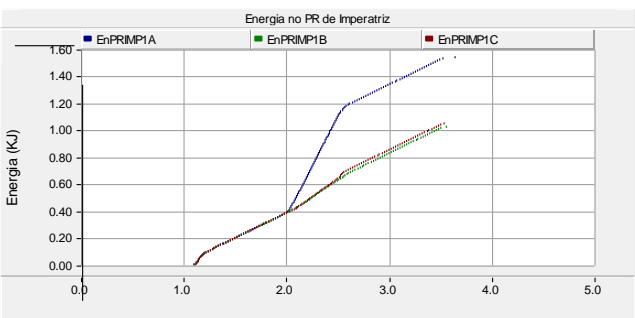
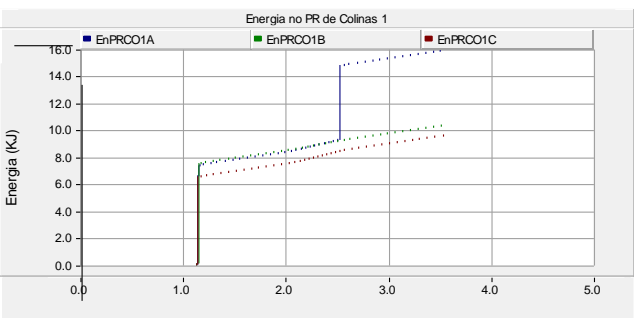
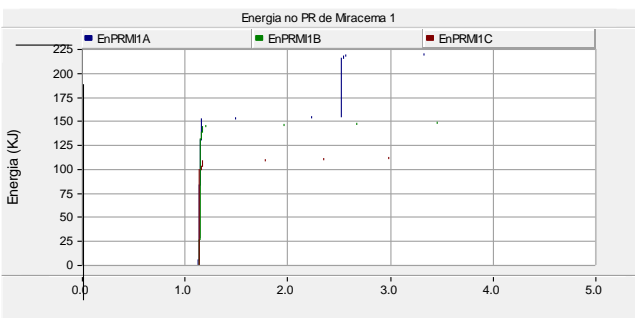
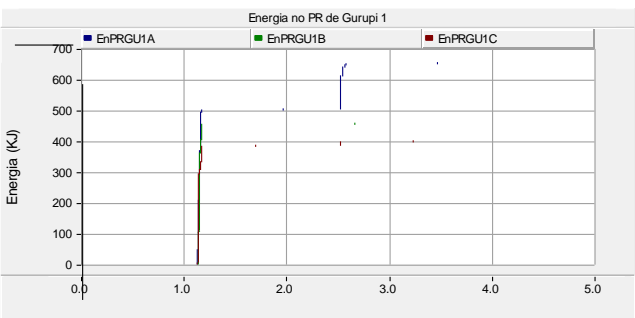
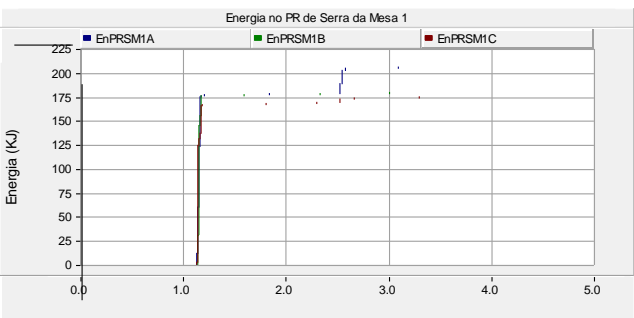
neutro isolado



neutro aterrado

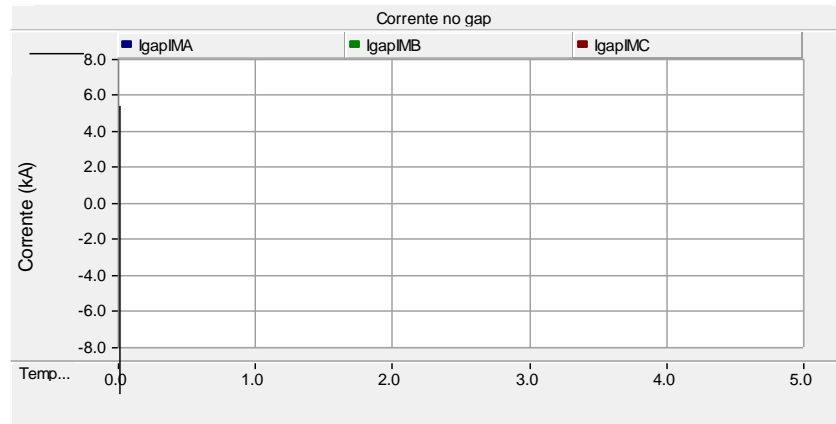
Valor eficaz da tensão e corrente de neutro

Gerador com controle automático de tensão: Defeitos – ¾ da linha; curto monofásico



Energia dissipada pelos para-raios conectados ao longo da linha

Gerador com controle automático de tensão: Defeitos – $\frac{3}{4}$ da linha; curto monofásico



Comportamento do gap conectado ao longo da linha (SE Imperatriz)

- **Transitórios causados pela energização**

Com base nos resultados obtidos, pode-se verificar que os transitórios causados pela energização da linha de pouco mais de meio comprimento de onda não são severos, não implicando em riscos para os geradores. Ressalta-se que as simulações foram realizadas sem considerar as possibilidades de energização controlada ou o uso de resistores de pré-inserção, sendo que tais métodos resultariam em diminuição dos transitórios.

- **Transitórios causados por curtos-circuitos**

Verificou-se que dependendo do defeito, os transitórios não acarretam em maiores severidades aos geradores, contudo, nestes casos é fundamental que a proteção da Subestação de Serra de Mesa I seja capaz de detectar a situação defeituosa. Por outro lado, a ocorrência de um curto-circuito trifásico ou monofásico acima de $3/4$ do comprimento da linha causa transitórios bastante severos aos geradores sendo fundamental que tal situação seja rapidamente detectada pelo sistema de proteção.