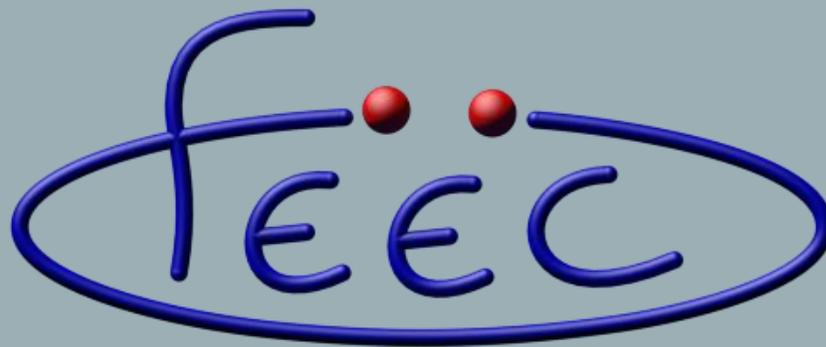


UNICAMP



AVALIAÇÃO DA ELEVAÇÃO DO POTENCIAL DE MALHAS DE ATERRAMENTO INTERCONECTADAS

Disciplina: IT306 - Tópicos em Sistemas de Energia III

Roberto Tilhaqui Junior RA:233671

Prof. Dr. José Pissolato Filho

Dr. Anderson Ricardo Justo de Araújo

OBJETIVOS

- Apresentação de métodos para modelagem de sistemas de aterramento.
- Explicação da abordagem a parâmetros concentrados para a modelagem de sistemas de aterramento.
- Observar alteração na elevação do potencial (*Ground Rise Potencial* - GPR) de quatro casos onde uma descarga atmosférica atinge três malhas de aterramento interconectadas. Malhas íntegras e danificadas.
- Observar GPR mediante inclusão ou não de hastes de aterramento.
- Reprodução do artigo de (Araújo et al, 2019) no ATP acrescido de algumas adaptações.

SISTEMAS DE ATERRAMENTO

- Têm como função básica facilitar o fluxo de corrente de falta para a terra, criando, portanto um caminho de baixa impedância (Silva et al., 2012).
- Devem promover a segurança durante transitórios eletromagnéticos e garantir operação confiável do sistema elétrico sob condições anormais (Araújo et al., 2019).
- Além de causar mal funcionamento, interferências e destruição de equipamentos elétricos e eletrônicos, as correntes injetadas e tensões induzidas podem ainda elevar o risco de danos às pessoas próximas da ocorrência por meio das tensões de passo e toque (Cecconi et al., 2005).

SISTEMAS DE ATERRAMENTO



Figura 1: Malha de aterramento a ser instalada (Molchansky, 2020)

MODELOS MATEMÁTICOS DE SISTEMAS DE ATERRAMENTO

Existem três abordagens analíticas básicas para a avaliação de modelos de sistemas de aterramento excitados por elevadas correntes impulsivas causadas por descargas atmosféricas (Cecconi et al., 2005):

1. Abordagem via campos eletromagnéticos: O método mais rigoroso dentre os mencionados. Utiliza as teorias do eletromagnetismo baseadas nas equações de Maxwell resolvidas via métodos numéricos (FEM, FDTD, MoM, etc.)
2. Abordagem via linhas de transmissão: Avalia a modelagem de sistemas de aterramento pelo modelo de ondas viajantes descrito por Bergeron. Faz algumas aproximações em comparação com (1.)
3. Abordagem via parâmetros concentrados: Utiliza modelagem de circuitos elétricos R-L-C formando equivalentes π em cascata. Faz mais aproximações que (2.)

↑
Tempo de processamento
Precisão

↓
Simplicidade na
abordagem

Este trabalho fez avaliação pela abordagem via parâmetros concentrados

MODELAGEM DA MALHA VIA PARÂMETROS CONCENTRADOS

- Na literatura há diversas abordagens propostas por diversos autores (Grcev, Sunde, Cecconi, Sacepe, etc) para os modelos de condutores horizontais e hastes verticais.
- Para a modelagem dos condutores horizontais foi usada a formulação proposta por Cecconi et al., 2005.
- Para a modelagem das hastes verticais foi usada a formulação apresentada em Araújo et al., 2019.

MODELAGEM DA MALHA VIA PARÂMETROS CONCENTRADOS

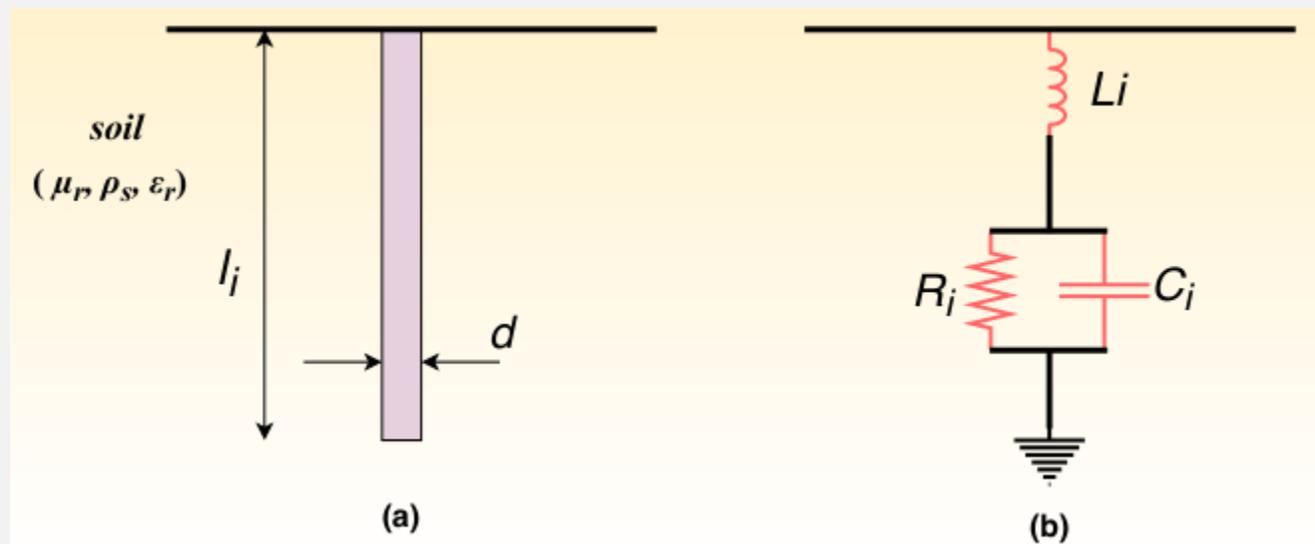


Figura 2: Modelo haste vertical (Araújo et al., 2019)

MODELAGEM DA MALHA VIA PARÂMETROS CONCENTRADOS

Cálculo de hastes verticais (Araújo et al., 2019):

$$R_i = \frac{\rho_{solo}}{2 \cdot \pi \cdot l_i} \left[\ln \left(\frac{8l_i}{d} \right) - 1 \right] [\Omega]; \quad L_i = \frac{\mu_0 \cdot l_i}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{4l_i}{d} \right) [H]; \quad C_i = \frac{\epsilon_r \cdot l_i}{18 \cdot \ln \left(\frac{4l_i}{d} \right)} \cdot 10^{-9} [F]$$

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} [NA^{-2}]; \quad \epsilon_0 = 8,845 \cdot 10^{-12} [A^2s^4kg^{-1}m^{-3}]$$

$$\epsilon_r = \textit{permissividade relativa}; \quad d = \textit{diâmetro da haste [m]}$$

$$\rho_{cobre} = 1,72 \cdot 10^{-8} [\Omega m]$$

MODELAGEM DA MALHA VIA PARÂMETROS CONCENTRADOS

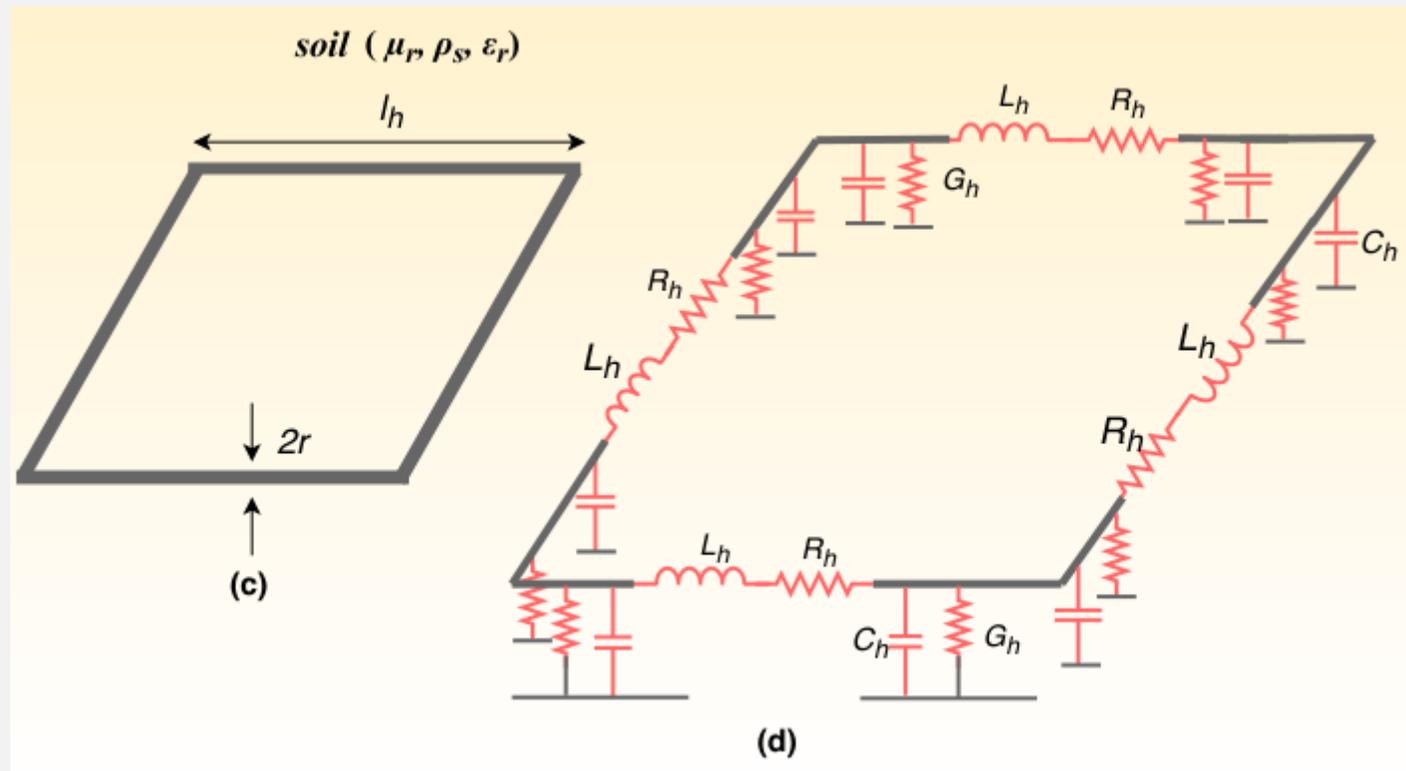


Figura 2: Modelo de mesh de condutor horizontal (Araújo et al., 2019)

MODELAGEM DA MALHA VIA PARÂMETROS CONCENTRADOS

Cálculo de condutores horizontais (Cecconi et al., 2005):

$$R_h = \frac{\rho_{cobre} \cdot l_h}{S} \quad C_h = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \mu_0 \cdot l_h^2}{2 \cdot L_h} \quad G_h = \frac{\mu_0 \cdot l_h^2}{2 \cdot \rho_{solo} \cdot L_h} = \frac{1}{R_E}$$

$$L_h = \frac{\mu_0 \cdot l_h}{4 \cdot \pi} \cdot \left[\ln \frac{2l_h}{r} + \ln \frac{l_h}{d} - 2 + \frac{2d}{l_h} - \frac{d^2}{l_h^2} + \frac{1}{2} \cdot \frac{d^4}{l_h^4} + \dots \right]$$

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} [NA^{-2}]; \quad \varepsilon_0 = 8,845 \cdot 10^{-12} [A^2s^4kg^{-1}m^{-3}]$$

ε_r = permissividade relativa; d = profundidade da malha

$$\rho_{cobre} = 1,72 \cdot 10^{-8} [\Omega m]$$

MODELAGEM DA MALHA VIA PARÂMETROS CONCENTRADOS

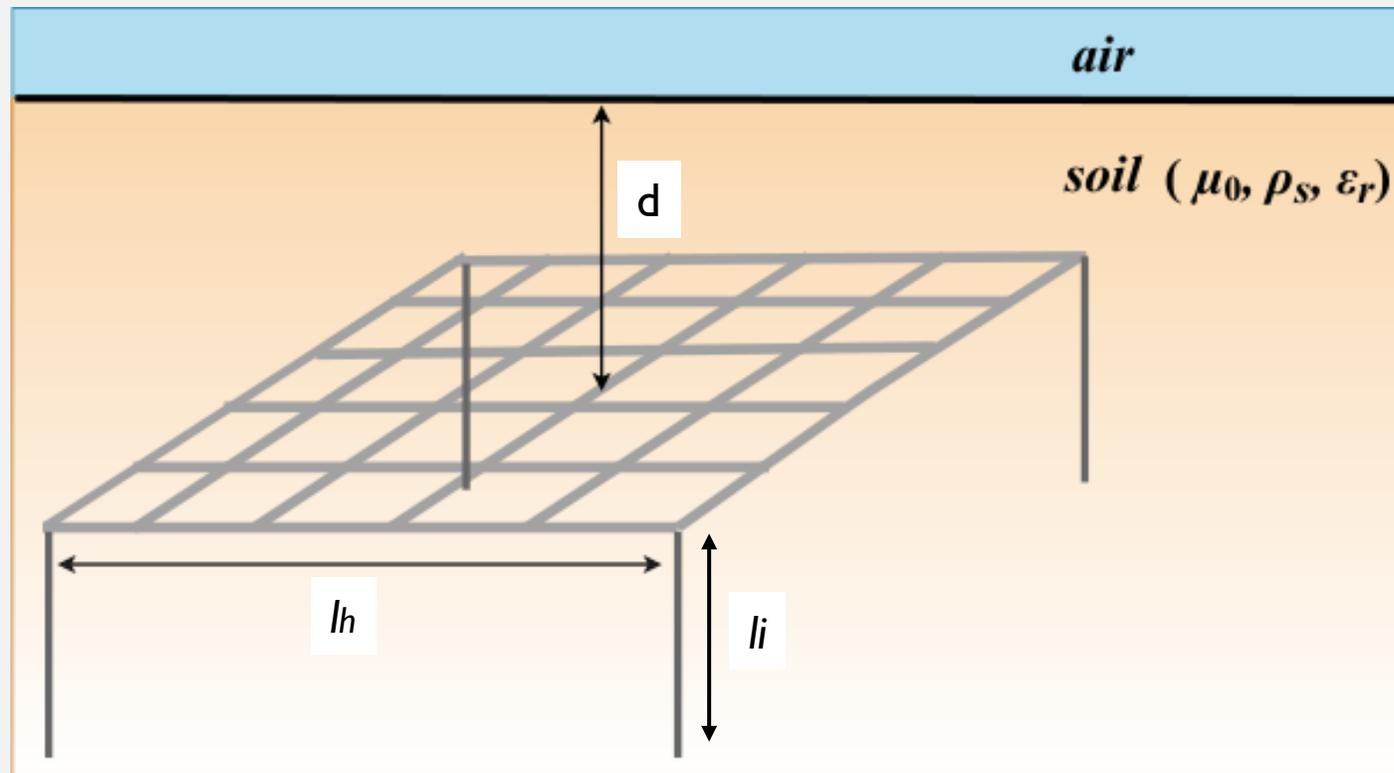


Figura 3: Modelo da malha sob avaliação, adaptado (Araújo et al., 2019)

MODELAGEM DA MALHA VIA PARÂMETROS CONCENTRADOS

- O efeito da dependência da frequência é garantido por meio da inclusão do parâmetro da profundidade d que os eletrodos estão enterrados (Cecconi et al. 2005).Vide figura 3.
- Nas simulações aqui abordadas, a modelagem via parâmetros concentrados dos condutores horizontais é realizada dividindo os eletrodos em N segmentos elementares de comprimento l_h , cada um deles modelados como um circuito π com os parâmetros R-L-G-C, onde R e L são a resistência e indutância longitudinal e G e C são a condutância e capacitância transversal (Cecconi et al., 2005).Vide figuras 3 e 4.

MODELAGEM DA MALHA VIA PARÂMETROS CONCENTRADOS

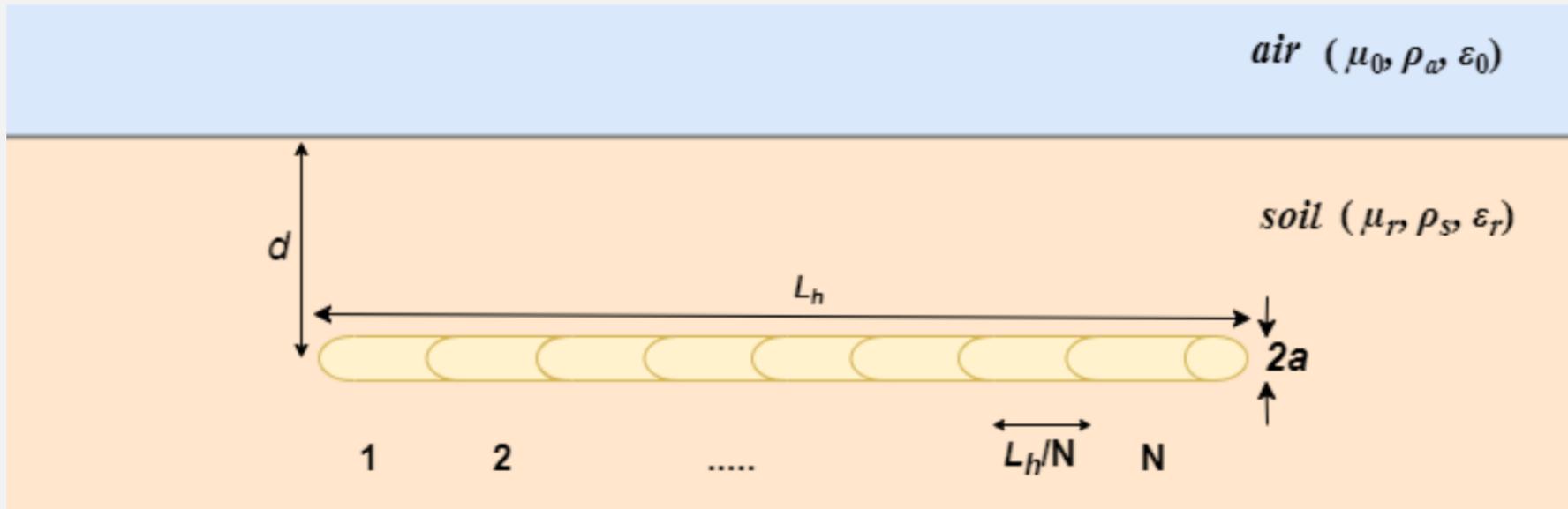


Figura 4: Modelo da malha sob avaliação, adaptado (Azevedo et al., 2020)

MODELAGEM DA MALHA VIA PARÂMETROS CONCENTRADOS

- A definição do tamanho de l_h leva em consideração o comprimento de onda no solo λ_{solo} e também o raio r do eletrodo, devendo atender a duas condições impostas (Silva, 2016):
 - O comprimento l_h deve ser maior que 5 vezes o raio r do eletrodo (Silva, 2016).
 - O comprimento l_h deve ser no máximo igual ao décimo do comprimento de onda no solo λ_{solo} para a maior faixa de frequência sob avaliação (Olsen; Willis, 1996)(Grcev; Amautovski-Toseva, 2003).

$$5r \leq l_h \leq \frac{\lambda_{solo}}{10}$$

MODELAGEM DA MALHA VIA PARÂMETROS CONCENTRADOS

$$\lambda_{solo} = \frac{2\pi}{\beta}; \quad \beta = \omega\sqrt{\mu\varepsilon} \left\{ \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2} + 1 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}$$

- $\omega = 2\pi f$, f é a frequência em Hz
- μ, ε, σ = permeabilidade, permissividade e condutividade do solo
- $\sigma = \frac{1}{\rho_{solo}}$
- (Grcev; Amautovski-Toseva, 2003)

PREMISSAS PARA SIMULAÇÃO

- Dimensões das malhas: 12x12m com 3m de lado em cada mesh.
- Modelagem da malha considerando solo homogêneo.
- Avaliação do GPR em três pontos aleatórios em cada malha.
- Malhas interconectadas a uma distância de 10m.
- Descarga atmosférica modelada como fonte impulsiva de corrente de 1,2/50 μ s.

Eletrodos	
Horizontais	Verticais
$\rho_{cu} = 1,72 \cdot 10^{-8} \Omega m$	$d = 16mm$
$l_h = 3m$	$l_i = 3m$
$r = 7mm$	$\rho_{solo} = 1000 \Omega m$
$d = 0,5m$	$\epsilon_r = 10$

Tabela 1: Dados da malha de aterramento (Araújo, 2019)

CÁLCULO DOS PARÂMETROS

Determinar comprimento do segmento elementar para eletrodo horizontal:

Atender critério $5r \leq l_h \leq \frac{\lambda_{solo}}{10}$:

$$\beta = \omega\sqrt{\mu\varepsilon} \left\{ \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2} + 1 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} = 0,8132m$$

- $\omega = 2\pi f = 2\pi \cdot 10^7$
- $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 = 4\pi \cdot 10^{-7}$
- $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r = 8,854 \cdot 10^{-12} \cdot 15 = 132,8 \cdot 10^{-12}$
- $\sigma = \frac{1}{\rho_{solo}} = \frac{1}{1000} = 10^{-3}$

$$\frac{\lambda_{solo}}{10} = \frac{2\pi}{10\beta} = \frac{2\pi}{10 \cdot 0,8132} = 0,7727m$$

$$5r = 5 \cdot 7 \cdot 10^{-3} = 35 \cdot 10^{-3}m$$

$$5r \leq l_h \leq \frac{\lambda_{solo}}{10}$$

$$0,035m \leq l_h \leq 0,7727m$$

$$l_h = 0,6m$$

\therefore 20 circuitos π por lateral de 12m

CÁLCULO DOS PARÂMETROS

Cálculo dos parâmetros do eletrodo horizontal:

$$R_h = \frac{\rho_{cobre} \cdot l_h}{S} = \frac{1,72 \cdot 10^{-8} \cdot 0,6}{\pi \cdot (7 \cdot 10^{-3})^2} = 335,2 \cdot 10^{-12} \Omega$$

$$\begin{aligned} L_h &= \frac{\mu_0 \cdot l_h}{4 \cdot \pi} \cdot \left[\ln \frac{2l_h}{r} + \ln \frac{l_h}{d} - 2 + \frac{2d}{l_h} - \frac{d^2}{l_h^2} + \frac{1}{2} \cdot \frac{d^4}{l_h^4} \right] = \\ &= \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,6}{4\pi} \cdot \left[\ln \frac{2 \cdot 0,6}{7 \cdot 10^{-3}} + \ln \frac{0,6}{0,5 \cdot 10^{-3}} - 2 + \frac{2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}}{0,6} - \frac{(0,5 \cdot 10^{-3})^2}{0,6^2} + \frac{(0,5 \cdot 10^{-3})^4}{2 \cdot 0,6^4} \right] = 2,055 \cdot 10^{-6} H \end{aligned}$$

$$C_h = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \mu_0 \cdot l_h^2}{2 \cdot L_h} = \frac{8,854 \cdot 10^{-12} \cdot 15 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,6^2}{2 \cdot 2,724 \cdot 10^{-7}} = 365,4 \cdot 10^{-12} F \rightarrow \frac{C_h}{2} = 182,7 \cdot 10^{-12} F$$

$$G_h = \frac{\mu_0 \cdot l_h^2}{2 \cdot \rho_{solo} \cdot L_h} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,6^2}{2 \cdot 1000 \cdot 2,724 \cdot 10^{-7}} = 2,751 \cdot 10^{-3} S \rightarrow R_E = \frac{1}{G_h} = 363,5 \Omega \rightarrow R_E \cdot 2 = 727 \Omega$$

CÁLCULO DOS PARÂMETROS

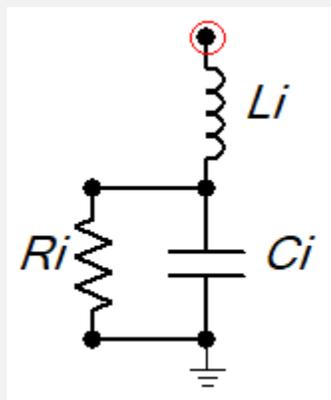
Cálculo dos parâmetros do eletrodo vertical:

$$R_i = \frac{\rho_{solo}}{2 \cdot \pi \cdot l_i} \left[\ln \left(\frac{8l_i}{d} \right) - 1 \right] = \frac{1000}{2\pi \cdot 3} \left[\ln \left(\frac{8 \cdot 3}{16 \cdot 10^{-3}} \right) - 1 \right] = 335 \Omega$$

$$L_i = \frac{\mu_0 \cdot l_i}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{4l_i}{d} \right) = \frac{4 \pi \cdot 10^{-7} \cdot 3}{2 \pi} \cdot \ln \left(\frac{4 \cdot 3}{16 \cdot 10^{-3}} \right) = 3,972 \cdot 10^{-6} H$$

$$C_i = \frac{\epsilon_r \cdot l_i}{18 \cdot \ln \left(\frac{4l_i}{d} \right)} \cdot 10^{-9} = \frac{15 \cdot 3}{18 \cdot \ln \left(\frac{4 \cdot 3}{16 \cdot 10^{-3}} \right)} \cdot 10^{-9} = 377,64 \cdot 10^{-10} F$$

MALHAS SOB ESTUDO



$5\pi_s$ em cascata por mesh

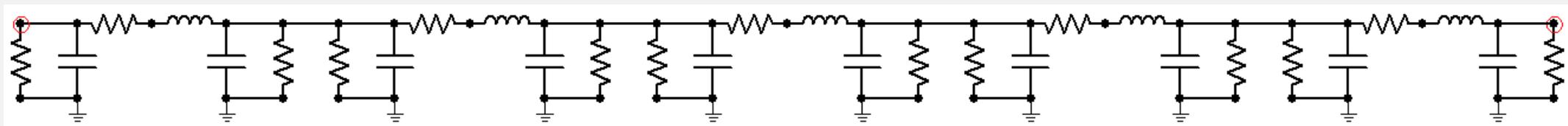
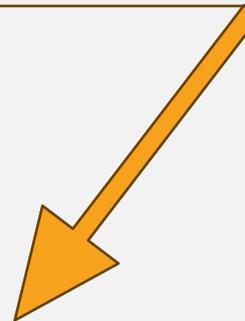


Figura 5: Modelagem dos eletrodos no ATP (Autor, 2023)

MALHAS SOB ESTUDO

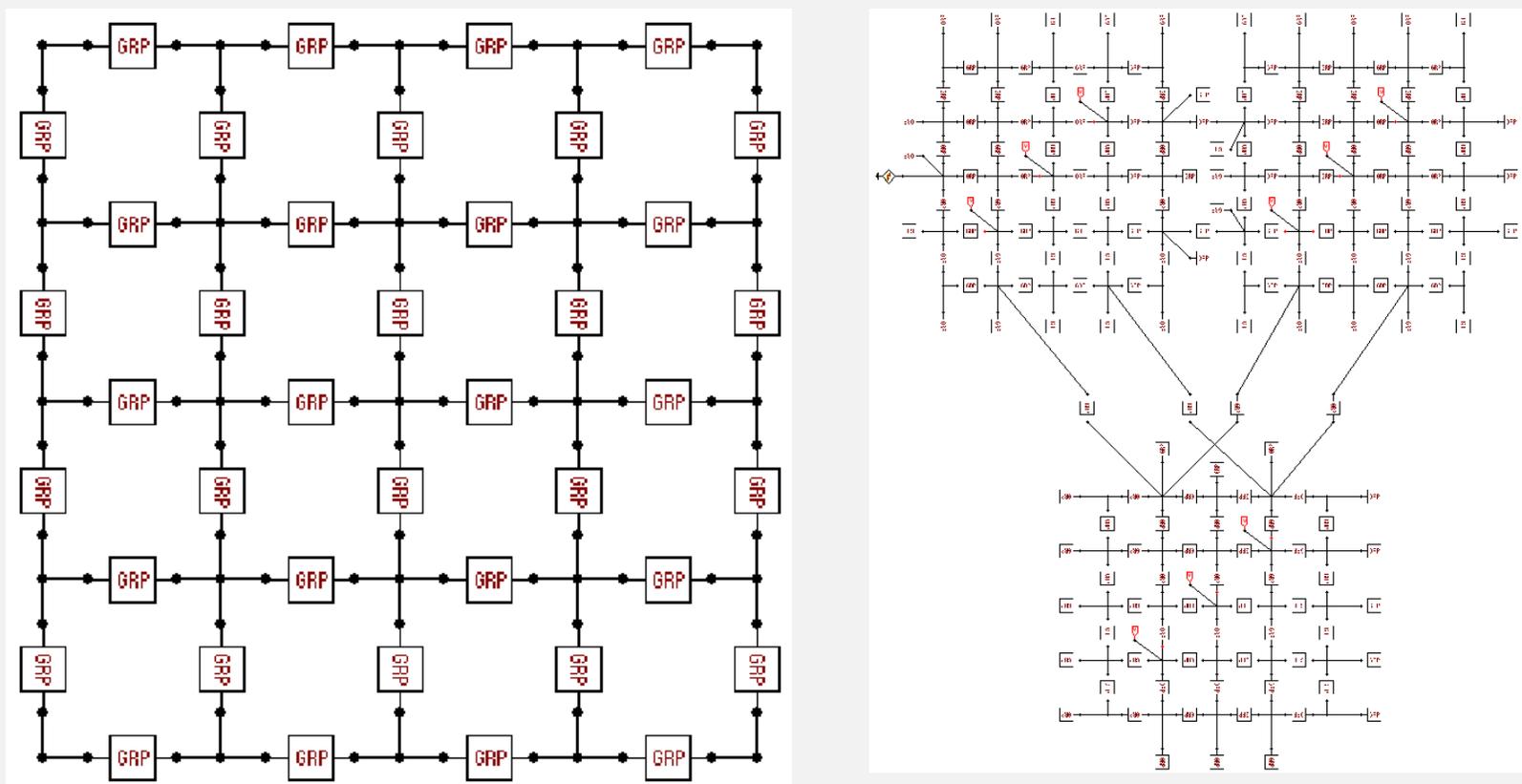


Figura 6: Modelagem das malhas no ATP (Autor, 2023)

CASOS A SEREM ESTUDADOS

- Caso 1: Malha individual sem hastes verticais
- Caso 2: Malhas interconectadas sem hastes verticais
- Caso 3: Malhas interconectadas com hastes verticais em cada intersecção
- Caso 4: Malhas interconectadas danificadas com hastes verticais
- Fonte impulsiva de corrente: $1,037(e^{-14710} - e^{-2471000})kA$

RESULTADOS: CASO I

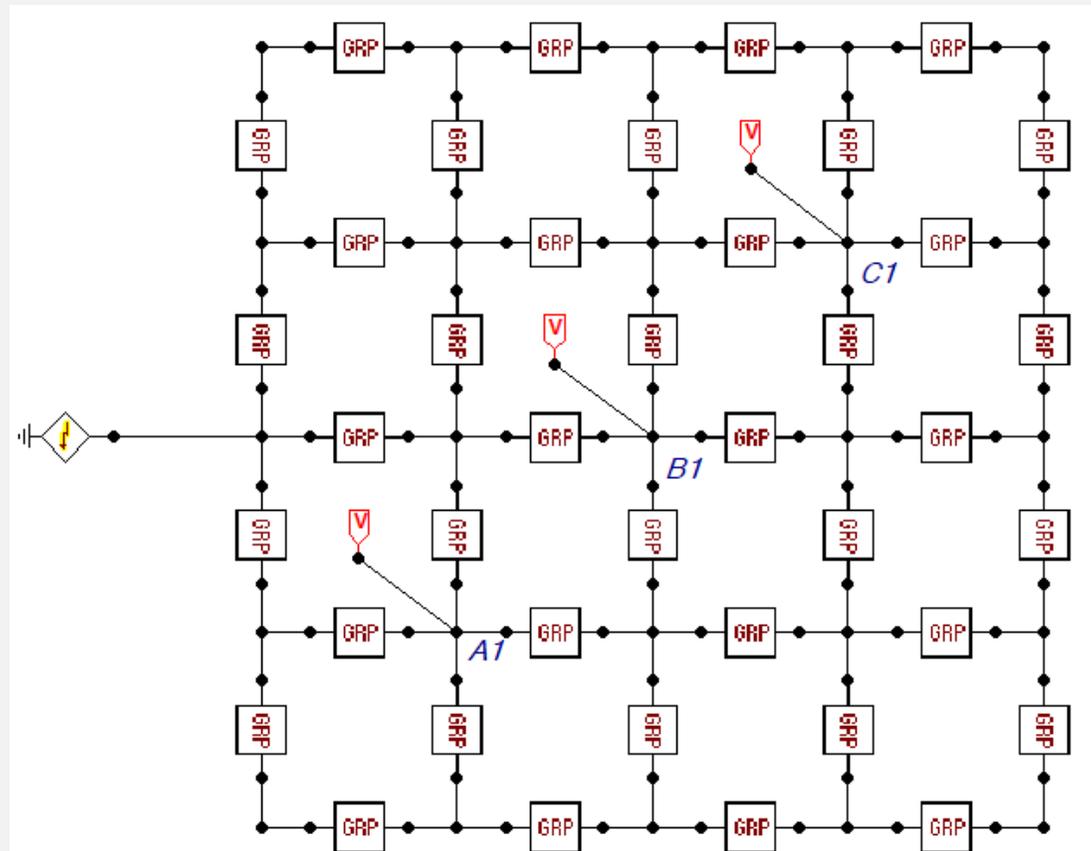


Figura 7: Verificar GPR nos pontos A1, B1 e C1 (Autor, 2023)

RESULTADOS CASO I

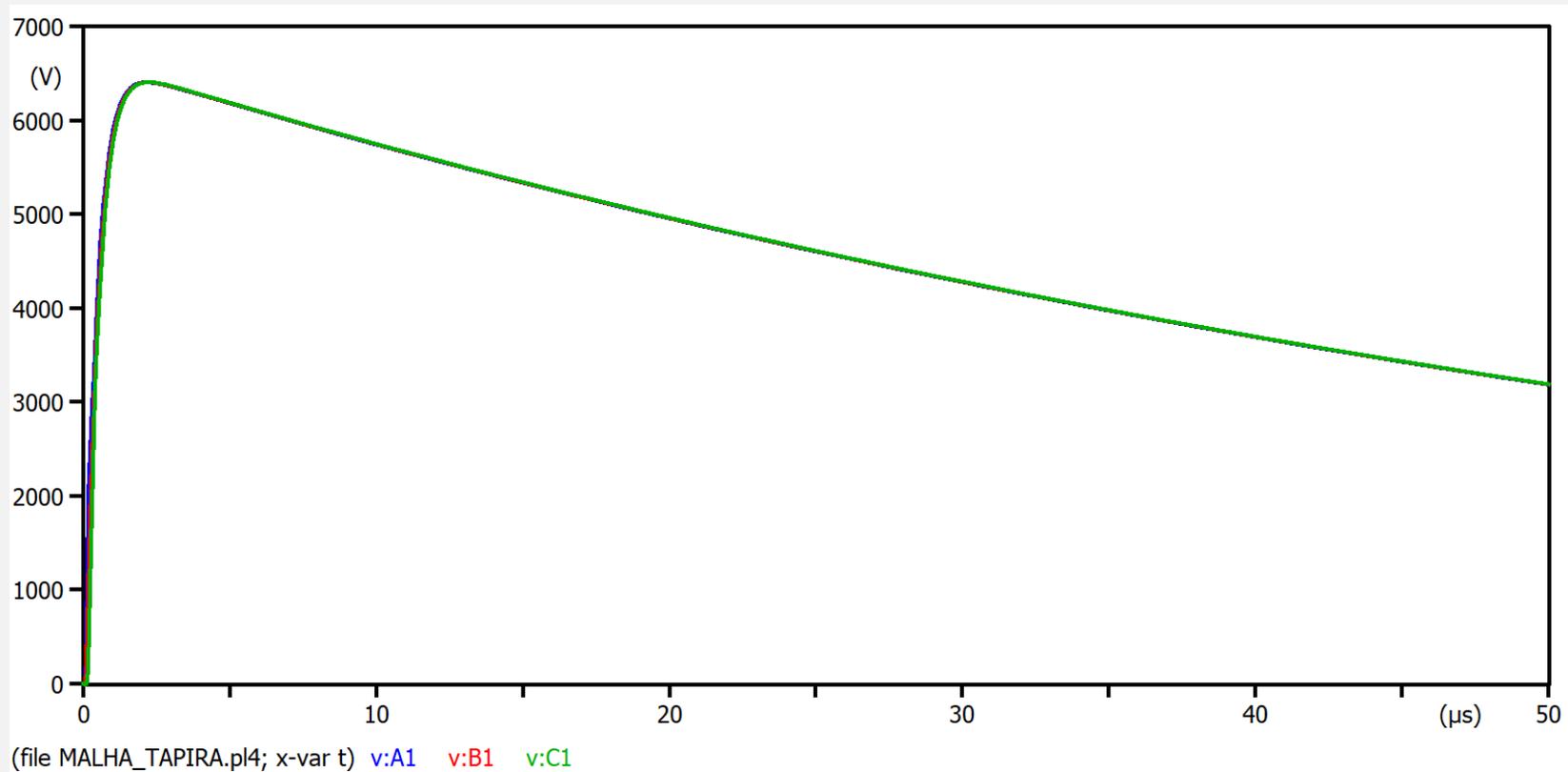


Figura 8: GPR nos pontos A1, B1 e C1 (Autor, 2023)

RESULTADOS CASO 2

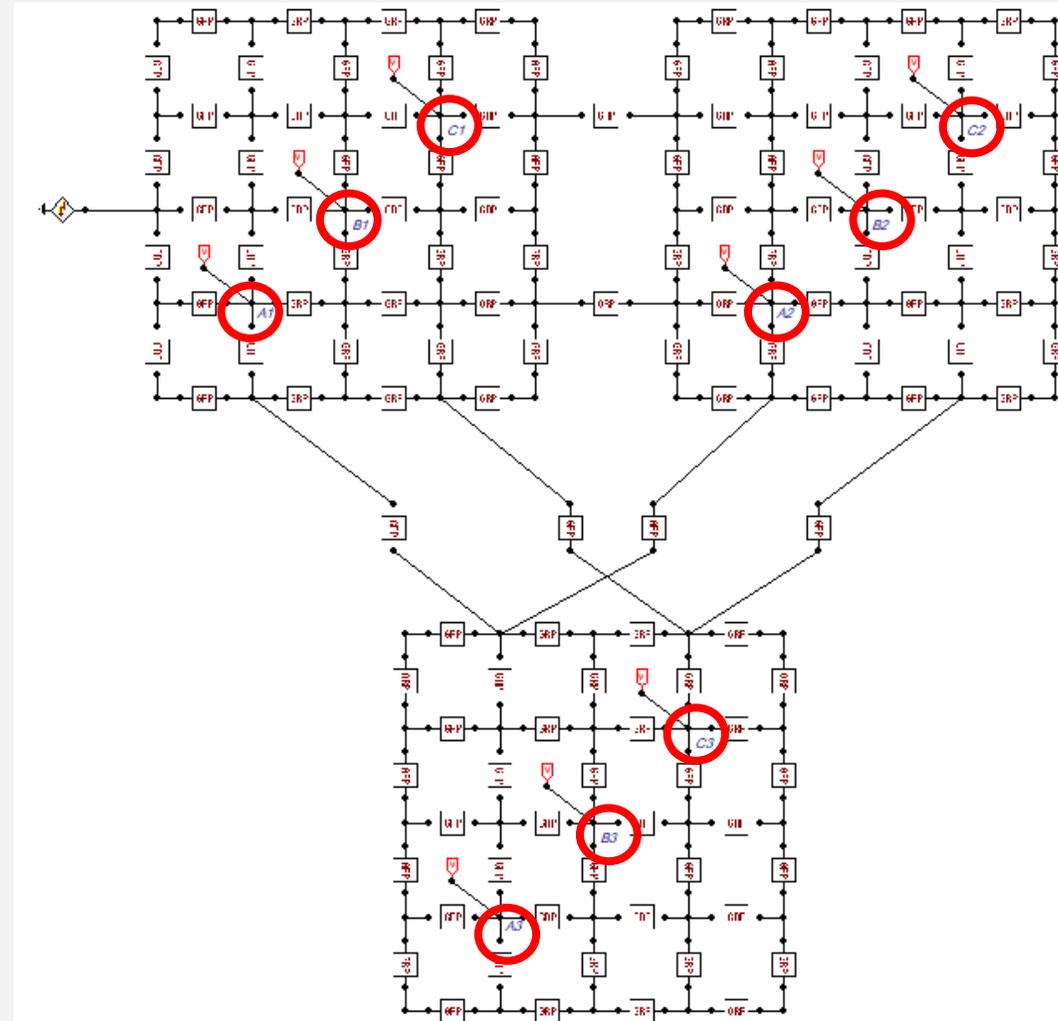


Figura 9: GPR nos pontos A, B e C das três malhas. CASO 2 (Autor, 2023)

RESULTADOS CASO 2

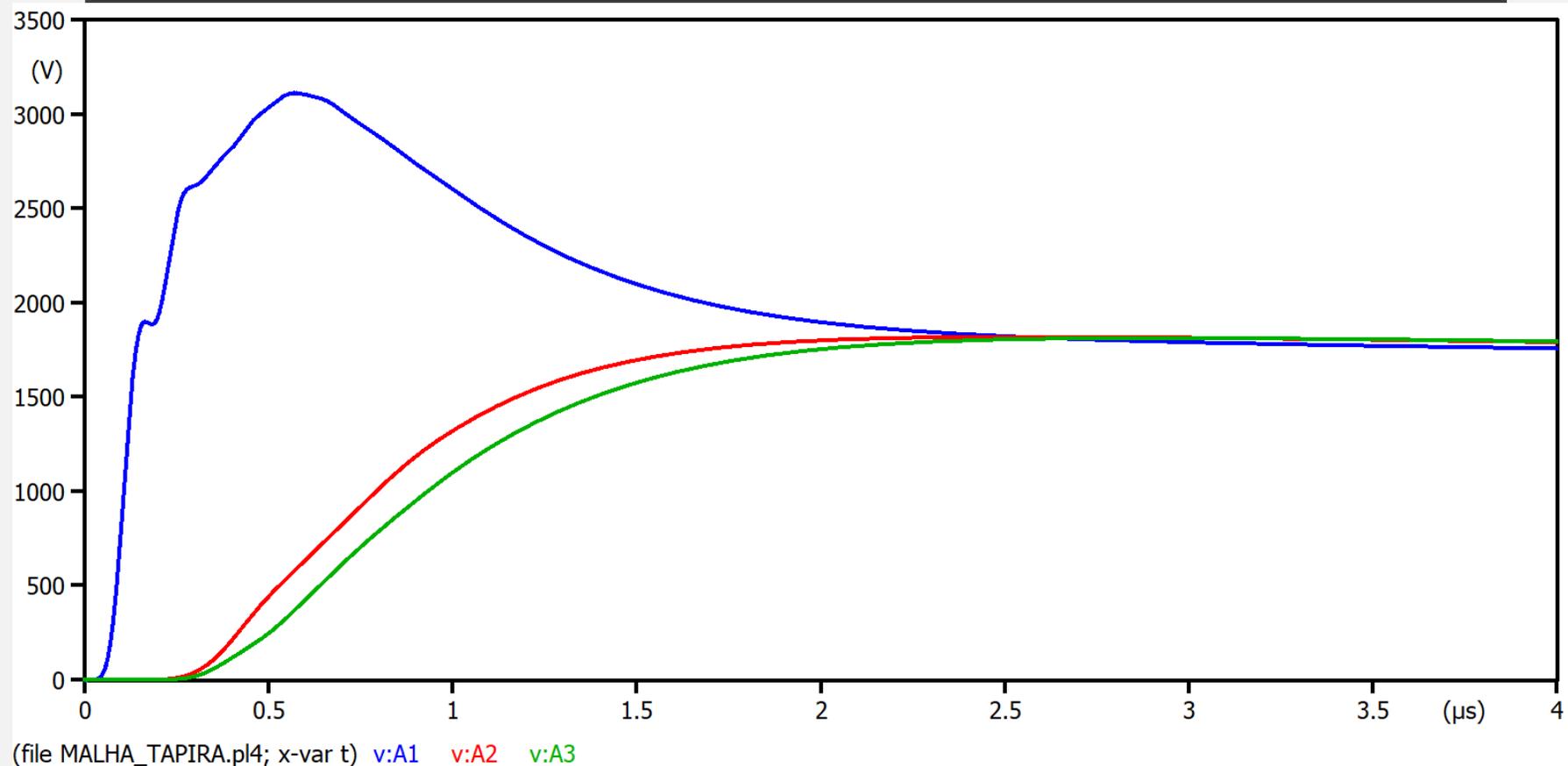


Figura 10: GPR nos pontos A1, A2 e A3 das três malhas. CASO 2 (Autor, 2023)

RESULTADOS CASO 2

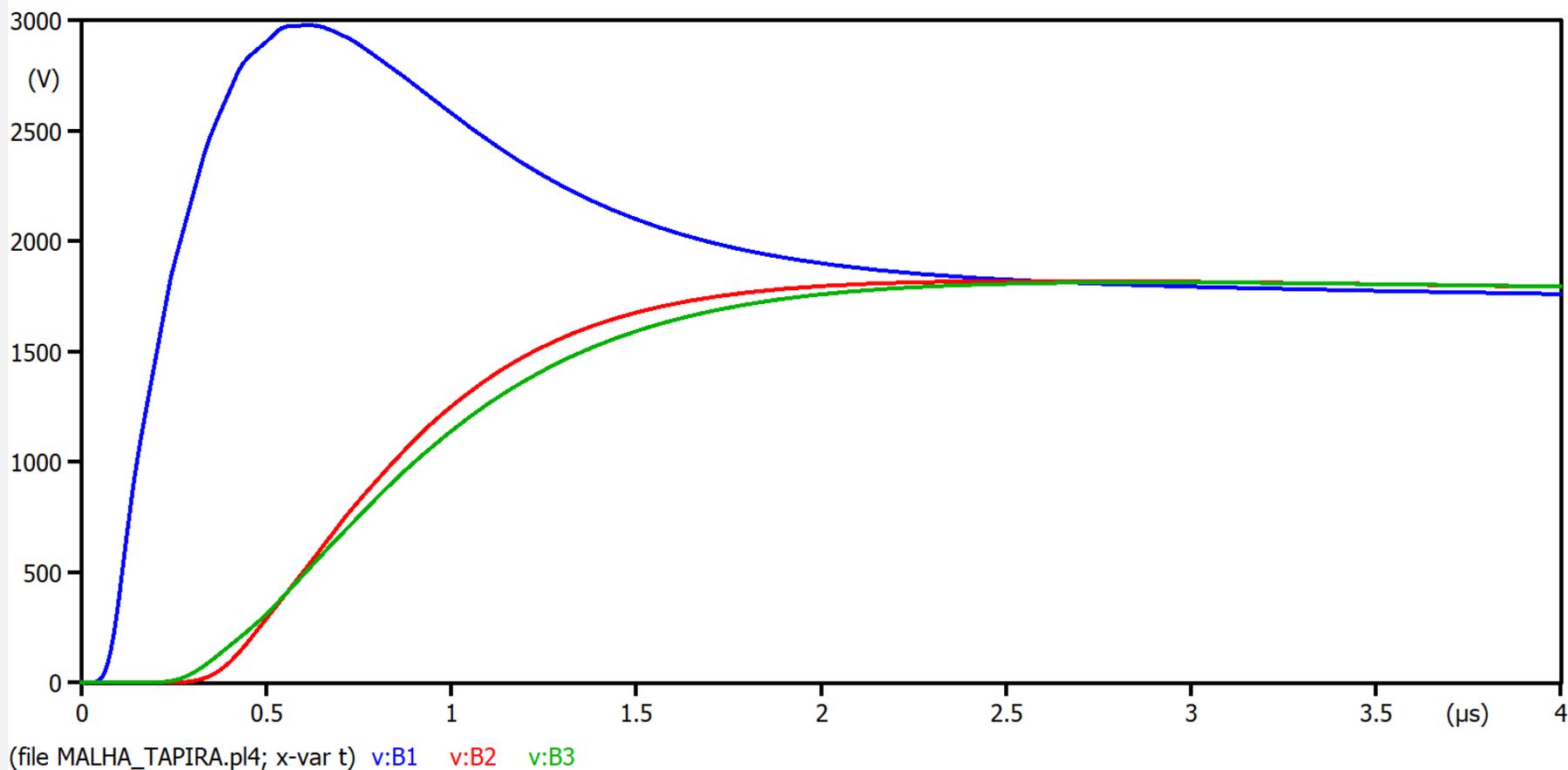


Figura 11: GPR nos pontos B1, B2 e B3 das três malhas. CASO 2 (Autor, 2023)

RESULTADOS CASO 2

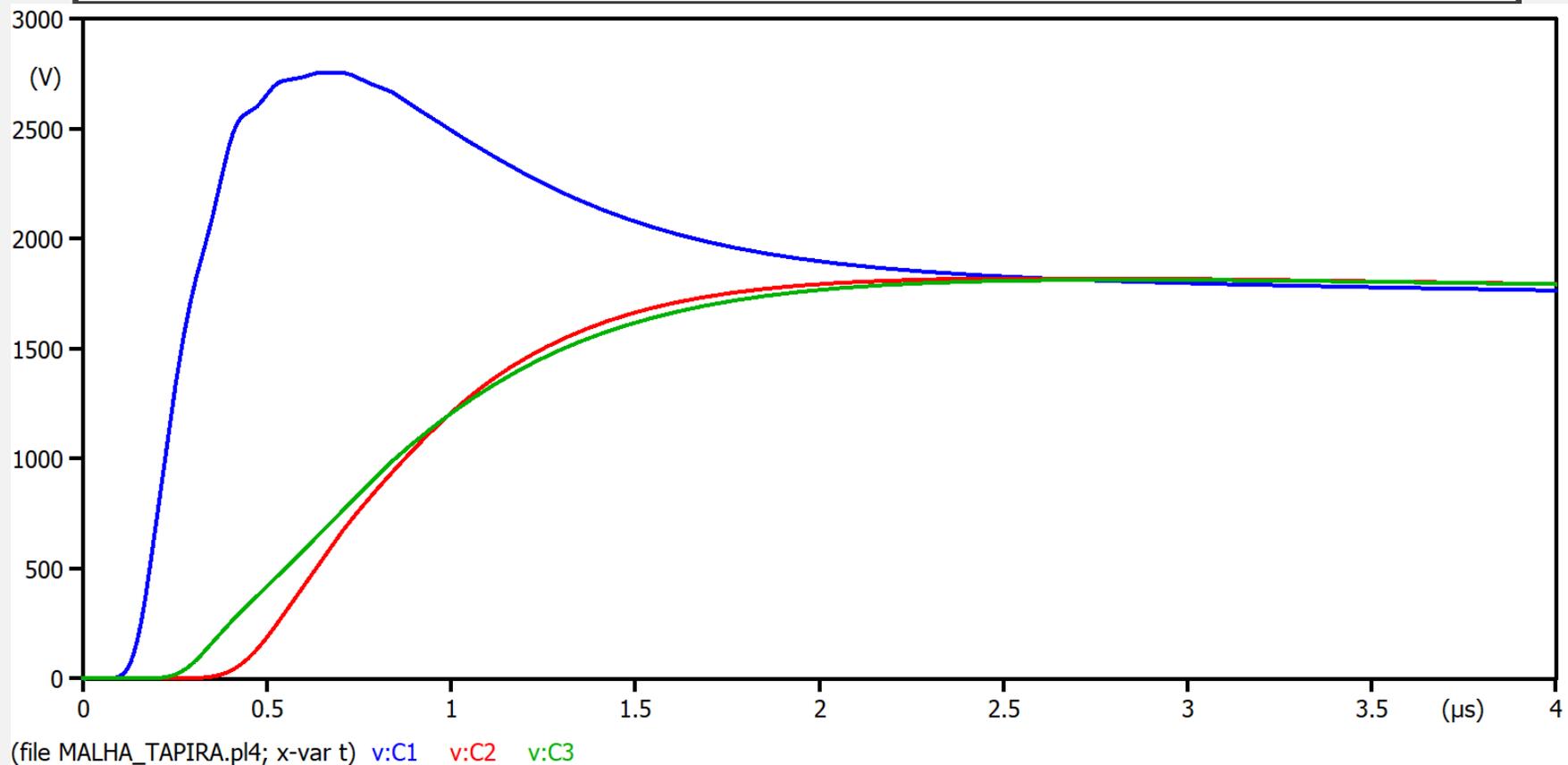


Figura 12: GPR nos pontos C1, C2 e C3 das três malhas. CASO 2 (Autor, 2023)

RESULTADOS CASO 3

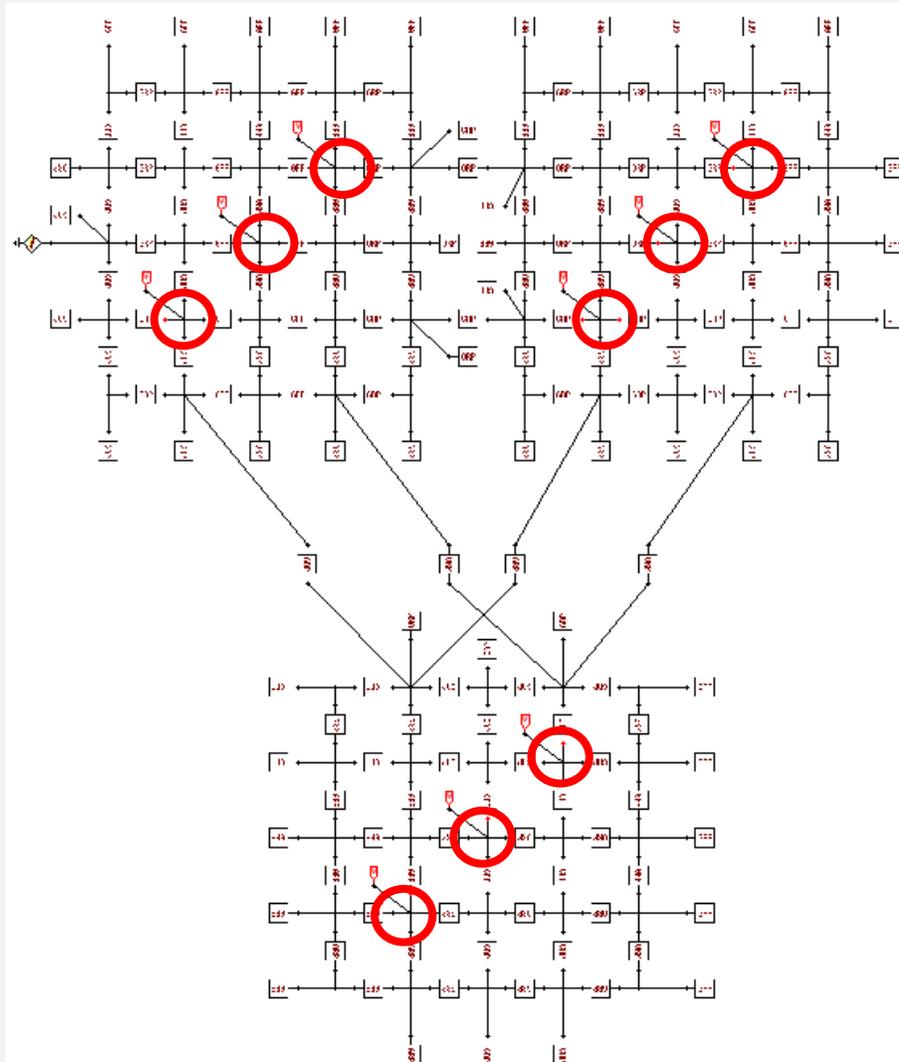


Figura 13: GPR nos pontos A, B e C das três malhas. CASO 3 (Autor, 2023)

RESULTADOS CASO 3

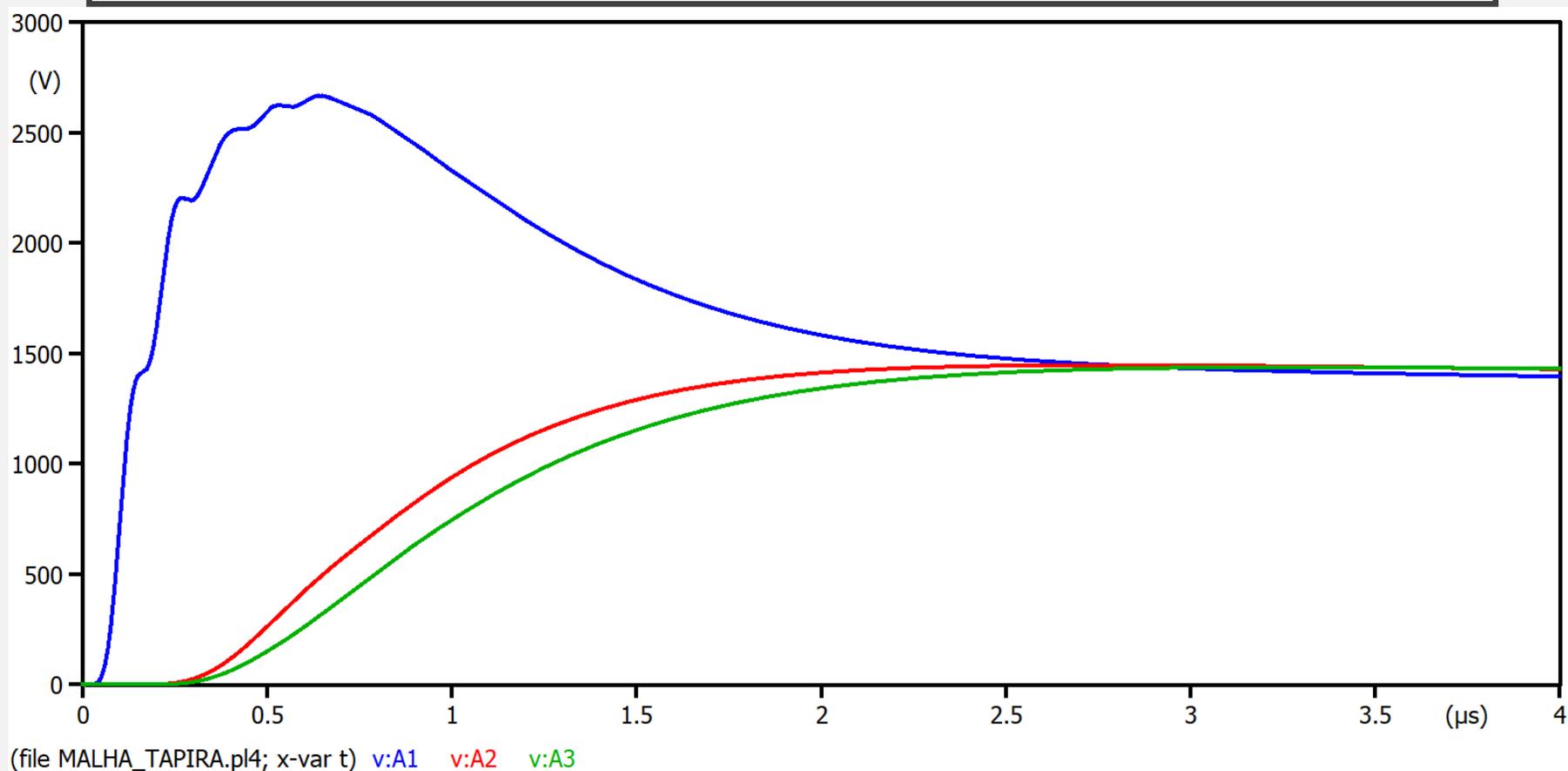


Figura 14: GPR nos pontos A1, A2 e A3 das três malhas. CASO 3 (Autor, 2023)

RESULTADOS CASO 3

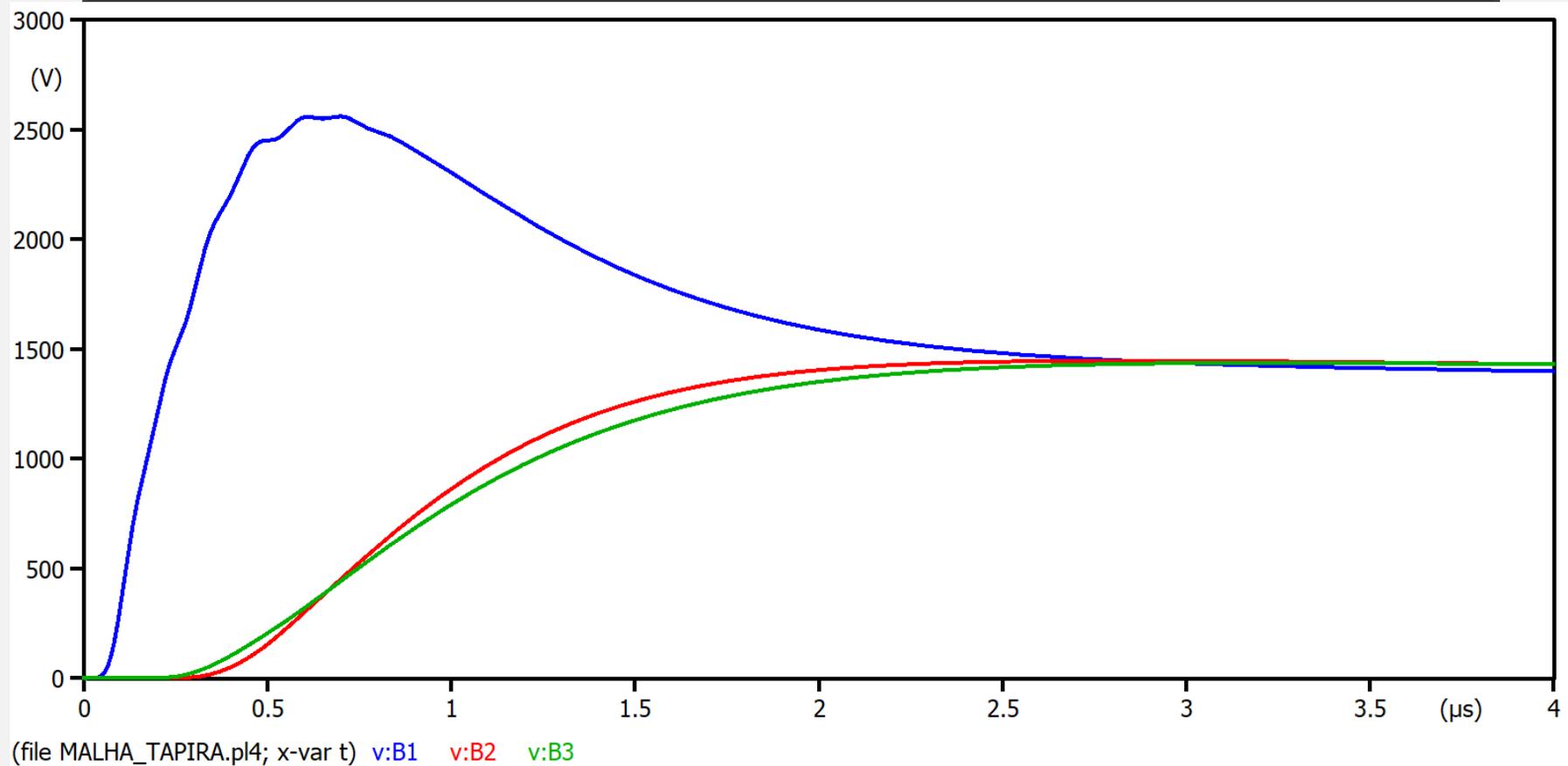


Figura 15: GPR nos pontos B1, B2 e B3 das três malhas. CASO 3 (Autor, 2023)

RESULTADOS CASO 3

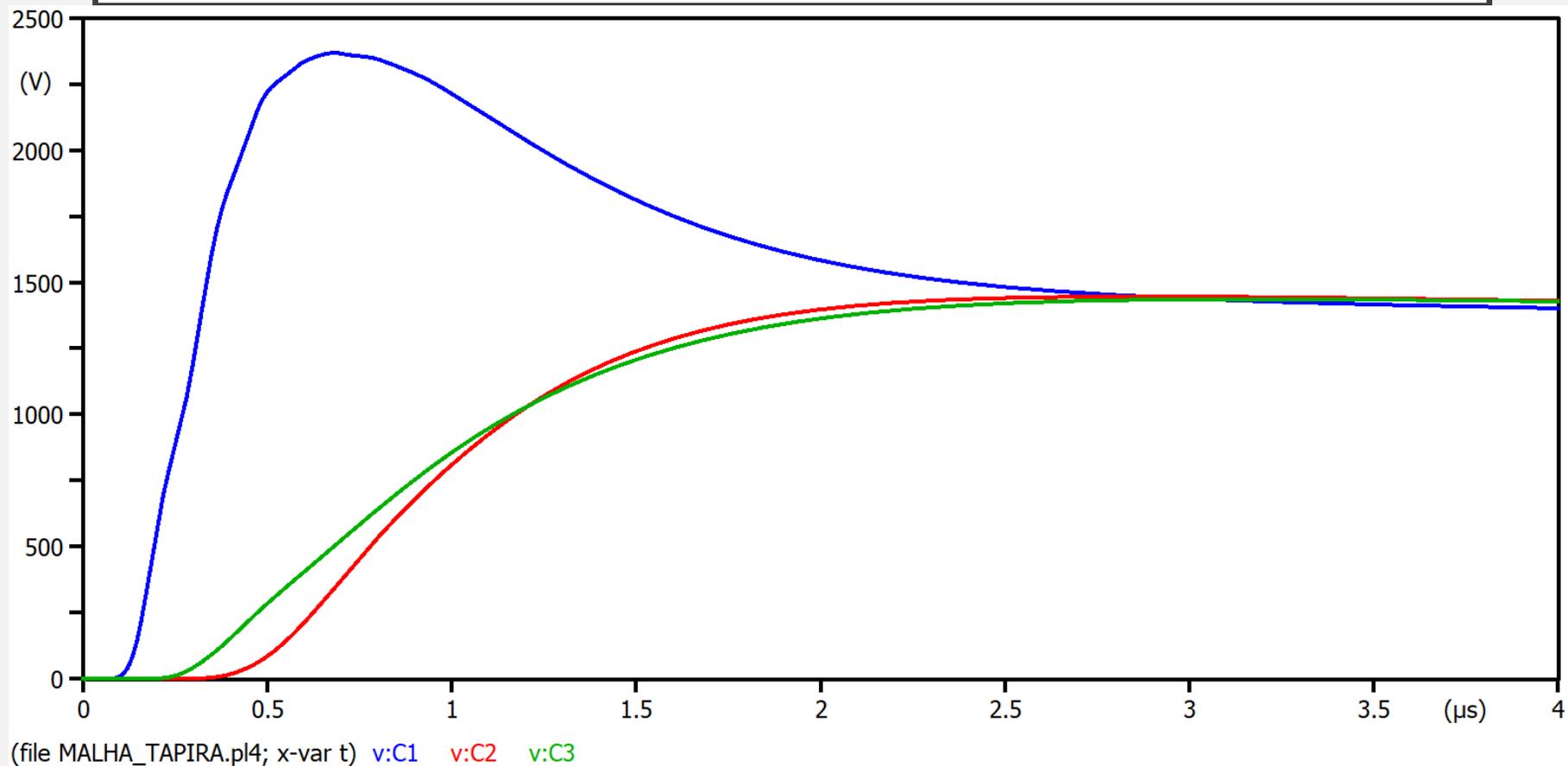


Figura 16: GPR nos pontos C1, C2 e C3 das três malhas. CASO 3 (Autor, 2023)

RESULTADOS CASO 4

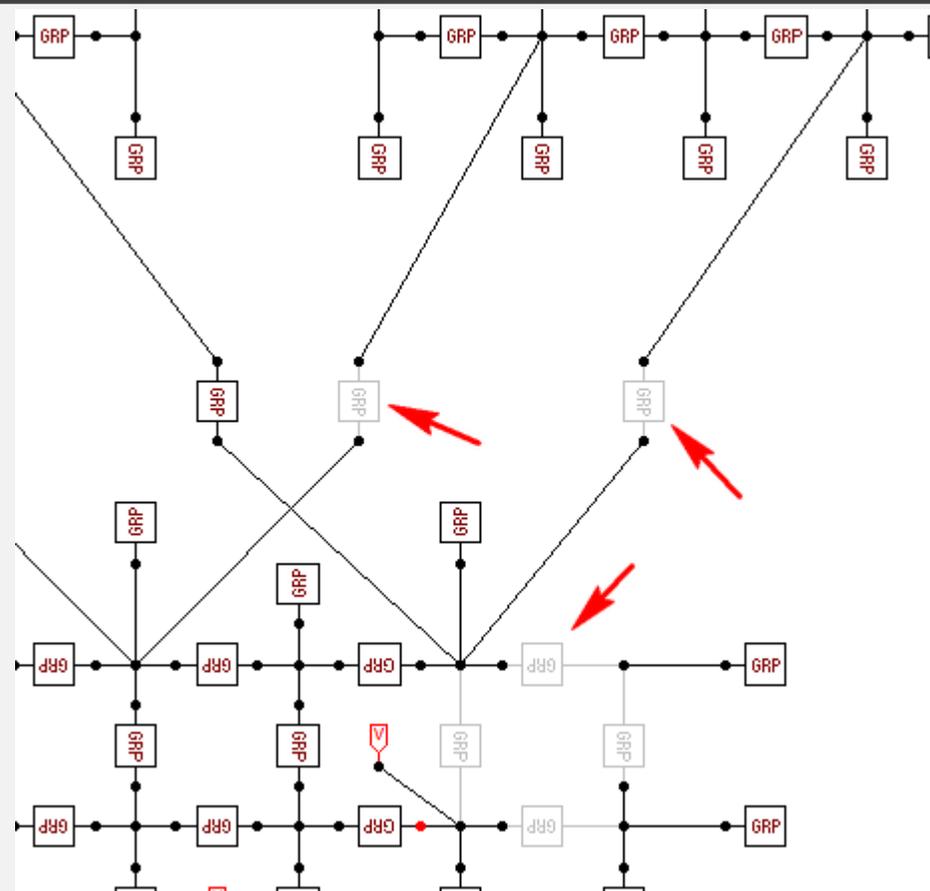


Figura 17: GPR nos pontos A, B e C das três malhas. CASO 4 (Autor, 2023)

RESULTADOS CASO 4

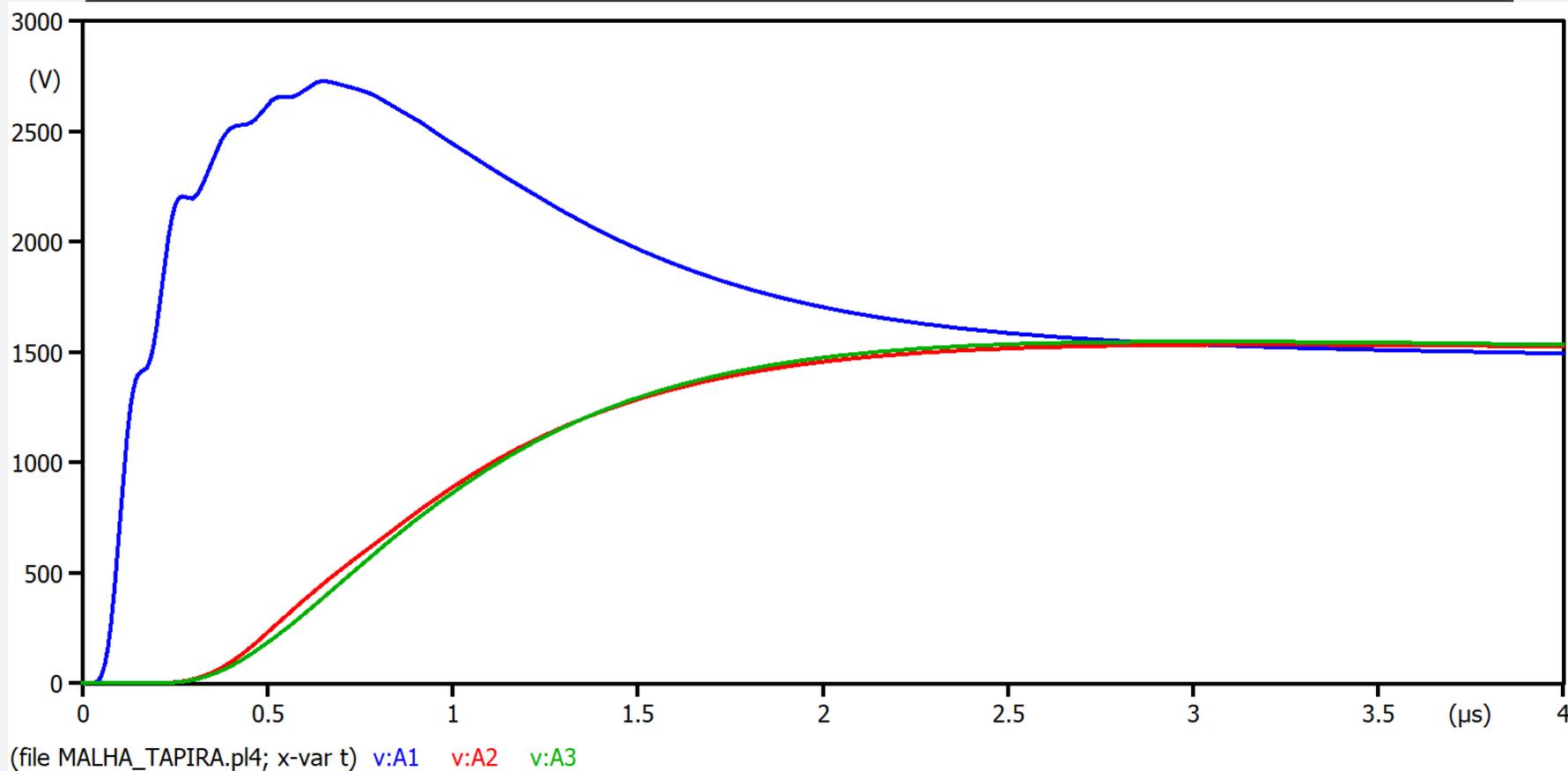


Figura 18: GPR nos pontos A1, A2 e A3 das três malhas. CASO 4 (Autor, 2023)

RESULTADOS CASO 4

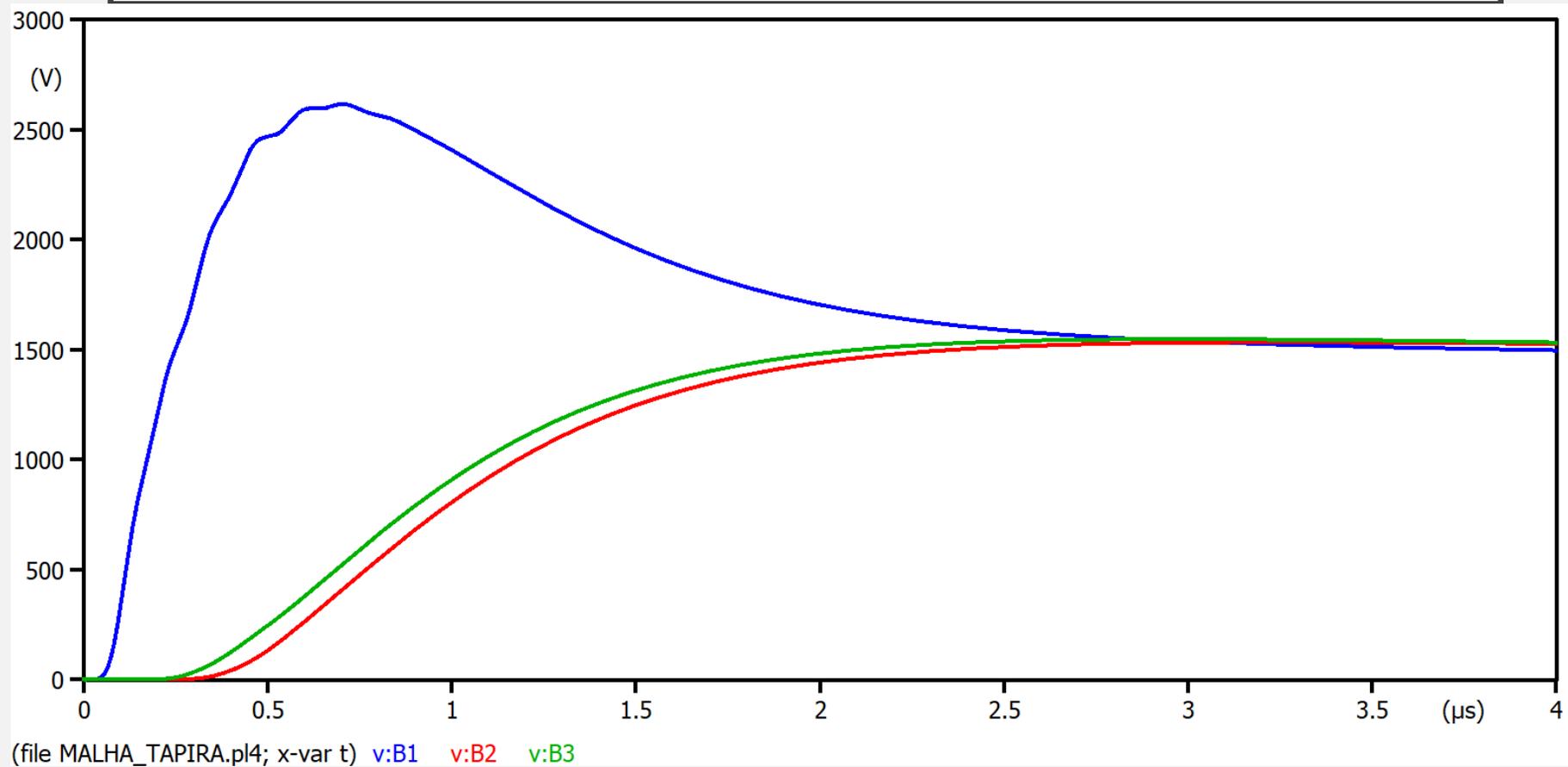


Figura 19: GPR nos pontos B1, B2 e B3 das três malhas. CASO 4 (Autor, 2023)

RESULTADOS CASO 4

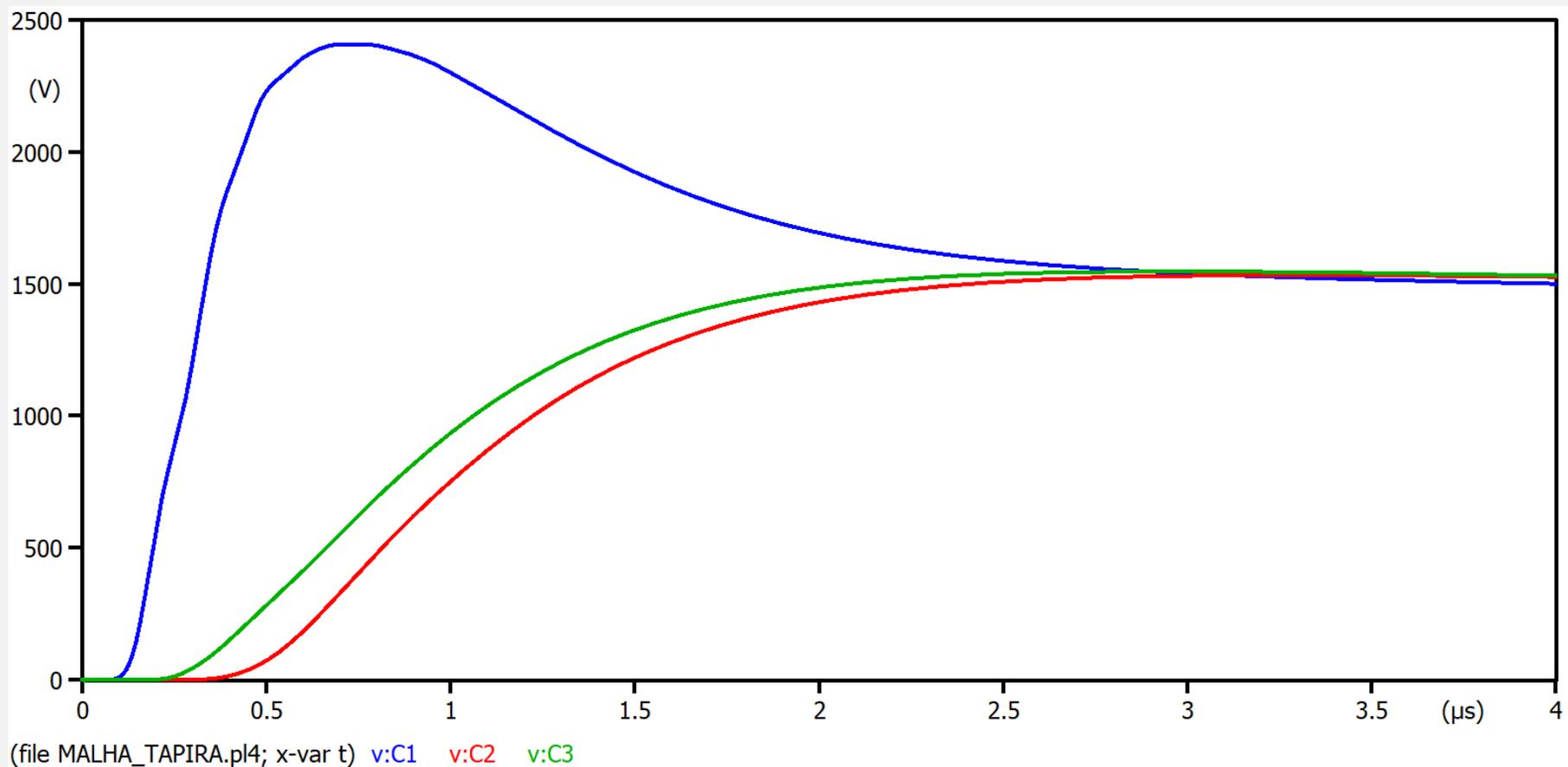


Figura 20: GPR nos pontos C1, C2 e C3 das três malhas. CASO 4 (Autor, 2023)

RESUMO DOS RESULTADOS

Picos de tensão [kV]				
Ponto	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
A1	6,406	3,112	2,665	2,728
A2	0	1,830	1,447	1,534
A3	0	1,823	1,438	1,548
B1	6,407	2,980	2,561	2,617
B2	0	1,830	1,448	1,534
B3	0	1,824	1,438	1,548
C1	6,408	2,758	2,370	2,407
C2	0	1,830	1,448	1,534
C3	0	1,824	1,438	1,548

Tabela 2: Resumo dos resultados (Autor, 2023)

CONCLUSÃO

- Observa-se que há redução do GPR nos pontos medidos quando há a adição das hastes verticais nos extremos das malhas.
- Notam-se picos de tensão maiores na malha que recebe a descarga atmosférica e nas outras duas malhas há a “transferência de surto uniforme”, mantendo os potenciais medidos equivalentes.
- Pelas figuras dos resultados dos casos pode-se observar que, embora o modelo seja a parâmetros concentrados, o efeito da propagação de onda ainda acontece. Vide atraso no sinal nos pontos medidos mais distantes.
- Devido aos danos na malha 3 (CASO 4), o que a torna diferente das outras duas, portanto de certa forma irregular, pode-se observar a elevação do potencial nos pontos medidos, em comparação com o CASO 3.

CONCLUSÃO

- Como os resultados são dados em kV, os potenciais danosos a equipamentos eletrônicos e principalmente às pessoas devido às tensões de passo e toque, pode-se observar que uma malha danificada torna o ambiente mais perigoso.
- Uma estratégia a se reduzir os potenciais gerados, e conseqüentemente as tensões de passo e toque, é a instalação de hastes verticais nas extremidades das malhas.
- É possível validar o modelo a parâmetros concentrados com base em simulações das abordagens via campos eletromagnéticos e a teoria das ondas viajantes.
- A utilização da modelagem das malhas de aterramento via parâmetros concentrados mostrou-se eficaz e com erros aceitáveis (Cecconi et al., 2005), sendo mais simples sua abordagem do que a da teoria das ondas viajantes e das equações de Maxwell, embora seja trabalhosa a modelagem dos circuitos elétricos dependendo do tamanho da malha e de suas possíveis irregularidades.

APÊNDICE

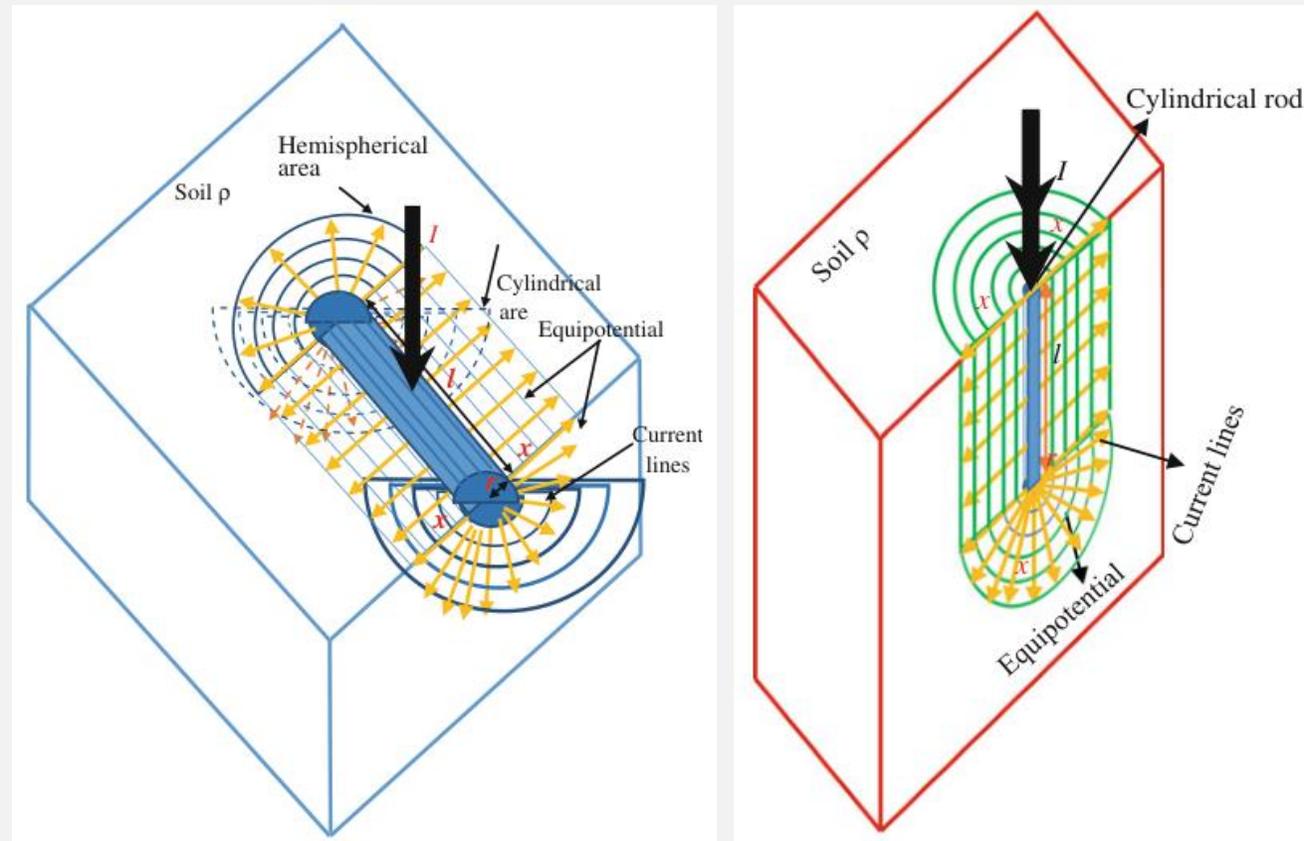


Figura 21: Comportamento dos campos elétrico e magnético nos eletrodos (Salam; Rahman, 2016)

APÊNDICE

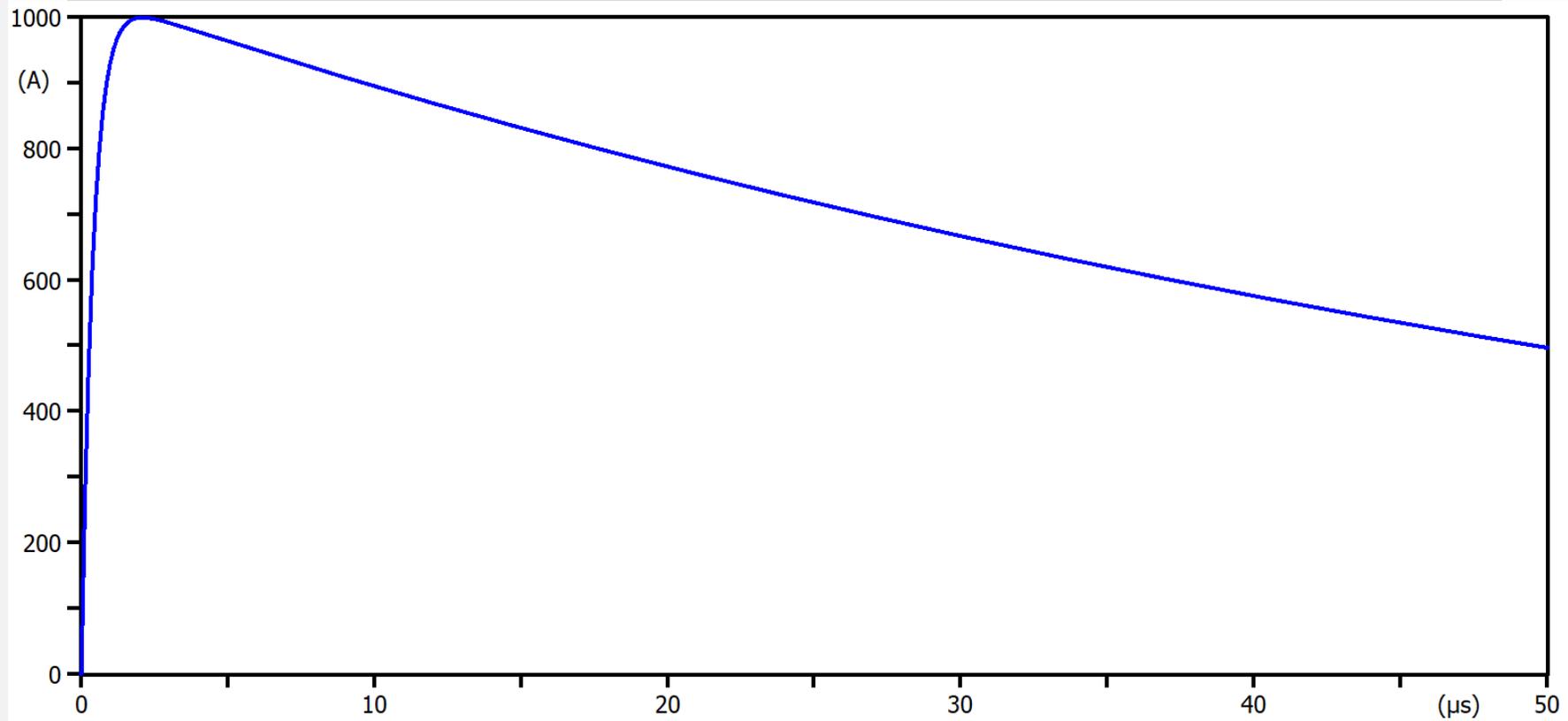


Figura 22: Forma de onda da corrente impulsiva (Autor, 2023)

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] W. L. M. Azevedo, A. R. J. Araújo e J. Pissolato Filho, “Computation of Transient Voltages on the Interconnected Grounding Grids”, 2019.
- [2] B. P. Silva e A. C. B. Alvez, “Aterramentos sob Altas Frequências: Modelagem Eletromagnética e por Linha de Transmissão”.
- [3] V. Cecconi, A. Matranga e A. Ragusa, “New circuital models of grounding and PDS for EMI analysis during a lightning strike”, 2005.
- [4] V. Cecconi, A. Matranga e A. Ragusa, “EMI Analysis in Electrical Drives When the Grounding System is Excited by a Lightning Strike using a Suitable Circuital Model”, 2006.
- [5] W. L. M. Azevedo, J. L. A. D’Annibale, W. C. Silva, A. R. J. Araújo e J. Pissolato Filho, “Transient Responses on Grounding Grids Subjected to Lightning Strikes”, 2020.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [6] L. Grcev e M. Popov, “On High-Frequency Circuit Equivalents of Vertical Ground Rod”, 2005.
- [7] R. G. Olsen e M. C. Willis, “A comparison of exact and quase-static methods for evaluating grounding systems at high frequencies”, 1996.
- [8] S. Bourg e T. Debu, “Deep earth electrodes in highly resistive ground: Frequency behaviour”.
- [9] Md.A. Salam e Q. M. Rahman, “Power Systems Grounding”, 2016.
- [10] B. P. Silva, “Modelagem e Solução de Aterramentos Sujeitos a Surtos de Corrente: Respostas nos Domínios da Frequência e do Tempo”, 2016.
- [11] J. A. Molchansky, “A importância do design da malha de aterramento no ambiente de alta frequência”, 2020.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [12] IEEE Std 80-2013, “IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding”
- [13] L. Grcev e V. Amautovski-Toseva, “Grounding Systems Modeling for High Frequencies and Transients: Some Fundamental Considerations”, 2003.
- [14] L. Grcev, “Computer Analysis of Transient Voltages in Large Grounding Systems”, 1996.

AGRADECIMENTOS

- Prof. Pissolato.
- Dr. Anderson Araújo.
- Dr. Jaimis Leon.
- Eng. Murilo Franco.
- Focus Engenharia Elétrica Ltda.