

# Análise de Perdas Técnicas em Sistemas de Distribuição Rurais Não Convencionais Trifásicos a Dois Fios

Eduardo Bao de Oliveira\*, Renata Mota Martins<sup>†</sup>, Gustavo Marchesan<sup>†</sup>, Ghendy Cardoso Junior<sup>†</sup>

\*Departamento de Eletromecânica e Sistemas de Potência (DESP), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil  
Email: eduardo.bao@acad.ufsm.br

<sup>†</sup>Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil  
Emails: renata.martins@acad.ufsm.br, marchesan.gustavo@ufsm.br, ghendy@ufsm.br

**Resumo**—O sistema de transmissão trifásico a dois fios (T2F) é uma alternativa para áreas rurais, utilizando o solo como condutor. Este artigo compara as perdas técnicas de energia entre o T2F e o sistema trifásico convencional (T3F), considerando diferentes cenários com geração distribuída fotovoltaica (GD), controle Volt/Var e variações nas resistências de aterramento. Resultados indicam que o T2F é mais eficiente em termos de redução de perdas em redes com mais de 35 km, especialmente quando utilizado GD e controle Volt/Var. Alterações de resistência de aterramento pouco afetam as perdas do sistema.

**Palavras-chave**—Sistemas de distribuição rural, transmissão trifásica a dois fios, transmissão trifásica convencional, perdas, resistência de aterramento.

## I. INTRODUÇÃO

Em áreas rurais, a distribuição monofásica com retorno pela terra (MRT) é frequentemente utilizada devido ao seu custo reduzido em comparação ao sistema monofásico convencional (1). No entanto, a capacidade limitada de transmissão do MRT restringe o desenvolvimento rural e agrícola, especialmente em um contexto de crescente demanda por energia no setor, como observado no aumento de 1,5 TWh no consumo de energia do setor agropecuário brasileiro em 2023, segundo o Balanço Energético Nacional 2024 (2). Para solucionar esse problema, a transmissão trifásica rural com apenas dois fios (T2F), utilizando o solo como terceiro condutor, foi proposta por (3) como alternativa ao sistema trifásico convencional (T3F).

A análise econômica realizada por (4) evidencia o potencial econômico do sistema T2F. Ao comparar os custos do T2F com o sistema trifásico convencional, os autores constataram que a redução na quantidade de materiais necessários para a implementação do T2F pode resultar em economias substanciais, especialmente em cenários de adaptação de redes bifásicas existentes, podendo chegar a 70%.

Além do custo de implementação reduzido em comparação com as redes convencionais, as perdas técnicas têm potencial de serem reduzidas, uma vez que a resistência do solo tende a ser gradativamente menor conforme o comprimento da linha aumenta, em relação a resistência de um condutor aéreo convencional.

Diante desse contexto, este estudo tem como objetivo comparar as perdas de energia entre um sistema convencional trifásico e o T2F, analisando diferentes comprimentos de rede, implementação de geração fotovoltaica, uso de controle Volt/Var e alterações nas resistências de aterramento.

## II. SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO TRIFÁSICO A DOIS FIOS

A transmissão trifásica a dois fios segue o princípio da transmissão convencional, mas utiliza apenas dois condutores suspensos. Diferencia-se também pelo uso de um transformador isolador (Ti) conectado em delta/estrela, com a terceira fase aterrada, conforme apresentado por (5) e ilustrado na Figura 1. Nessa configuração, as duas primeiras fases são representadas em azul, enquanto a terceira fase, aterrada, aparece em verde. O aterramento pode ser realizado por meio de hastes, malhas de terra ou qualquer outro método que atenda às normas e às características específicas do solo onde o sistema será instalado. Devido à condução de corrente elétrica pelo solo, a segurança do sistema é uma preocupação fundamental. No entanto, essa característica também está presente no sistema MRT, que é amplamente utilizado. Além disso, conforme demonstrado por (6), a tensão de passo não ultrapassa 12 V por metro, garantindo a segurança do sistema.

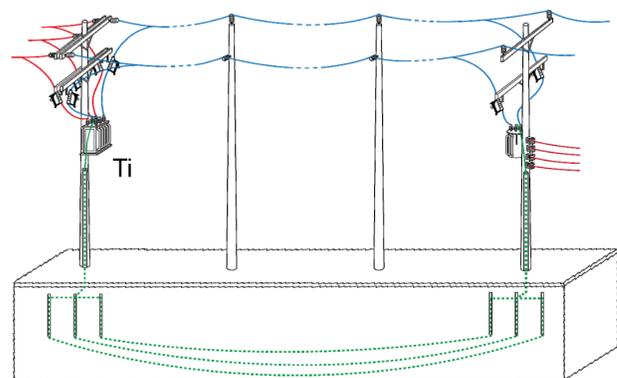


Figura 1: Sistema trifásico a dois fios.

Com a contribuição das características do solo, conforme Carson (1), pode-se calcular impedâncias própria ( $Z_P$ ) e mútua ( $Z_m$ ) usando as fórmulas 1 e 2, respectivamente.

$$Z_P = ri + rd + j0,1213 \left[ \ln \frac{0,3048}{RMG_i} + 7,93402 \right] \frac{1}{1,60934} \frac{\Omega}{km}, \quad (1)$$

$$Z_m = +rd + j0,1213 \left[ \ln \frac{0,3048}{D_{ij}} + 7,93402 \right] \frac{1}{1,60934} \frac{\Omega}{km}, \quad (2)$$

- $ri$  é a resistência do condutor  $i$
- $rd$  representa a resistência do solo
- $RMG_i$  é o raio médio geométrico do condutor  $i$
- $D_{ij}$  é a separação entre os condutores aéreos  $i$  e  $j$

Onde  $rd$  deve ser a resistência do solo para a frequência (f), no caso 60Hz, como descrito em 3.

$$rd = \pi^2 f^* 10^{-4} \Omega/km. \quad (3)$$

Para calcular a matriz de potencial, como descrita em 4, deve-se calcular os coeficientes de potencial próprio ( $P_{ii}$ ) e mútuo ( $P_{ij}$ ).

$$[P] = \begin{bmatrix} P_{ii} & P_{in} \\ P_{ni} & P_{nn} \end{bmatrix} \frac{km}{nF}. \quad (4)$$

Os coeficientes são calculados por 5 e 6.

$$P_{ii} = 11,17689 * 1,60934 * 10^{-3} \ln \frac{S_{ii}}{Rc_i} \frac{km}{nF}, \quad (5)$$

$$P_{ij} = 11,17689 * 1,60934 * 10^{-3} \ln \frac{S_{ij}}{D_{ij}} \frac{km}{nF}, \quad (6)$$

Onde:

- $S_{ii}$  é a distância entre o condutor  $i$  e sua imagem
- $S_{ij}$  é a distância do condutor  $i$  à imagem do condutor  $j$

A matriz de capacitâncias é obtida fazendo a inversa de 4. Desta forma:

$$[C] = [P]^{-1} nF/km. \quad (7)$$

A Figura 2 demonstra o circuito equivalente do sistema.

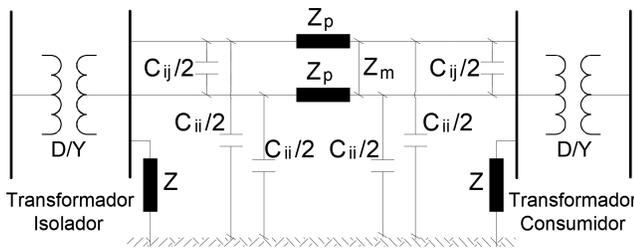


Figura 2: Circuito análogo do sistema T2F.

### III. METODOLOGIA

A partir da análise teórica do sistema T2F e de suas características, observa-se o impacto da configuração de dois fios nas impedâncias do sistema. Com base nessas considerações, este estudo examinará o desempenho do sistema T2F em comparação com uma rede trifásica convencional de três fios (T3F).

Uma das abordagens mais promissoras envolve a reutilização de estruturas já existentes, razão pela qual será analisado um sistema com topologia MRT, acrescido de um condutor adicional. Serão investigados tanto o comportamento da tensão na carga quanto as perdas totais dos sistemas. As estruturas das redes modeladas são apresentadas na Figura 3, e foram consideradas redes não transpostas.

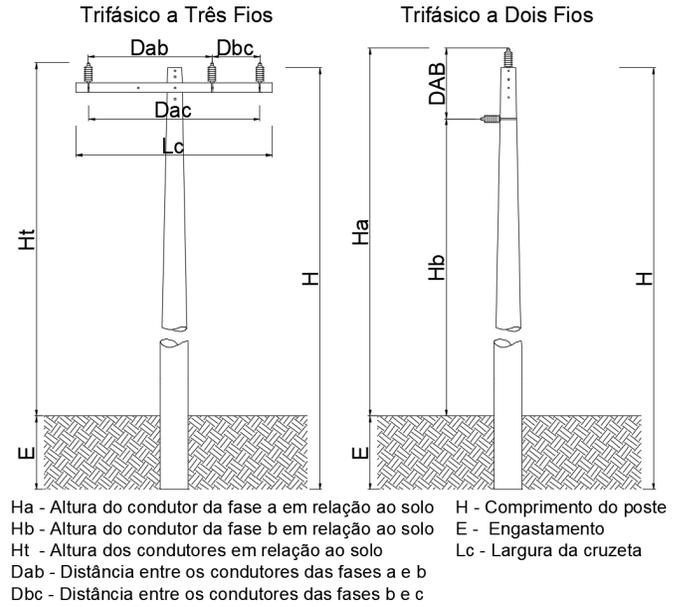


Figura 3: Estruturas das redes.

A Tabela I exibe as informações referentes às geometrias das redes mostradas na Figura 3, além dos dados elétricos correspondentes ao condutor 2 AWG, utilizado tanto no T2F quanto no T3F. Os sistemas foram submetidos a uma mesma carga de FP unitário, a mesma inserção de geração distribuída fotovoltaica (GDFV), ambos equilibrados, e a mesma tensão de referência para o controle Volt/Var ( $V_{ref}$ ). As redes foram simuladas utilizando o software OPENDSS, com o comprimento variando de 1 km a 100 km, com o objetivo de analisar o comportamento para diferentes extensões das redes.  $R_s$  e  $X_s$  são a resistência e reatância série dos transformadores, e  $D_c$  é o diâmetro do condutor.

Os sistemas equivalentes estão ilustrados na Figura 4. As redes foram sujeitas à inserção de GDFV, seguido pelo controle Volt/Var (CVV), aplicados no barramento do consumidor final. As impedâncias próprias e mútuas foram obtidas através de 1 e 2, respectivamente. As capacitâncias foram calculadas por meio de 7.

Tabela I: Dados das redes.

| Dados Estruturais (m) |     | Dados Elétricos     |         |
|-----------------------|-----|---------------------|---------|
| e                     | 1,7 | $R_s$ (%)           | 0,96    |
| H                     | 11  | $X_s$ (%)           | 3,7     |
| Lc                    | 1,9 | Zat ( $\Omega$ )    | 8       |
| Ht                    | 9,4 | Dc (m)              | 0,00801 |
| Ha                    | 9,5 | rd ( $\Omega$ /km)  | 0,0592  |
| Hb                    | 8,8 | ri ( $\Omega$ /km)  | 1,102   |
| Dab                   | 1,2 | RMG (m)             | 0,00308 |
| Dbc                   | 0,6 | Carga 3 $\phi$ (kW) | 120     |
| Dac                   | 1,8 | GDFV 3 $\phi$ (kW)  | 240     |
| DAB                   | 0,7 | $V_{ref}$ (p.u.)    | 1       |

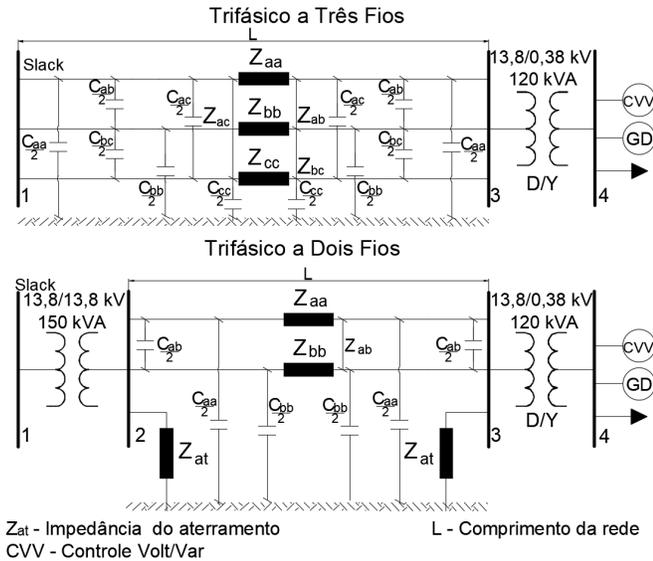


Figura 4: Sistemas equivalentes das redes.

A seguir, apresentam-se os resultados para as seguintes condições, nas quais a fase C foi aterrada:

- 1) Condição I - Sistemas operando com carga, sem inserção fotovoltaica, sem controle Volt/Var e resistência de aterramento de  $8\Omega$ .
- 2) Condição II - Sistemas operando com carga, com inserção fotovoltaica, sem controle Volt/Var e resistência de aterramento de  $8\Omega$ .
- 3) Condição III - Sistemas operando com carga, com inserção fotovoltaica, com controle Volt/Var e resistência de aterramento  $8\Omega$ .
- 4) Condição IV - Sistemas operando com carga, sem inserção fotovoltaica, sem controle Volt/Var e variações de resistência de aterramento.

#### IV. RESULTADOS

##### A. Condição I

As Figuras 5 e 6 ilustram os resultados de tensão na carga e as perdas totais nos sistemas para a condição I. Nesta condição, não há inserção fotovoltaica nem controle Volt/Var na carga. Observa-se o desequilíbrio intrínseco do sistema T2F, principalmente da tensão na fase B em comparação com as fases A e C. No entanto, a queda de tensão no sistema T2F

é menor do que no sistema T3F. Além disso, as tensões nas fases diferenciam-se umas das outras por conta das diferentes relações X/R dos condutores e pelas influências entre fases causadas pelas ligações dos transformadores, conforme mostrado na Figura 5.

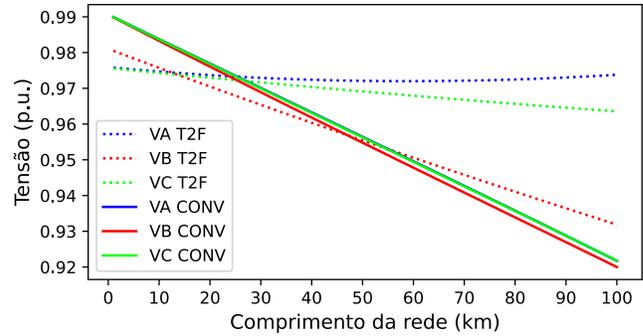


Figura 5: Tensões na carga para a condição I.

Conforme demonstrado na Figura 6, observa-se que o sistema T2F possui perdas de energia inferiores às do sistema T3F, especialmente para comprimentos de redes superiores a aproximadamente 35 km. À medida que o comprimento da rede aumenta, a resistência do terceiro condutor no sistema T3F torna-se mais relevante em relação à resistência da terra, gerando perdas maiores em comparação ao T2F. Em 100 km de comprimento as perdas do sistema convencional chegam a 11,4 kW, enquanto para o T2F aproximam-se a 9,21 kW, atingindo então cerca de 19,5% de redução.

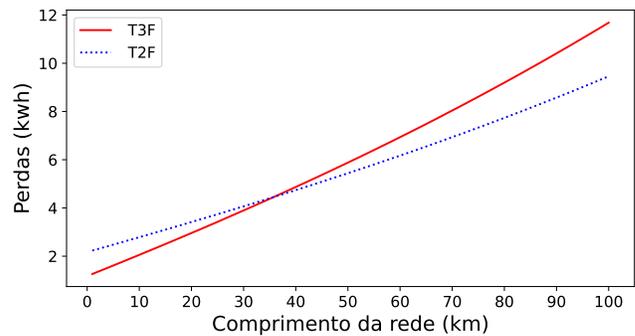


Figura 6: Perdas totais para a condição I com 8 ohms de aterramento.

##### B. Condição II

As Figuras 7 e 8 exibem as tensões na carga e as perdas totais nos sistemas sob a condição de inserção de geração fotovoltaica. No sistema T2F, observa-se uma maior tendência a sobretensão. Contudo, essa variação não se apresenta de forma significativa, pois para a fase mais afetada (fase B), a diferença é de apenas 0,02 p.u. em relação ao sistema T3F, para uma rede de 100 km. Ademais, nota-se que, para ambos os sistemas, a sobretensão aumenta à medida que o comprimento da rede se torna maior, devido ao crescimento

da resistência equivalente e ao fluxo reverso de potência ativa. Portanto, as fases que apresentarem menores relações X/R serão mais impactadas pela inserção de GDFV, conforme (7).

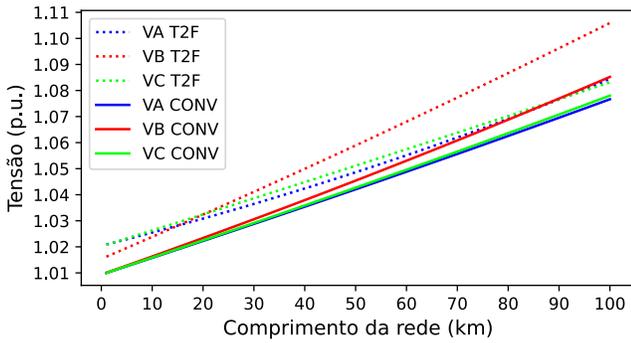


Figura 7: Tensões na carga para a condição II.

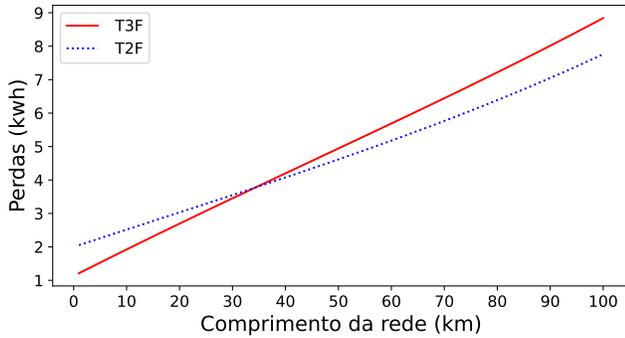


Figura 8: Perdas totais para a condição II.

O comportamento das perdas para a condição de inserção fotovoltaica segue um padrão semelhante ao da condição anterior. Porém, os valores absolutos são menores para ambos os sistemas.

### C. Condição III

A implementação de CVV em sistemas com GDFV foi estudada em (7), destacando a regulação de tensão e a mitigação de perdas, o que justifica a análise desse cenário. O CVV, quando equilibrado no barramento da carga, consome a mesma potência reativa nas três fases, considerando tensão de 1 p.u. de referência. Como visto na Figura 9, o desequilíbrio do T2F ainda se mantém, mas apesar disso, o desvio diminuiu com o controle: 0,015 p.u. na fase B e 0,02 p.u. na fase A na rede de maior extensão (100 km). A fase C, por sua vez, manteve-se praticamente em 1 p.u. independentemente do comprimento da rede,

Para comprimentos superiores a aproximadamente 25 km, as perdas no sistema T2F são menores do que no sistema T3F. No entanto, as perdas em ambos os sistemas aumentaram em comparação com as condições anteriores. Isso ocorre devido à atuação do CVV, que tende a consumir potência reativa para mitigar a sobretensão no barramento da carga, aumentando as perdas, conforme mostrado na Figura.10.

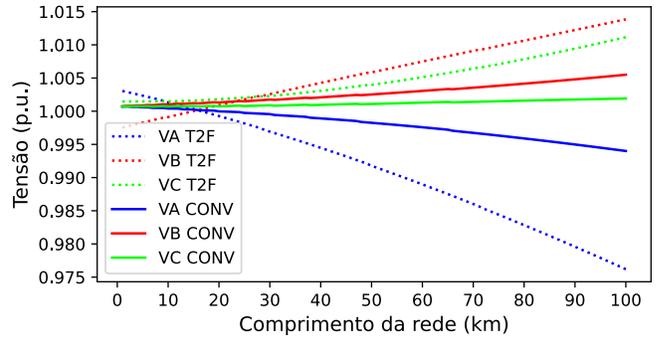


Figura 9: Tensões na carga para a condição III.

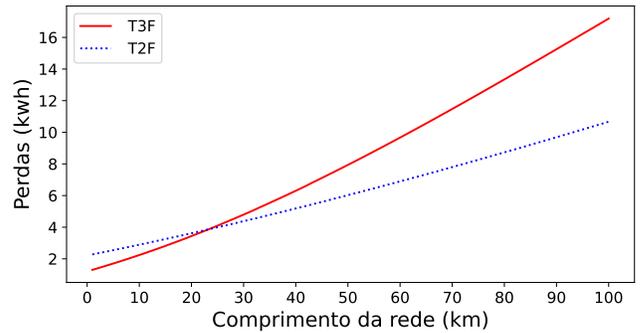


Figura 10: Perdas totais para a condição III.

### D. Condição IV

Nesse último caso, foi revelado que as perdas ativas com variações na resistência de aterramento foram relativamente próximas, uma vez que, no cenário mais extremo, entre 4 e 24  $\Omega$  em cada haste, a diferença foi de pouco mais de 1,2%. Dessa forma, as perdas com T3F foram aproximadamente 20% maiores que no pior caso de rede T2F estudado, com 24  $\Omega$  em cada haste, para 100 km, conforme mostrado na Figura 11.

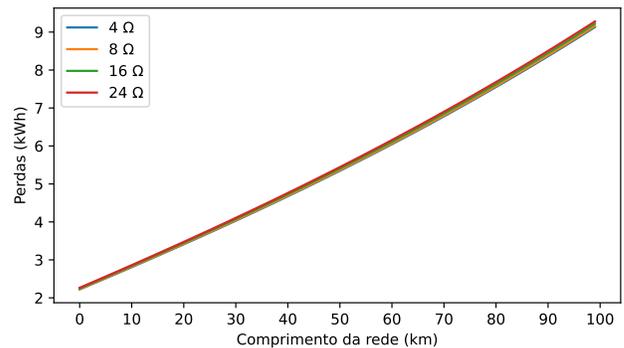


Figura 11: Perdas T3F em comparação com a T2F na condição IV.

## V. DISCUSSÕES

A Figura 12 ilustra as perdas totais do sistema T2F para cada cenário apresentado, em função do sistema trifásico convenci-

onal. O sistema T2F é superior ao trifásico convencional por não possuir o terceiro condutor. Isto deveria apresentar grandes impactos na redução das perdas de energia. Todavia, o T2F possui um transformador adicional (transformador isolador) e hastes de aterramento para a terceira fase, que neste estudo (nos cenários I, II e III) somam  $16 \Omega$ , o que gera maiores perdas para distâncias inferiores a 35 km.

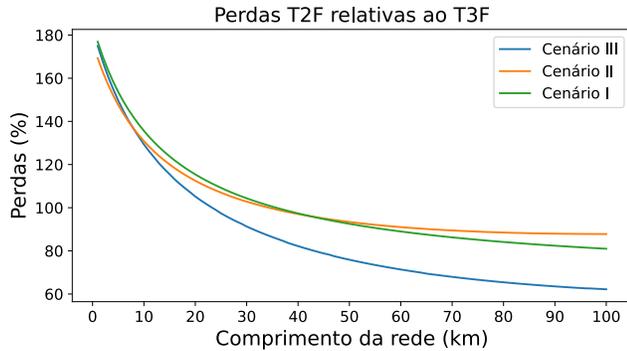


Figura 12: Perdas T2F em relação com T3F (%).

Para redes com comprimento entre 30 km e 40 km, o sistema T2F demonstra perdas equivalentes ao T3F, o que o torna vantajoso, especialmente considerando outras economias já mencionadas. Além disso, nos cenários I e II, as perdas no sistema T2F tornam-se menores que no T3F a partir de 35 km, enquanto no cenário III, essa redução ocorre a partir de 25 km. Em todos os cenários, foram utilizados cabos aéreos de 2 AWG, que possuem uma resistência de  $1,102 \Omega$  por km, tanto no sistema T2F quanto no T3F, validando assim a análise.

Os desequilíbrios de tensão resultam das diferentes relações X/R dos condutores, que, no caso da fase aterrada, também variam de acordo com o comprimento da linha. Dessa forma, os efeitos da inserção de GDFV e CVV dependem das características específicas de cada fase.

A GDFV exerce maior influência em fases com menor relação X/R, pois maior será o fluxo reverso, enquanto o CVV tem maior impacto em fases com X/R mais elevado, conforme apontado em (7). Essa distinção, juntamente com a influência entre fases causada pelas ligações dos transformadores, provoca variações no comportamento das fases nos cenários analisados.

No cenário IV as resistências de aterramento somam 8, 16, 32 e  $48 \Omega$  e é mostrado que suas influências nas perdas são mínimas. Portanto, o sistema demonstra-se robusto às variações sazonais da resistividade do solo, principalmente em comprimentos maiores que 35 km, uma vez que as resistências dos cabos tornam-se mais relevantes.

No contexto atual do setor energético, especialmente em áreas rurais, a integração da geração distribuída e a necessidade de controle local de tensão em redes de distribuição estão se tornando cada vez mais comuns. Nesse cenário, o sistema T2F não apresenta riscos à qualidade da tensão quando comparado ao sistema T3F, mesmo na presença de geração distribuída e controle Volt/Var (Figuras 7 e 9). Além disso,

constatou-se que o T2F oferece perdas significativamente menores do que o T3F em redes com comprimento superior a 25 km, quando submetidas ao controle Volt/Var.

## VI. CONCLUSÕES

O sistema T2F tem potencial de triplicar a capacidade de fornecimento de energia em áreas atualmente atendidas por sistemas MRT, aproveitando as estruturas existentes. Além dos benefícios econômicos proporcionados pela redução dos custos de instalação e manutenção do sistema T2F, a menor resistência do solo em comparação com um terceiro condutor usado no sistema trifásico convencional sugere uma economia adicional de energia devido à redução das perdas. A comparação entre os sistemas T2F e o T3F nos cenários deste trabalho evidenciam a superioridade do T2F, em extensões superiores a 35 km, mesmo com diferentes resistências de aterramento. Desta forma, este estudo não apenas valida a viabilidade técnica do sistema T2F, mas também destaca seu potencial para promover um fornecimento de energia mais eficiente e sustentável em áreas rurais, com menores perdas de energia. Contudo, é importante ressaltar que a relação de perdas pode variar de acordo com as características de cada sistema, como o condutor utilizado, carregamento da rede e geometria da estrutura utilizada, além das variabilidades do solo.

## REFERÊNCIAS

- [1] H. K. William, *Distribution system modeling and analysis*. Ed.: CRC Press, USA, 2001.
- [2] Empresa de Pesquisa Energética (EPE), “Balanço Energético Nacional 2024 (BEN 2024),” 2024.
- [3] P. Borges, J. Ramos, C. Carvalho, V. Pires, G. Cardoso, D. Ramos, and A. de Moraes, “Repowering rural single-phase distribution network: A non-conventional proposal using two overhead wires and the ground as the third phase,” *Electric Power Systems Research*, vol. 150, pp. 105–117, 2017. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779617301876>
- [4] L. Kräulich, G. Marchesan, G. Cardoso, A. Oliveira, M. Martins, and L. Silveira, “Cost analysis for transforming rural electrical distribution networks into three-phase: Three-phase two-wire versus conventional three-phase,” *Electric Power Systems Research*, vol. 225, p. 109854, 2023. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779623007423>
- [5] L. D. F. Silveira, G. Cardoso Junior, A. d. L. Oliveira, G. Marchesan, and M. Spagnolo Martins, “Analysis of the voltage unbalance phenomenon in a three-phase two-wire distribution system,” in *27th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2023)*, vol. 2023, 2023, p. 11353.
- [6] M. S. Martins, R. Stefanello, P. B. Sebastiany, L. D. S. Dos Santos, L. Kraulich, L. D. F. Silveira, D. B. Ramos, G. C. Junior, and R. M. Rêgo, “Evaluation on safety of people on ground generated voltages in unconventional networks,” in *27th International Conference on Electricity*

*Distribution (CIRED 2023)*, vol. 2023, 2023, pp. 3949–3953.

- [7] R. Martins, “Impacto do controle de tensão e potência reativa (volt-var) em sistemas de distribuição com alta penetração de geração distribuída fotovoltaica,” Master’s thesis, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, 2023. [Online]. Available: [https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/28696/DIS\\_PPGEE\\_2023\\_MARTINS\\_RENATA.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/28696/DIS_PPGEE_2023_MARTINS_RENATA.pdf?sequence=1&isAllowed=y)