

GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS

IMPACTO NA TRT DE DISJUNTORES DE MT MEDIANTE LIMITAÇÃO DAS CORRENTES DE FALTA FASE-TERRA EM PARQUES DE GERAÇÃO RENOVÁVEL

**LEONARDO MARQUES NUNES DE MATTOS(1); VIVIAN CABRAL ROCHA (1); MARIA TEREZA SOUZA (2);
RENATO MARQUES DA SILVA RODRIGUES (2); MATHEUS GARCIA RIBEIRO (3)
BROOKFIELD ENERGIA RENOVAVEL S.A.(1);TRACTEBEL(2); ÁGORA POTÊNCIA(3)**

RESUMO

Este artigo avaliou diferentes formas de se controlar as correntes de curto-circuito fase-terra, em uma planta de geração fotovoltaica com capacidade instalada de 1,0 GW, sendo elas: resistor (R_n) ou reator (X_n) para aterramento do ponto de neutro do transformador elevador da planta ou transformador de aterramento (TT), conectado diretamente ao barramento de média tensão. Essas alternativas foram comparadas entre si, em termos da efetividade na limitação da mencionada corrente falta e do impacto na severidade das solicitações de TRT nos disjuntores de média tensão, tal que X_n se mostrou o mais efetivo e R_n é o que implica nos maiores valores, respectivamente.

PALAVRAS-CHAVE

Tensão de Restabelecimento Transitória, Cabos isolados, Aterramento, Transitórios Eletromagnéticos, Curto-circuito, EMTP/ATP, Geração eólica, Geração Solar

1.0 - INTRODUÇÃO

Durante o projeto de plantas de geração de energia renovável de *utility scale*, seja solar ou eólica, um dos pontos mais delicados é a rede dedicada à interligação dos transformadores unitários dos inversores ou aerogeradores aos barramentos de média tensão da subestação coletora (SE). Tais redes são tipicamente denominadas Redes de Média Tensão (RMT).

Dada a característica dispersa das usinas fotovoltaicas e eólicas, vinculada ao terreno e à potência instalada, suas RMTs podem somar centenas de quilômetros de comprimento, transportar de MW à GW de potência, distribuídos por dezenas de circuitos, e usualmente adotam classes de tensão de 13,8 kV ou 34,5 kV. Muitas RMTs são inteiramente compostas por cabos isolados ou, ao menos, tem partes de travessias de obstáculos feitas com essa tecnologia. Há também os cabos utilizados internamente aos eletrocentros, para conexão dos transformadores aos barramentos internos aos *skids*, e chegadas nas SEs. Da aplicação dos cabos isolados, surge a preocupação quanto a sua suportabilidade às correntes de curto-circuito. De maneira sucinta, o almejado é controlar as correntes de curto-circuito a magnitudes suportáveis pelo cabo até que a atuação da proteção faça o isolamento elétrico do setor em falta. No caso das faltas equilibradas, as correntes fluem apenas pelos condutores principais (núcleos). Já nas faltas desequilibradas envolvendo a terra, existe circulação de correntes pela blindagem metálica do cabo. A suportabilidade às correntes de falta no condutor central é maior que na blindagem metálica, uma vez que a seção transversal do primeiro é maior que a do segundo.

O condutor central tem seu dimensionamento determinado basicamente pela corrente nominal suportável, fazendo-se as devidas considerações de aplicação, e pela queda de tensão dos circuitos [1]. Além disso, usualmente no projeto da rede são feitas considerações acerca das perdas ôhmicas, uma vez que o condutor de menor seção que atenda aos requisitos técnicos, não necessariamente é o que resulta no melhor equilíbrio financeiro ao projeto [2]. De forma que, existe a possibilidade de aumento da seção do condutor central, ainda que superior àquela estabelecida como tecnicamente mínima, uma vez que existe um impacto direto no desempenho técnico-econômico da instalação.

Por outro lado, em relação a seção da blindagem, não se tem incentivo financeiro para seu aumento além do seu valor mínimo. De modo que, qualquer mm^2 superior ao limite mínimo estabelecido trata-se de incremento de dispêndio de capital (CAPEX) sem contrapartida de retorno. Usualmente o que está sendo feito no Brasil para o controle das correntes de curto-circuito fase-terra é o ajuste das conexões à terra. No lado do gerador do circuito de média tensão, aplica-se ligação em delta nos transformadores unitários e, no lado da SE coletora, tipicamente se aterrora o ponto de neutro dos transformadores elevadores com ligação em estrela por resistores. Alternativamente, já se tem notícia ou da aplicação de reatores no aterramento do ponto de neutro do terminal de

média tensão em estrela ou do emprego de transformadores de aterramento nos barramentos, nos casos em que o transformador elevador possui os enrolamentos de média com ligação em delta.

Em paralelo, nos estudos de Projeto Básico das plantas de renováveis, frequentemente notam-se superações das Tensões de Restabelecimento Transitórias (TRT), tanto em termos da Taxa de Crescimento da TRT (TCTRT) quanto em termos de crista da TRT, na manobra de abertura dos disjuntores empregados nas RMTs, na ocasião da eliminação de faltas, quando comparadas às envoltórias padronizadas para disjuntores de mesma classe de tensão da rede em estudo. A superação da TCTRT é relativamente simples de resolver, instalando-se pequenos capacitores para reduzir a variação da tensão no instante da eliminação da falta. Em contrapartida, a superação da crista da TRT não há solução simples. Normalmente, consulta-se ao fabricante no intuito de que este garanta os valores fora de norma. E, em caso de negativa por parte do fabricante, a opção que se tem é adotar disjuntores com classe de tensão mais elevada, capazes de garantir assim a correta operação do disjuntor mediante as cristas da TRT simuladas. Todavia, nem sempre essa alternativa é conveniente, uma vez que em muitos projetos os estudos elétricos são concluídos após a compra dos equipamentos, gerando uma situação desconfortável tanto para o fabricante quanto para o empreendedor.

Considerando-se que o grau de aterramento de um ponto elétrico é característica determinante para a severidade da TRT na manobra de abertura de um dado disjuntor [3], suspeitou-se que a fraca ligação à terra, em conjunto com a elevada susceptância dos cabos isolados, determinada pela forma como estão sendo projetadas as RMTs dos projetos de renováveis, possam estar implicando nas elevadas TRTs simuladas e, por conseguinte, na superação dos disjuntores de média tensão. Nesse contexto, tomando por base o projeto da UFV Janaúba – Fases 1 e 2, composta por 14x51,45 MW e 6x50 MW usinas instaladas na região norte de Minas Gerais, conectadas à SE Janaúba 3 500 kV do Sistema Interligado Nacional (SIN), o presente Informe Técnico objetivou analisar e comentar os seguintes pontos:

- Se as superações da TRT verificadas nos disjuntores das RMTs estão sendo, de fato, ocasionadas pelas estratégias atuais de mitigação das correntes de curto-circuito na blindagem por limitação da ligação à terra;
- A efetividade do aterramento dos pontos de neutro dos transformadores elevadores com reatores no lugar de resistores ou uso do transformador de aterramento, com isolamento do ponto de neutro dos citados transformadores;
- O efeito da amplificação das sobretensões sustentadas na ocasião de faltas fase-terra, nas fases sãs, pelo uso de cabos com isolamento sólida.

Com base nos pontos avaliados, foi possível confirmar que, de fato, a atual estratégia para limitação das correntes nas blindagens dos condutores isolados por resistores aumenta significativamente a sollicitação da TRT nos disjuntores do setor de média tensão dos parques de geração renovável. Além disso, verificou-se que reatores são mais efetivos na limitação da corrente de curto-circuito fase-terra do que resistores, podendo inclusive reduzir as sollicitações de TRT nos disjuntores de MT. A depender da reatância por fase, transformadores de aterramento também apresentam sollicitações de TRT menos severas nos disjuntores de MT, comparados com resistores de mesmo valor ôhmico. Foi possível, inclusive, identificar que os longos cabos isolados aplicados nas RMTs contribuem para aumentar as tensões sustentadas na planta, mediante faltas assimétricas.

2.0 - DESENVOLVIMENTO

Nas análises feitas para esse Informe Técnico foi considerada a UFV Janaúba já na configuração final, com a potência instalada de 1.020,3 MWac, divididas em 20 usinas, conforme apresentado na Figura 1. Na tabela abaixo são descritas as principais características da UFV Janaúba:

	UFVs Janaúba 1-14	UFVs Janaúba 15-20
Transformador elevador	2 x 500/34,5/34,5/13,8/13,8 kV 400/200/200 MVA Ligação YN:yn:yn:d1:d1	1 x 500/34,5/34,5/7,11 kV 400/200/200 MVA Ligação YN:yn:yn:d1
Resistor de aterramento do ponto de neutro dos enrolamentos 34,5 kV	25 Ω	
Inversor	4.116 x Huawei 185 kVA	1.512 x Huawei 215 kVA
Transformador unitário	98 x 34,5/0,8/0,8 kV – 7,56 MVA	42 x 34,5/0,8/0,8 kV - 7,35 MVA
Rede média tensão	Totalmente enterrada em cabos isolados XLPE 34,5 kV	
Linha de transmissão	20 km para conexão na SE Janaúba 3 500 kV	

Como premissa básica, é necessário que as correntes de curto-circuito nas blindagens oriundas das faltas desequilibradas com ligação a terra sejam limitadas a valores suportáveis pela blindagem até a atuação da proteção. O caso mais crítico se trata de uma falta próxima ao barramento da subestação coletora, havendo um rompimento do isolamento de um dado cabo, ligando o condutor central a sua própria blindagem. Para definição do tempo suportável pela blindagem cabo, tomou-se como referência a relação expressa pela Equação 1, conforme ANSI ICEA P-45-482-2007.

$$I_{cc} = \frac{A}{\sqrt{t}} \sqrt{K \log_{10} \left[\frac{T_2 + \lambda}{T_1 + \lambda} \right]} \times 1.973,53 \quad \text{Equação 1}$$

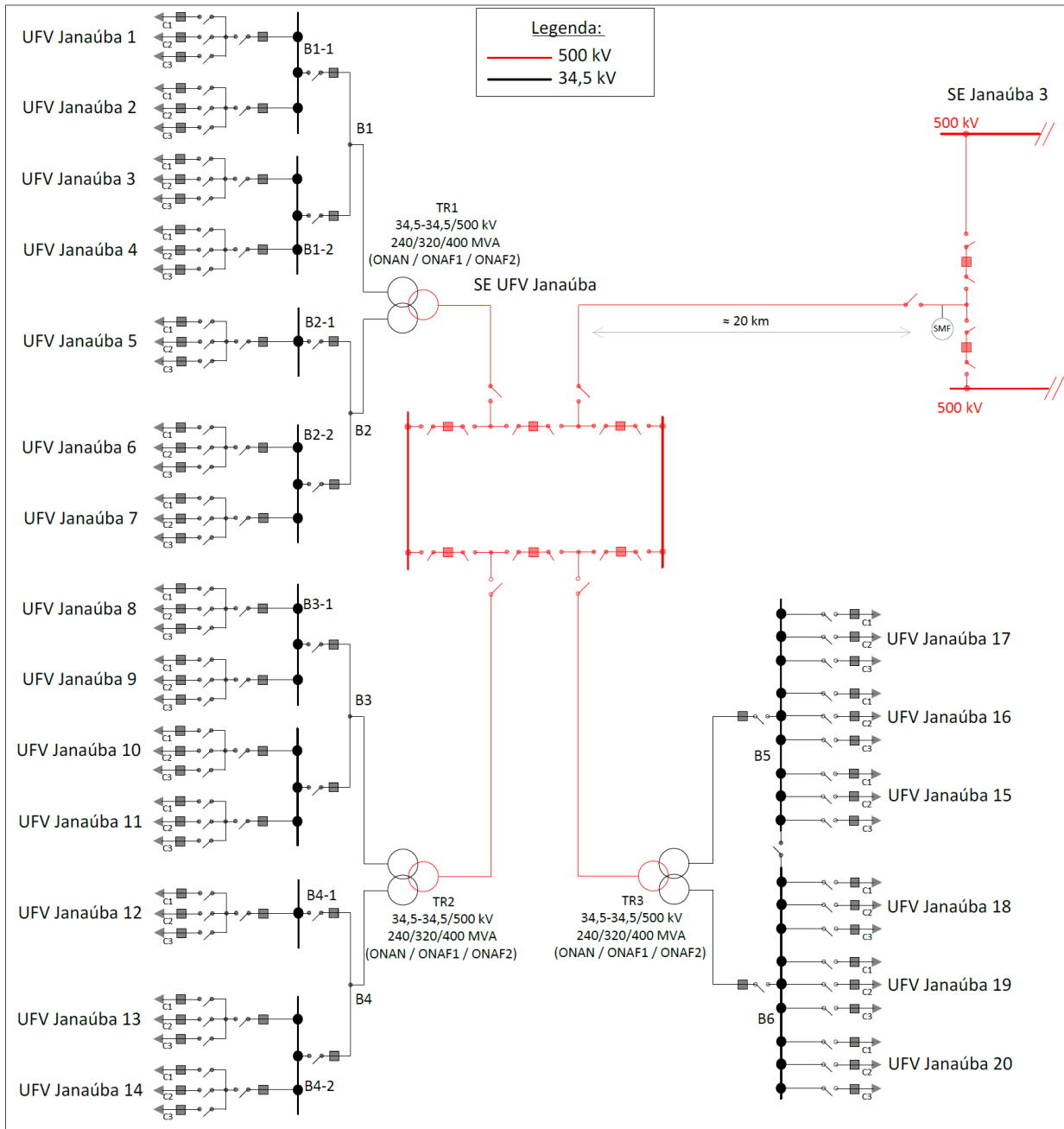


Figura 1 - Diagrama UFV Janaúba.

Onde, I_{cc} [A_{ef}] se trata da corrente suportável para uma dada seção transversal A [mm²], para um dado t [s], considerando a variação de temperatura pré-falta T_1 [°C] para a temperatura máxima suportável pela blindagem T_2 . [°C]. K descreve as propriedades físicas do material e λ a temperatura de resistência zero para o material da blindagem. No presente trabalho, foram adotados os seguintes valores: $T_1 = 85^\circ\text{C}$, $T_2 = 180^\circ\text{C}$ (XLPE/PE ST7), $\lambda = 234,5$ e $K = 0,030$ (cobre). Um estudo preliminar variando-se o tempo da falta e a seção da blindagem na corrente admissível em cabos isolados é apresentado abaixo na Figura 2. Como premissa, o tempo necessário para eliminação de faltas no setor de 34,5 kV da UFV Janaúba será de 1,0 s e a seção transversal da blindagem de 16 mm², suportando até 1,84 kA_{ef} para o intervalo indicado.

Como estratégias para limitação das correntes de falta fase-terra foram consideradas três possibilidades, sendo as duas primeiras o aterramento do ponto de neutro dos enrolamentos de 34,5 kV, em estrela, dos transformadores de 400 MVA por resistor (R_n) ou reator (X_n). Adicionalmente, foi feita uma configuração com o neutro dos enrolamentos 34,5 kV não aterrados (isolados) e lançando-se mão de transformadores de aterramento (TT) em todos os barramentos de 34,5 kV. As impedâncias desses equipamentos foram variadas de 0 até 25 Ω , divididos em 50 passos. No caso do transformador de aterramento, foi considerado o fator de qualidade dos enrolamentos de $X/R = 30$.

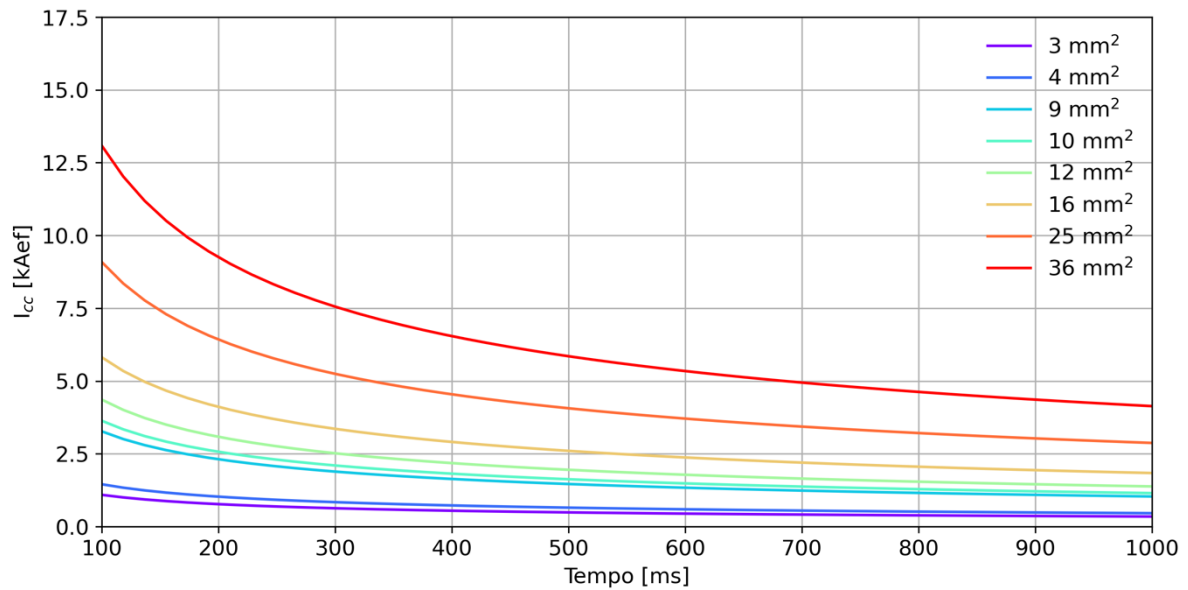


Figura 2 – Suportabilidade a correntes de curto-circuito de um cabo isolado XLPE/EPR com capa de Polietileno (ST7).

Considerando-se a conhecida influência do aterramento nas solicitações de TRT, foram calculados os coeficientes de aterramento (COG) [4], para as três fases, com base nas impedâncias de sequência vistas do ponto de curto-circuito anteriormente indicado.

$$COG_a = \sqrt{3} \left(\frac{Z_0 + 2R_f}{Z_1 + 2Z_0 + 3R_f} \right) \quad \text{Equação 2}$$

$$COG_b = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(a^2 - \frac{Z_0 - Z_1}{2Z_1 + Z_0 + 3R_f} \right) \quad \text{Equação 3}$$

$$COG_c = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(a - \frac{Z_0 - Z_1}{2Z_1 + Z_0 + 3R_f} \right) \quad \text{Equação 4}$$

O COG calculado foi comparado com as tensões sustentadas nas fases sãs (B e C) simuladas, em modo fasorial. A finalidade dessa avaliação é validar que os cálculos feitos para as impedâncias e correntes de falta estão coerentes com os valores esperados, e proporcionar a possibilidade de se traçar algum paralelo entre as TRTs simuladas e os coeficientes de aterramento.

Junto com as simulações para o cálculo do COG, também foram registradas as correntes de curto-circuito fase-terra para todas as variações de aterramento feitas, pois a depender da magnitude da corrente de falta obtida limita-se a magnitude da impedância ou a técnica a ser empregada, uma vez que é premissa básica preservar a blindagem do cabo isolado.

Os estudos de TRT nesse IT, ficaram restritos a avaliação no disjuntor do circuito 2, da UFV Janaúba 2 (J2.2), na condição da falta fase-terra no lado linha. Nesse disjuntor foram encontrados os piores resultados para a TRT nos disjuntores de alimentadores ao longo dos estudos de Projeto Básico/Executivo das UFVs Janaúba 1-14. Para avaliação se houve, ou não, extrapolação da capacidade do disjuntor avaliado de suportar a TRT imposta pela abertura do alimentador J2.2, foram consideradas as seguintes envoltórias normalizadas em [5]. O disjuntor de referência do alimentador J2.2 é de classe 36 kV e corrente nominal de 1.250 A e capacidade de interrupção simétrica de 31,5 kAef.

Tabela 1 - Envoltórias de referência disjuntor de 36 kV, classe S2, Fator de primeiro polo (k_{pp}) = 1,5.

Ciclo de teste	k_{af} [pu]	u_c [kV]	t_3 [μ s]	u' [kV]	t' [μ s]	u_c / t_3 [kV/ μ s]
T100	1,54	67,9	57	22,6	22 (28)	1,19
T60	1,65	72,7	38	24,2	18	1,91
T30	1,74	76,7	23	25,6	11	3,33
T10	1,80	79,4	23	26,5	11	3,45

As simulações no tempo para avaliação da TRT foram executadas por um período de 50 ms, em passos de 1,0 μ s. As manobras de abertura dos disjuntores foram todas comandadas em 16 ms, sendo a abertura realizada sempre no zero subsequente. As faltas foram aplicadas no instante anterior ao início da simulação no tempo, ainda na solução fasorial. Todas as faltas foram francas,

fase-terra e aplicadas na fase A. Cabe destacar, que a análise da crista da TRT foi limitada ao primeiro pico máximo denotado pela TRT, os picos subsequentes foram desprezados, entendendo-se que nos instantes após o primeiro pico os contatos do disjuntor já estarão mais afastados, culminando em uma maior suportabilidade [6].

Em função da longa extensão que o conjunto dos alimentadores de média tensão de usinas com as características da UFV Janaúba apresenta, é provável que o efeito capacitivo dos cabos isolados influencie nos coeficientes de aterramento do sistema, uma vez que a susceptância desses cabos irá impactar diretamente na impedância equivalente de sequência zero no ponto de falta.

Sendo assim, foi realizada uma análise de sensibilidade, relacionando as sobretensões temporárias que surgem na barra B1 de 34,5 kV, da SE coletora Janaúba (Figura 1), com a quantidade de alimentadores subterrâneos conectados nela. De maneira simplificada, o efeito em questão foi simulado em três cenários de ligação de alimentadores na barra B1: doze, seis e nenhum.

Todas as simulações realizadas foram processadas utilizando o *Alternative Transients Program* (ATP).

3.0 - RESULTADOS E ANÁLISES

3.1 – Sensibilidade em relação a corrente de curto-circuito fase-terra e a estratégia de aterramento

Do estudo do efeito das diferentes formas de se controlar a corrente de curto-circuito na blindagem dos condutores isolados (Figura 3), notou-se que o aterramento por reator (X_n) foi mais efetivo do que resistor de aterramento (R_n) e o transformador de aterramento (TT), no sentido que para uma mesma impedância, a aplicação do primeiro resulta em uma menor corrente de curto-circuito menor que o segundo e o terceiro. Para limitação das correntes de falta dentro do valor máximo suportável de 1,84 kAef, definido na seção anterior, as impedâncias mínimas para o transformador de aterramento, resistor e reator: 19,4 Ω /fase, 25,0 Ω e 6,1 Ω , respectivamente.

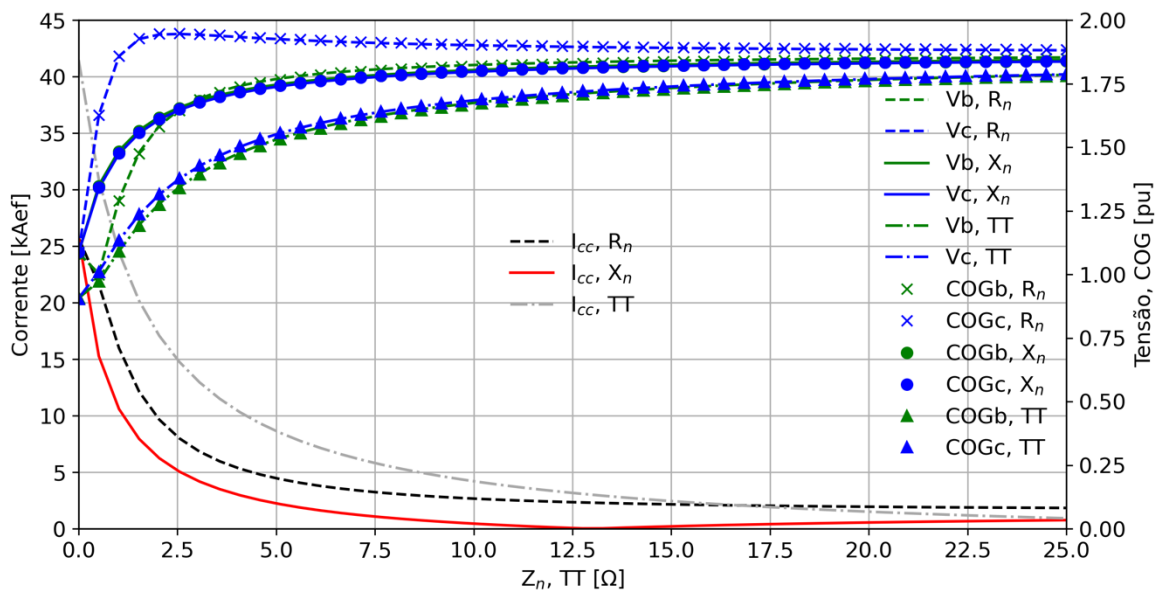


Figura 3 - Variação da magnitude da corrente de curto-circuito monofásica ($I_{cc, l\phi}$) e do fator de amplificação das tensões nas fases sãs (COGs) mediante aterramento com resistor de aterramento (R_n), reator de aterramento (X_n) e transformador de aterramento (TT).

O efeito verificado faz sentido, uma vez sendo o sistema predominantemente indutivo, colocando mais indutor no neutro do transformador inclui na sequência zero uma reatância $X_f + 3X_n$, tendendo a ter um resultado no aumento da impedância no *loop* de falta mais eficaz do que uma resistência, que entrará em quadratura com o sistema existente. O resultado visto para o transformador de aterramento (TT), ligado basicamente em paralelo com a falta, cria um caminho à referência na sequência zero, não tendo o fator de 3 quando inserido no neutro, além de não ter a participação da reatância do enrolamento do transformador. Para a banda dos maiores valores, o efeito de $3Z_n$ começa a ficar menos significativo, aproximando a eficiência na limitação da corrente de curto-circuito entre todas as alternativas avaliadas.

Na mesma figura, é apresentado o cruzamento dos coeficientes de aterramento calculados com base nas impedâncias de sequência vistas do ponto de falta com as tensões nas fases B e C efetivamente simuladas. Com esses resultados, verifica-se que a amplificação das tensões nas fases sãs é mais significativa com o aterramento do neutro com resistor do que com as demais alternativas avaliadas, especialmente nas impedâncias menores. Contudo, para valores acima de 20 Ω , a diferença entre as soluções fica menos evidente.

Outro ponto importante, na vizinhança de $X_n = 12,5 \Omega$, notou-se um indício de ressonância paralela, pois a corrente se aproxima de zero (Figura 3). Avaliando-se a impedância equivalente vista do ponto de falta, $V_{pr\acute{e}}/I_{cc,1phi}$ (Figura 4), fica bem caracterizada a ressonância acarretada pela inserção de elementos acumuladores de energia indutiva no neutro do transformador. A princípio, essa ressonância se mostra preocupante, pois estaria na frequência de 60 Hz. Por outro lado, é uma ressonância de baixa frequência na sequência zero, indicando que para ser excitada, haveria a necessidade de haver uma fonte de sequência zero de 60 Hz. Apesar de não se esperar fontes da mencionada característica, a condição ressonante pode vir a dificultar a manobra de energização de transformadores de média tensão, uma vez que pode tornar mais lento o amortecimento das formas transitórias de tensão e de corrente de *inrush*, sendo necessária avaliação mais aprofundada. Não foram verificadas condições de ressonância com o resistor e com o transformador de aterramento. Contudo, no caso do resistor foi possível identificar a troca da característica da impedância de falta de indutiva para capacitiva por volta de $R_n = 3,5 \Omega$, o que ocorre quando há fraca ligação com a terra, havendo o deslocamento do fluxo da corrente de falta para as susceptâncias do sistema.

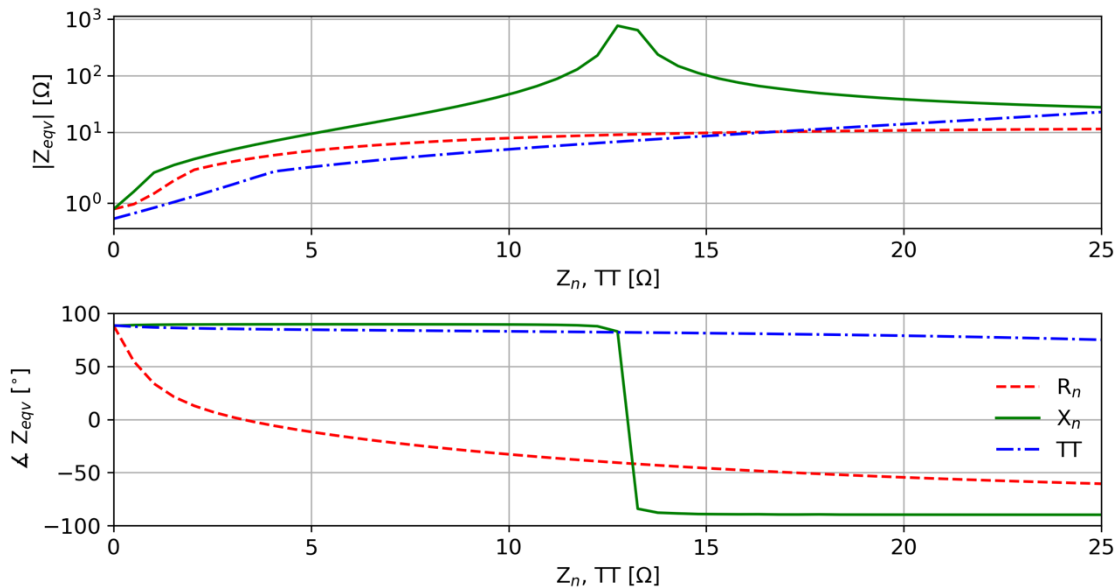


Figura 4 – Variação da impedância equivalente vista do ponto da falta aplicada.

3.2 – Sensibilidade em relação TRT e a estratégia de aterramento

Os resultados para o estudo de TRT, mediante as três diferentes metodologias de aterramento analisadas foram apresentadas na Figura 5. Na faixa de impedâncias de 0 a 5 Ω , os três métodos apresentaram resultados semelhantes entre si, com elevada sensibilidade da TRT a variação da magnitude da impedância simulada. Próxima a essa faixa, somente o neutro aterrado por reator seria aplicável, pois já limita a corrente de curto-circuito fase-terra dentro do valor suportável pela blindagem, a partir do valor de 6,1 Ω . Com o reator no referido valor, os valores de TRT já ficam dentro dos valores normalizados para a envoltória T10.

Com vistas ao resistor de aterramento, foi a solução com menor sensibilidade da TRT no que tange a variabilidade dos resultados. Dentro da faixa analisada, apresentou um comportamento basicamente de aumento da TRT com o aumento do R_n . No entanto, nessa opção, a envoltória da TRT normalizada foi violada para todos os valores simulados. A aplicação dessa estratégia somente seria viável, para o disjuntor em análise, mediante anuência do fabricante para garantir os valores fora de norma simulados, associado a um resistor igual ou maior que 25 Ω .

O emprego do transformador de aterramento ocasionou a maior sensibilidade da TRT dentro da faixa da faixa excursionada. A partir do valor mínimo aplicável, de 19,4 Ω /fase, a TRT fica controlada abaixo da envoltória T10, sendo assim uma estratégia viável para controlar a corrente na blindagem, garantindo-se uma solicitação ao disjuntor dentro dos valores normalizados. Cabe destacar que, para valores mais extremos de impedâncias, além de 17,5 Ω /fase, o transformador de aterramento apresentou as menores TRTs.

O aterramento do ponto de neutro por reator, além do valor mínimo aplicável 6,1 Ω , resultou em TRTs todas dentro da envoltória normalizada T10.

Como consideração final aos estudos de transitórios, registra-se que foi verificada uma sensibilidade dos valores de TRT obtidos com a sequência de abertura. No geral, foram obtidos valores mais críticos quando da abertura da fase sob falta, sendo a primeira ou a segunda a abrir. Para balizar os estudos, definiu-se o comando de abertura para o mesmo instante em todas as simulações, sendo a sempre a fase A a primeira abrir, quando $Z_n=0 \Omega$. Todavia, com o aumento do módulo da impedância e a sua característica,

alterou-se a fase da corrente de falta e, por conseguinte, a sequência de fase inicialmente definida. Esse é um ponto interessante, cabendo avaliar se vale a pena estudar diferentes sequências de fase nos estudos para faltas assimétricas, procedendo não usualmente adotado no Brasil. Destaca-se que esse ponto não é uma novidade e está bem documentado na literatura [7].

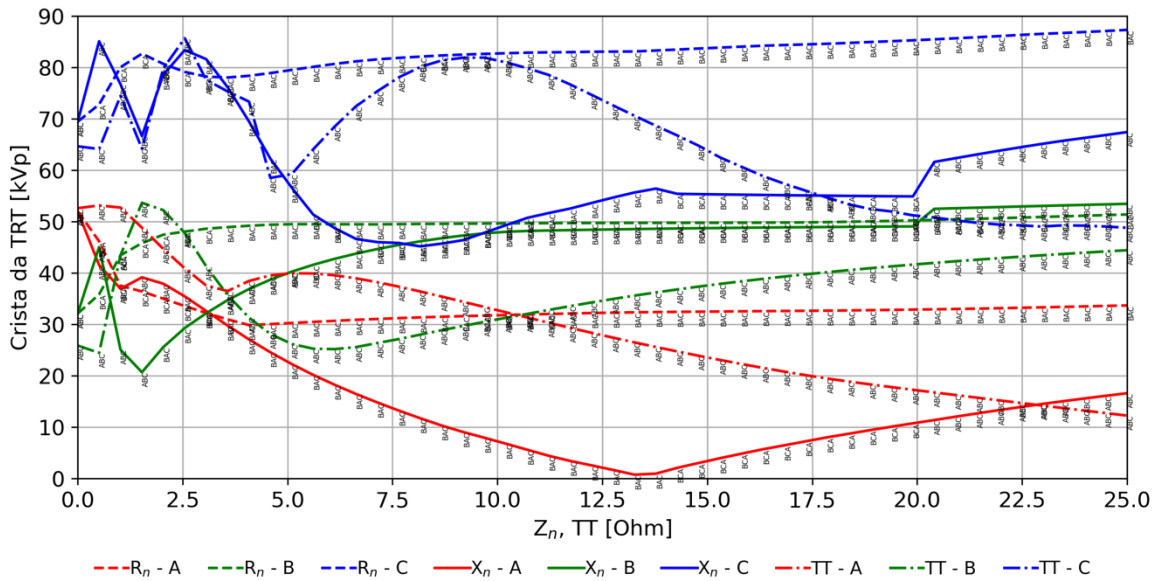


Figura 5 - Variação de TRT mediante aterramento com resistor de aterramento (R_n), reator de aterramento (X_n) e transformador de aterramento (TT) para abertura de falta-monofásica no circuito J2.2, aplicada no lado linha.

3.3 – Sensibilidade das capacitâncias dos cabos subterrâneos nas grandezas avaliadas

A Figura 6 apresenta a análise das tensões sustentadas nas fases sãs, mediante aplicação de uma falta fase-terra, considerando diferentes métodos de aterramento e múltiplas configurações de alimentadores em operação. Diante desta Figura, pode-se notar que as sobretensões temporárias aumentam em função da quantidade de alimentadores em operação, retratando o efeito da inserção da elevada susceptância acumulada pelos cabos isolados. Cabe destacar que, a variação de tensão encontrada com a operação de mais ou menos alimentadores, é diferente para cada um dos métodos, sendo, em ordem suscetibilidade ao efeito em tela: transformador de aterramento, reator de aterramento e, por fim, resistor de aterramento. É importante que na especificação de equipamentos diretamente afetados por eventos desse tipo, como para-raios, deve levar em conta a interação do efeito capacitivo dos alimentadores da RMT nas sobretensões sustentadas decorrentes de faltas envolvendo a terra.

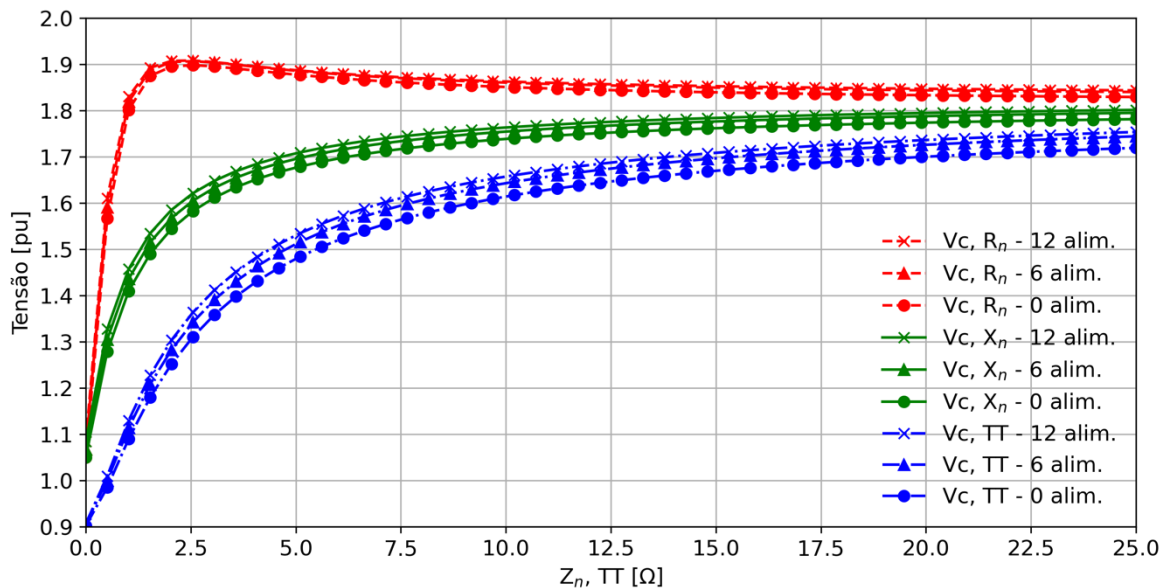


Figura 6 – Variação da magnitude das tensões sustentadas fases sãs mediante falta fase-terra, adotando-se aterramento com resistor de aterramento (R_n), reator de aterramento (X_n) e transformador de aterramento (TT), para diferentes quantidades de alimentadores em operação.

Outro ponto que deve ser avaliado, em relação ao efeito da amplificação das tensões sustentadas quando da ocasião de faltas assimétricas, é para o esquema de ligação para os bancos de capacitores e filtros. É boa prática que em plantas de renováveis que esses equipamentos sejam especificados com ligação do tipo estrela-isolada, caso contrário, também contribuirão na amplificação das sobretensões sustentadas, analogamente aos cabos isolados. Esse ponto inclusive foi explorado nas simulações desta seção, onde para se isolar o efeito dos alimentadores, alterou-se o esquema de ligação dos 2x10 Mvar/34,5 kV ligados na barra do disjuntor avaliado de estrela solidamente aterrado para estrela-isolada, nas tensões sustentadas.

Pode-se notar, por meio da Figura 7, que as correntes de falta no sistema, para um mesmo método de aterramento, se comportam maneira próxima, mesmo variando a quantidade de alimentadores conectados. Além disso, nota-se que a alteração do esquema de ligação dos bancos de capacitores, supramencionada acima, acarretou uma mudança no perfil das correntes, por exemplo, eliminando a ressonância vista próximo ao $12,5 \Omega$, quando adotado o aterramento por X_n . Como consequência, compreende-se que a ressonância vista na Figura 3, trata-se da interação do reator de aterramento com os bancos de capacitores representados com ligação estrela-aterrada no Item 3.1.

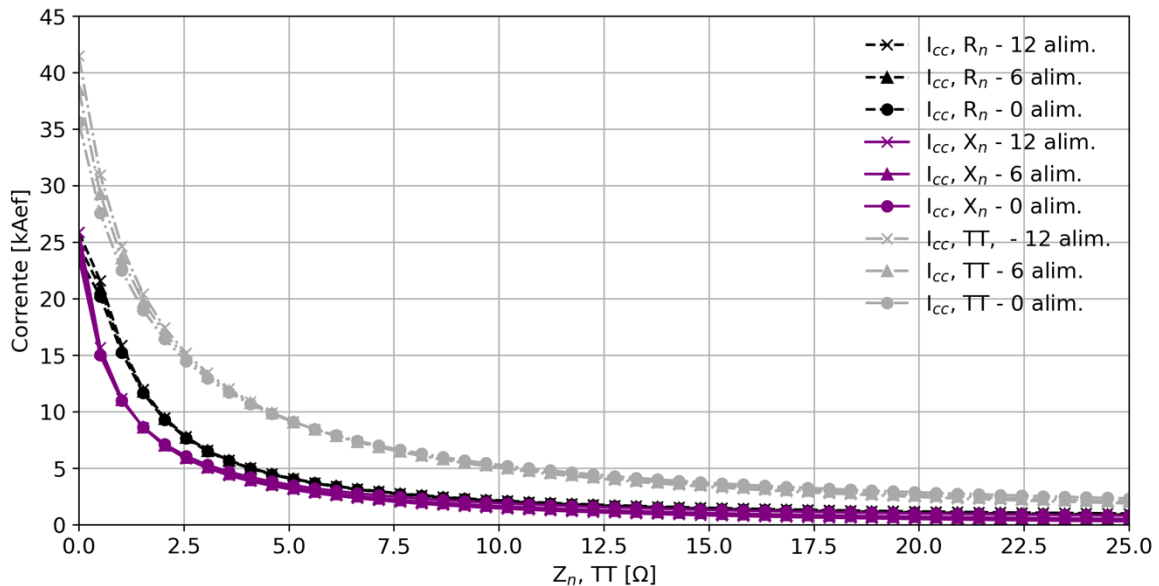


Figura 7 – Variação da magnitude das correntes fase-terra, adotando-se aterramento com resistor de aterramento (R_n), reator de aterramento (X_n) e transformador de aterramento (TT), para diferentes quantidades de alimentadores em operação.

4.0 - CONCLUSÕES

No presente IT foram avaliadas três estratégias para controle das correntes nas blindagens dos condutores isolados, quais sejam: resistor de aterramento e reator de aterramento do ponto de neutro dos enrolamentos de 34,5 kV do transformador elevador, transformador de aterramento ligado aos barramentos de 34,5 kV, bem como analisado o efeito dessas alternativas nas solicitações de TRT na abertura de falta fase-terra de um dos alimentadores da UFV Janaúba. As principais conclusões são:

- O aterramento por reator é mais efetivo no controle das correntes de falta fase-terra do que os resistores de aterramento e o transformador de aterramento. Tal fato pode proporcionar o uso de seções de blindagem menores do que os demais com uma menor impedância;
- A aplicação do reator com $X_n = 12,5 \Omega$, no neutro do transformador, inseriu um ponto de ressonância paralela em 60 Hz, quando aplicado junto com os bancos de capacitores em ligação estrela-aterrada. Tal condição pode acarretar efeitos colaterais indesejados. Nessa situação, recomenda-se evitar o ponto de ressonância, aplicando-se reatores com valores menores ou maiores, com bom afastamento da posta situação e, principalmente, atentar para o esquema de ligação dos eventuais bancos de capacitores da planta;
- O resistor de aterramento apresentou o pior desempenho em termos de TRT, violando a envoltória normalizada para toda a faixa de valores ôhmicos considerados;
- O reator de aterramento e o transformador de aterramento apresentaram valores satisfatórios de TRT para todo o universo de reatores avaliados, cuja limitação da corrente de curto-circuito foi adequada para preservar a blindagem;
- Um ponto interessante proporcionado pela aplicação de transformadores de aterramento é permitir que os enrolamentos dos transformadores elevadores sejam ligados em delta, dispensando o delta interno para estabilização e filtro de terceira harmônica e, portanto, simplificando o projeto;
- Em plantas já existentes cujos disjuntores estejam sendo superados por TRT, a troca do tipo de aterramento de resistores para reatores é uma opção de garantir o desempenho dos equipamentos existentes, sendo uma opção de custo relativamente baixo, frente a substituição dos disjuntores superados. Cabe destacar que uma alteração dessa magnitude em uma instalação elétrica demanda que uma avaliação profunda, de modo a investigar as interações entre a rede e o novo dispositivo de aterramento escolhido;

- A sequência de abertura dos polos disjuntores alterou significativamente as solicitações de TRT no disjuntor avaliado;
- Foi possível verificar o impacto direto que as capacitâncias dos cabos isolados ocasionam nas sobretensões temporárias durante faltas envolvendo a terra, em função do valor da impedância de aterramento escolhida. No caso da UFV Janaúba, por exemplo, pode-se notar um pico de sobretensão passando de 1,9 pu, a depender do valor da resistência escolhida para o neutro do transformador elevador;
- Bancos de capacitores quando conectados no setor de MT da planta de geração renovável, pode ter o mesmo efeito na amplificação das sobretensões temporárias, sendo recomendável sua especificação como estrela-isolado;
- A consideração da RMT e a interação com o método de aterramento da planta também ocasiona impactos diretos nos níveis de curto-circuito fase-terra do sistema, devendo ser avaliado cuidadosamente na fase de especificação da rede;

Diante do exposto, entende-se que o estudo aqui apresentado atingiu seu objetivo de obter alternativas viáveis de controle das máximas correntes de curto-circuito circulantes nas blindagens de cabos isolados, alterando-se os tipicamente empregados resistores de aterramento do ponto de neutro, ao passo de se reduzir as solicitações de TRT nos disjuntores de média tensão em parques de geração renovável. Foi possível também descrever um melhor entendimento do efeito da aplicação de cabos isolados nas tensões sustentadas no setor de média tensão, quando da aplicação de faltas assimétricas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] “Cabos elétricos — Cálculo da corrente nominal — Condições de operação — Otimização econômica das seções dos cabos de potência”, ABNT NBR 15920, 2011.
- [2] E. N. Teich, “DIMENSIONAMENTO TÉCNICO E ECONÔMICO DE CONDUTORES PARA REDES COLETORAS DE CENTRAIS GERADORAS EÓLICAS CONSIDERANDO A NBR 15920”, UFF, Niterói, 2020.
- [3] Amon Filho, Jorge, “Tensão de Restabelecimento Transitória de Disjuntores - Metodologia de Estudo”, PUC, Rio de Janeiro, 1986.
- [4] “IEEE Guide for the Application of Neutral Grounding in Electrical Utility Systems--Part I: Introduction”, IEEE. doi: 10.1109/IEEESTD.2017.7891430.
- [5] *High-voltage switchgear and controlgear. Part 100, Alternating-current circuit-breakers*, Edition 2.0. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2017.
- [6] L. C. ZANETTA JÚNIOR, *Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência*. EdUSP, 2003.
- [7] D. F. Peelo, *Current interruption transients calculation*. 2019. doi: 10.1002/9781119547273.

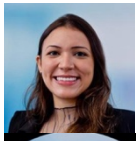
DADOS BIOGRÁFICOS



Leonardo M. N. de Mattos; Nascido no Rio de Janeiro em 22 de julho de 1987, graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade de Brasília (2012), mestre em Engenharia Elétrica, com ênfase em transitórios eletromagnéticos, pela Universidade Estadual de Campinas (2017). Atualmente trabalha como Engenheiro Eletricista Especialista na Elera Renováveis no Departamento de Engenharia & Construção, atuando no dimensionamento e otimização de novos projetos de usinas renováveis, bem como nas tratativas de conexão dessas plantas ao SIN. Áreas de interesse: sistemas elétricos de potência, transitórios eletromagnéticos e computação de alta performance.



Vivian Cabral da Rocha; Engenheira eletricista formada pelo CEFET/RJ. Atuação focada em desenvolvimento de projetos de energia renovável e estudos elétricos na Elera Renováveis.



Maria Tereza Souza; Graduada em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) no ano de 2017, com mestrado na área de Sistemas Elétricos de Potência no ano de 2022. É Engenheira de Estudos Elétricos de Sistemas de Transmissão na Tractebel Engineering desde o ano de 2017.



Renato Marques da Silva Rodrigues; Graduado em Engenharia Elétrica pela Pontifícia Universidade de Minas Gerais no ano de 2013. Possui Especialização em Sistemas Elétricos de Potência no ano de 2015 Mestrado no ano de 2021, ambos concluídos pela Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Atualmente trabalha na Tractebel Engineering desde o ano de 2011.



Matheus Garcia Ribeiro; Graduado em Engenharia de Energia e Automação Elétricas pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (2014) e pós-graduado na área de Sistemas de Potência na mesma Instituição com pesquisa relativa à modelagem de Linhas de Transmissão Subterrâneas para estudos de transitórios eletromagnéticos de manobra. Possui experiência em estudos elétricos em regime permanente e transitórios eletromagnéticos para especificação de equipamentos e avaliação da performance de sistemas. Atualmente é consultor independente na área de estudos elétricos e fundador da Ágora Engenharia de Potência, com experiência prévia na Hitachi Energy, FIGENER Engenheiros Associados e ISA CTEEP (dep. de Estudos e Planejamento da Expansão).