



Simulação e análise da energização de um alimentador da rede de distribuição com aterramento temporário conectado.

Tema: Redes de Distribuição

Autores: Assibi Gonçalves Lins

Co-Autores: Ronaldo Rossi, Gustavo Paiva Lopes, Paulo Márcio da Silveira

Empresa: Universidade Federal de Itajubá

Resumo

O objetivo deste trabalho é apresentar um estudo dos níveis de tensão e corrente aos quais os trabalhadores podem ser expostos durante a manutenção da rede de distribuição caso ocorra uma energização acidental. Utilizando o software ATPDraw foram realizadas simulações da energização de um alimentador real da rede de distribuição, com todos os trechos, cargas e derivações. Partindo da condição de que o aterramento temporário foi corretamente dimensionado e instalado, foram realizadas simulações variando as características do sistema, tais como, resistividades do solo, resistência de aterramento, comprimentos da rede de distribuição. Além disso, foram simuladas manobras de energização de somente uma fase e a configuração de trecho confinado. Foram verificados, os valores de tensão e corrente em todos os componentes do circuito. Através das simulações foram constatados altos níveis de tensão no ponto em que o aterramento temporário está conectado em relação a terra. A norma IEEE Std. 1048, que é o guia de aplicação do aterramento temporário em linhas de transmissão e distribuição alerta sobre o uso do método trecho confinado em caso de energização monofásica, porém, as simulações demonstram níveis de tensão e corrente superiores aos limites seguros também em energizações trifásicas.

1. Introdução

1. Introdução

A norma NR10 estabelece que, para uma instalação elétrica ser considerada desenergizada, devem ser realizadas as etapas de seccionamento, impedimento de reenergização, verificação de ausência de tensão e instalação de aterramento temporário [1]. No entanto, a rede de distribuição aérea apresenta particularidades na manutenção de um trecho desenergizado, as quais elevam os riscos enfrentados pelos trabalhadores. Por exemplo, para realizar as etapas de seccionamento e impedimento de reenergização é frequentemente necessário manobrar equipamentos localizados a quilômetros de distância do ponto de trabalho. Se observa em campo acidentes devido a erros de manobra que causaram a energização de trechos onde trabalhadores realizavam manutenção na rede de distribuição, e o aterramento temporário não foi suficiente para protegê-los. A razão para a ineficiência do aterramento temporário em proteger o trabalhador muitas vezes não é esclarecida. O dimensionamento adequado e a correta instalação do conjunto de aterramento temporário são cruciais para garantir a proteção dos trabalhadores. No entanto, a

aplicação em redes de distribuição requer uma avaliação abrangente, considerando fatores como resistividade do solo, comprimento do alimentador, resistência entre a haste e o solo, entre outros. Este trabalho visa estudar os valores de tensão e corrente aos quais os trabalhadores podem ser expostos em caso de energização acidental, levando em conta as variáveis específicas da aplicação na rede de distribuição. A seguir, são apresentadas as informações que serviram de base para o estudo.

1.1 Limites Admissíveis

Foram considerados os dados da Tabela I [2] como limites de tensão e corrente admissíveis a que o eletricitista poderá ser exposto, baseados nas normas NR10, IEEE Std 80, IEEE Std 1048 [3] e NBR 5410. Além de considerar os tempos especificados na norma IEC 61230. A Figura 1 apresenta os dados da norma IEC 60479-2 [4], indicando os limites de corrente para tempos inferiores a 10 ms.

Tabela I: Valores de Queda de Tensão e Corrente Máximas Permitidas.

Tempo (s)	Corrente (mA) / (mA pico)	Resistência do homem (Ω)		Queda de tensão máxima no homem	
		na torre	no solo	na torre (V) / (V pico)	no solo (V) / (V pico)
0,1	496,5 / 702,1	500	1000	248,3 / 351,1	496,5 / 702,1
0,25	314,0 / 444,0			157,0 / 222,0	314,0 / 444,0
0,5	222,0 / 313,9			111,0 / 156,9	222,0 / 313,9
1,0	157,0 / 222,0			78,5 / 111,0	157,0 / 222,0
Regime Permanente ¹	16,0 / 22,6			8,0 / 11,3	16,0 / 22,6
Regime Permanente ²	50,0 / 70,7			25,0 / 35,3	50,0 / 70,7

¹ referente aos limites de largar. ² referente aos limites sem que haja fibrilação ventricular.

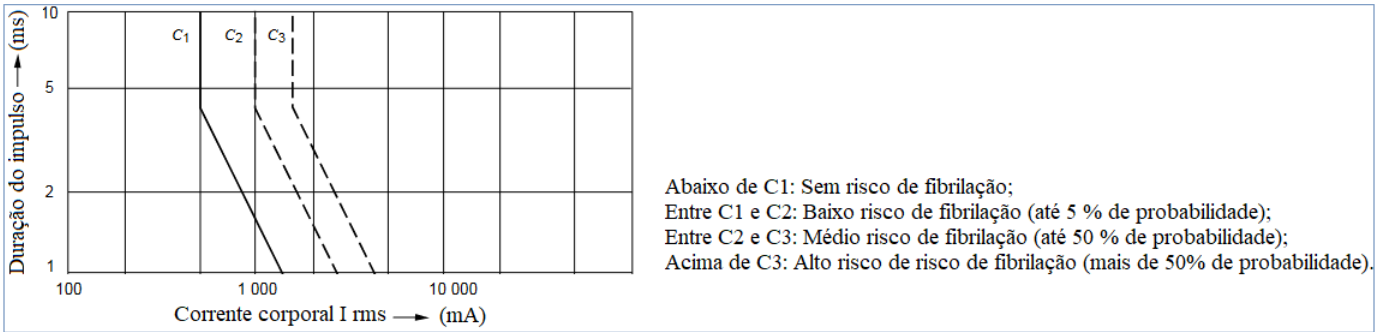


Figura 1: Limites para tempos inferiores a 10ms.

1.2 Conjunto de Aterramento Temporário

O conjunto de aterramento temporário interliga as três fases a um único cabo de descida para terra, com um ponto intermediário de aterramento na estrutura, cujo propósito é conduzir a corrente de curto-circuito por um período especificado e limitar a corrente através do trabalhador devido a tensões de exposição no local de trabalho a níveis aceitáveis [3].

Para o estudo em questão, foram consideradas as características do conjunto de aterramento temporário utilizado pela concessionária local, fornecidas pelo fabricante [5]. Os dados utilizados na simulação são: Seção nominal de 25 mm², Comprimentos de 2 x 2m e 1 x 13m, Resistência máxima 20°C de 0,795 Ω/m e Capacidade de Icc simétrica de 8 kA por 1s. A Figura 2 apresenta o diagrama elétrico equivalente do conjunto de aterramento temporário [2], constante também no manual da concessionária [6] e descrito na norma IEEE 1048 [3], a qual é o guia de aplicação do aterramento temporário em linhas de transmissão e distribuição. No diagrama da Figura 2, a resistência RH indica que o trabalhador está tocando a fase B.

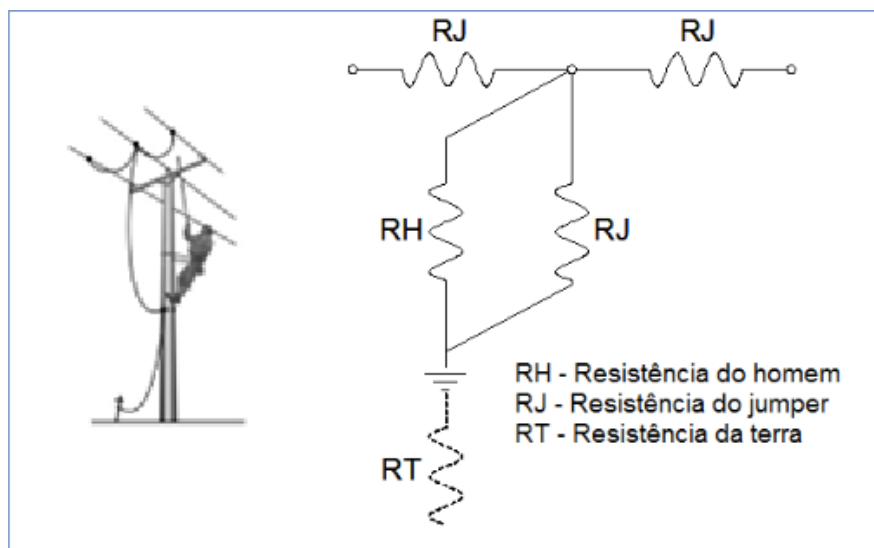


Figura 2: Diagrama equivalente.

1.3 Características da Rede de Distribuição

Para o estudo em questão foi considerado um alimentador da rede distribuição aérea operando em 13,8kV, com retorno por terra, solidamente aterrado na subestação, conforme ilustrado na Figura 3. O sistema equivalente foi configurado com os dados: $Z1 = j1,01412$ @ $Z0 = j0,79026$ que corresponde as correntes de curto-circuito ICC 3F = 7856,6 A e ICC FT = 8480,6 A [7].

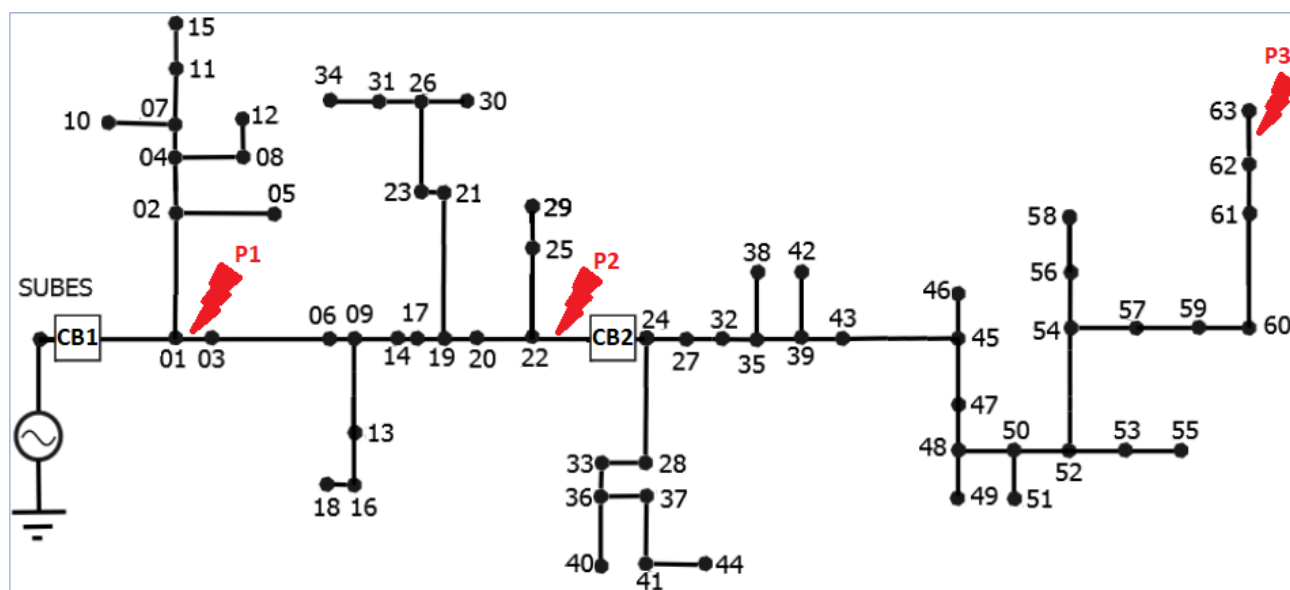


Figura 3: Diagrama do alimentador.

1.4 Software ATPDraw

As simulações foram realizadas utilizando o software ATPDraw. A Figura 4 apresenta o circuito equivalente com o aterramento conectado. A resistência RH que representa o trabalhador, foi conectada na fase A, devido a apresentar maiores tensões do que na fase B. A resistência entre a haste de aterramento e o solo está representada pela resistência RT. E os cabos que compõem o conjunto de aterramento temporário são representados pelas resistências RJ. Foi considerado que o aterramento temporário foi corretamente instalado. As indicações P1, P2 e P3 na Figura 3 são os pontos do alimentador considerados nas simulações.

As distancias entre a subestação e os três pontos são 0.61 km, 2.02 km, e 4.82 km respectivamente. O bloco LCC do software ATPDraw [8] foi usado para os trechos de linha.

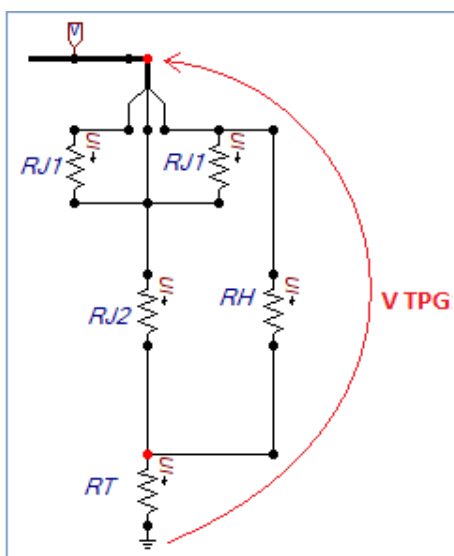


Figura 4: Circuito equivalente.

2. Desenvolvimento

2. Desenvolvimento

As simulações foram divididas em duas etapas. Na primeira etapa, o aterramento está conectado em um único ponto, conforme a Figura 4. Na segunda etapa, a simulação foi realizada na condição trecho confinado. A resistência R_H que representa o trabalhador foi configurada com o valor de 500 Ω conforme a Tabela I.

2.1 Etapa 1 - Cenário 1

Foram realizadas 27 simulações, variando as características a seguir: Comprimentos da RMT: 0,61 km, 2,02 km e 4,82 km, Resistividades do solo (ρ): 100 $\Omega \cdot m$, 10000 $\Omega \cdot m$, Resistências de aterramento (R_T): 10 Ω , 100 Ω , 300 Ω . Para os tempos de fechamento do disjuntor foi considerado que as três fases não fecham exatamente no mesmo instante, conforme efetivamente ocorre em campo. Os seguintes tempos de fechamento foram configurados: Fase A= 20ms, Fase B= 20,3ms e Fase C= 20,6ms, conforme informações do fabricante de religadores Artech. A Figura 5 apresenta a forma de onda típica de tensão encontrada em todas as simulações referente ao potencial entre o ponto onde o aterramento temporário está conectado e a terra, V_{TPG} , conforme indicado na Figura 4. O primeiro pico de tensão corresponde ao momento de fechamento do disjuntor e o segundo pico corresponde a abertura do disjuntor devido a atuação da proteção. O pico de tensão no momento do fechamento do disjuntor é devido a diferença de tempo de fechamento entre as fases do disjuntor. O pico de tensão no momento da abertura é porque apesar dos contatos do disjuntor estarem abertos, o arco permanece até a corrente passar por zero, conforme verificado na oscilografia das correntes da fonte. A Figura 6 apresenta os valores da tensão de pico no momento da abertura do disjuntor em todas as simulações demonstrando o impacto da variação das resistências entre a haste de aterramento e o solo, comprimento da rede de distribuição e resistividade do solo.

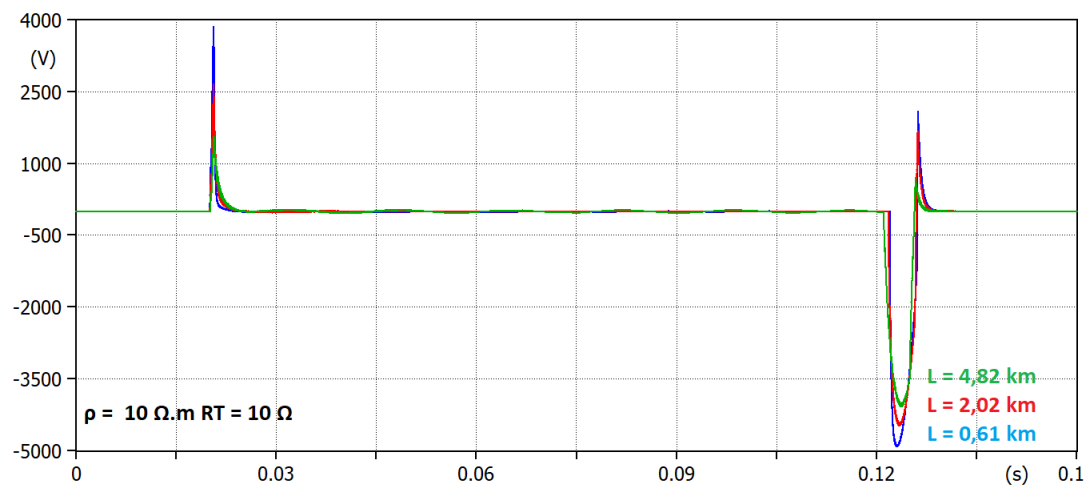


Figura 5: Tensão no ponto VTPG.

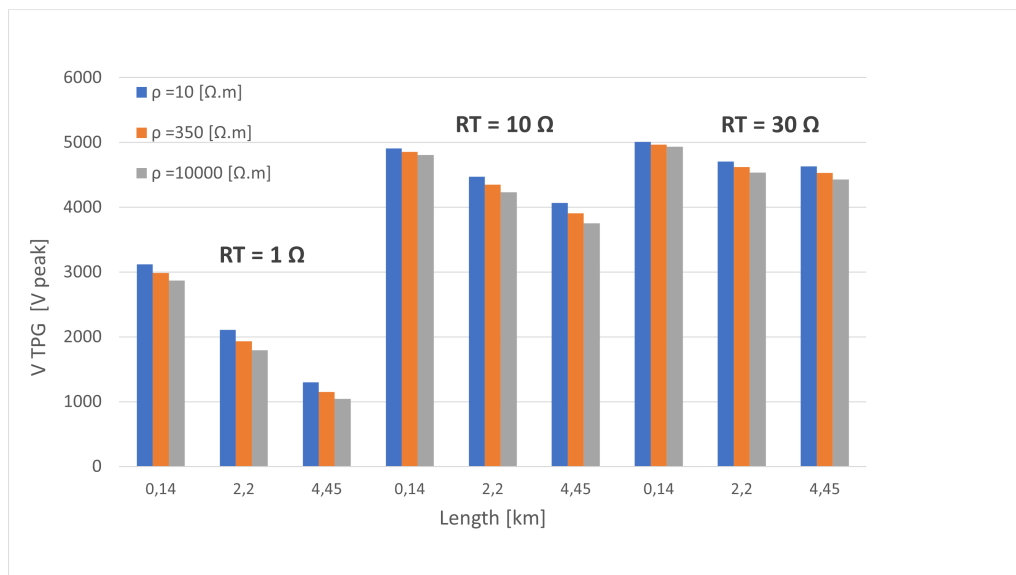


Figura 6: Pico da tensão VTPG na abertura do disjuntor.

A Figura 7 apresenta a corrente que circula pela resistência R_H , a qual representa o trabalhador e a Figura 8 apresenta a tensão sobre a resistência R_H , no pior caso que é a uma distância de 0,61 km da subestação com menor resistividade de solo, $\hat{A} = 10 \Omega$.

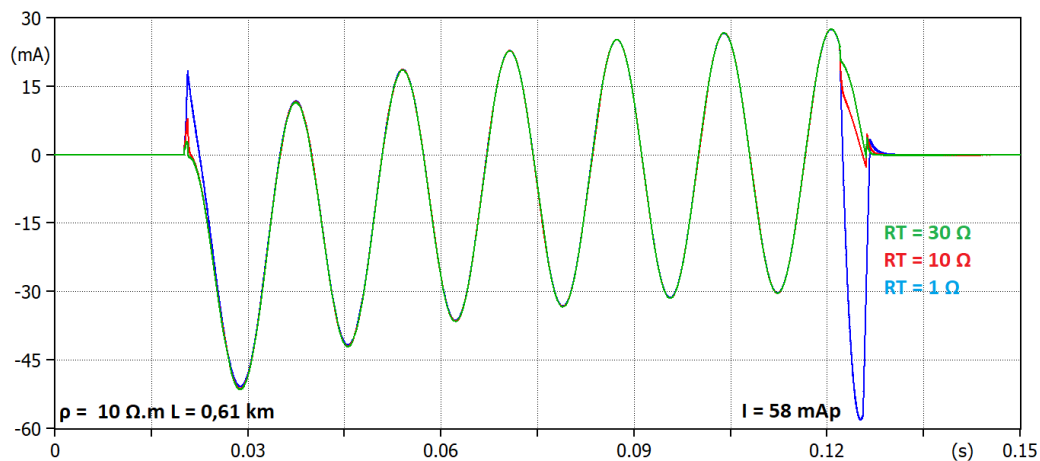


Figura 7: Corrente na resistência RH.

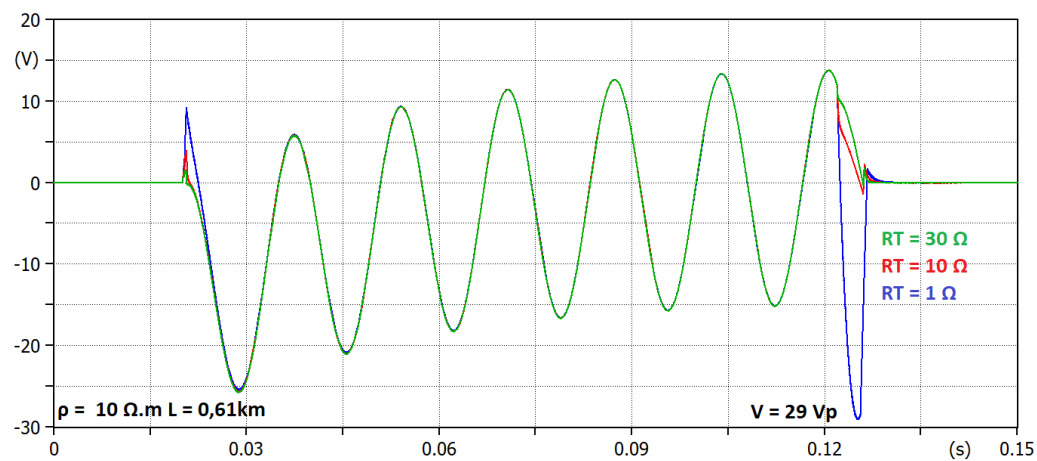


Figura 8: Tensão sobre a resistência RH.

Foi verificado que os valores de tensão e corrente aos quais o trabalhador fica exposto nas condições simuladas neste cenário estão dentro dos limites considerados seguros. Foram considerados os limites da Tabela I para o tempo de exposição de 500 ms, cujo valor é indicado na norma IEEE 1048 [3] como típico valor de duração de falta. Além disso, foi verificado que a corrente que circula pelos cabos que compõe o conjunto de aterramento temporário, indicados como RJ no circuito da Figura 4, superam da capacidade do cabo que é de 8kA por 1 s. No pior caso a corrente chega a 16kA de pico, RMT: 0,61 km, (Á): 10¹⁰ Ω.m, (RT): 10¹⁰ Ω.

2.2 Etapa 1 - Cenário 2

Foram realizadas duas simulações com o objetivo de comparar os resultados da energização de um sistema solidamente aterrado e outro com aterramento através de transformador de aterramento (TAT) na subestação. Foi considerado o comprimento da RMT: 2,02 km, resistividade do solo $\hat{A} = 10^{10} \Omega.m$ e resistência de aterramento $R_T = 10^{10} \Omega$. O sistema equivalente do circuito com aterramento através de transformador de aterramento foi configurado com a característica: $Z_1 = j1,01412 \Omega$ e $Z_0 = 1 + j10,79026 \Omega$. A forma de onda da tensão entre o ponto onde o aterramento temporário está conectado e a terra das duas simulações são similares ao cenário anterior, diferenciando apenas nos valores de pico no momento do fechamento e de abertura do disjuntor. Se observa a diferença de 1487 V a mais na tensão de pico no momento do fechamento do disjuntor e a diferença de 1392 V a mais na tensão de pico na abertura para o circuito

solidamente aterrado. Os valores de tensão e corrente aos quais o trabalhador fica exposto nas condições simuladas neste cenário estão dentro dos limites considerados seguros.

2.2 Etapa 1 - Cenário 3

Foram realizadas duas simulações com o objetivo de verificar as tensões e correntes no caso da energização ocorrendo somente em uma fase. Os dois circuitos consideram sistema solidamente aterrado e diferenciam somente no valor das resistências de aterramento, sendo $R_T = 1 \Omega$ e 30Ω . A Figura 9 apresenta a tensão entre o ponto onde o aterramento temporário está conectado e a terra. A Figura 10 apresenta a corrente que circula pela resistência R_H , a qual representa o trabalhador. Os valores de tensão e corrente aos quais o trabalhador fica exposto nas condições simuladas neste cenário estão dentro dos limites considerados seguros.

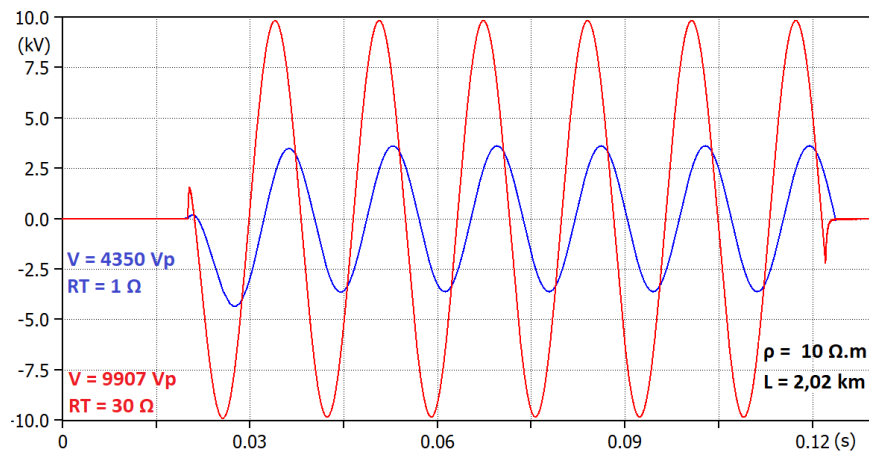


Figura 9: Tensão no ponto VTPG.

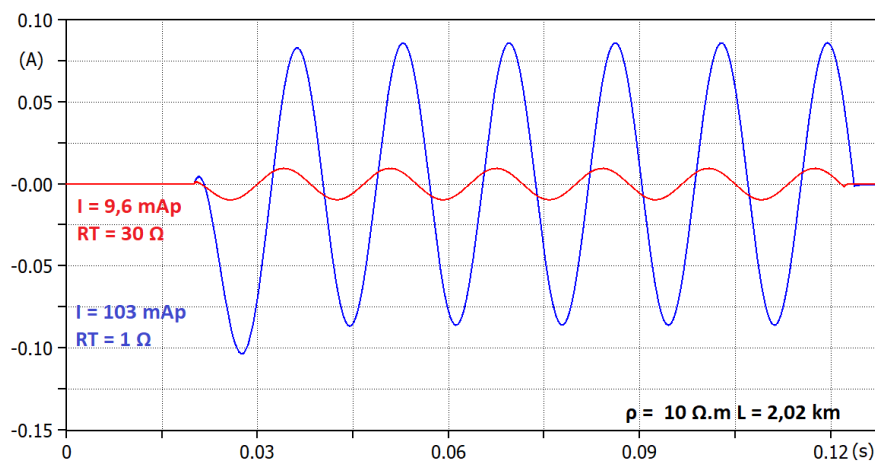


Figura 10: Corrente na resistência R_H .

2.2 Etapa 2 - Cenário 4

Foram realizadas duas simulações com o objetivo de verificar as tensões e correntes no caso da aplicação do método trecho confinado no qual os aterramentos temporários são instalados em ambos os lados de um local de trabalho. A Figura 11 exemplifica a aplicação do método com a situação de emenda de cabos [9]. Este método é o que mais se aplica em campo durante as atividades de manutenção.

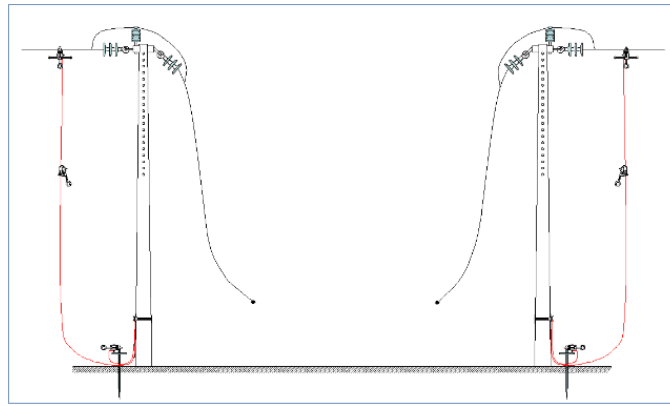


Figura 11: Método trecho confinado para realização de emenda de cabo.

A Figura 12 apresenta os circuitos simulados no software ATPDraw. As resistências R_H circuladas em vermelho representam o trabalhador em duas possíveis posições.

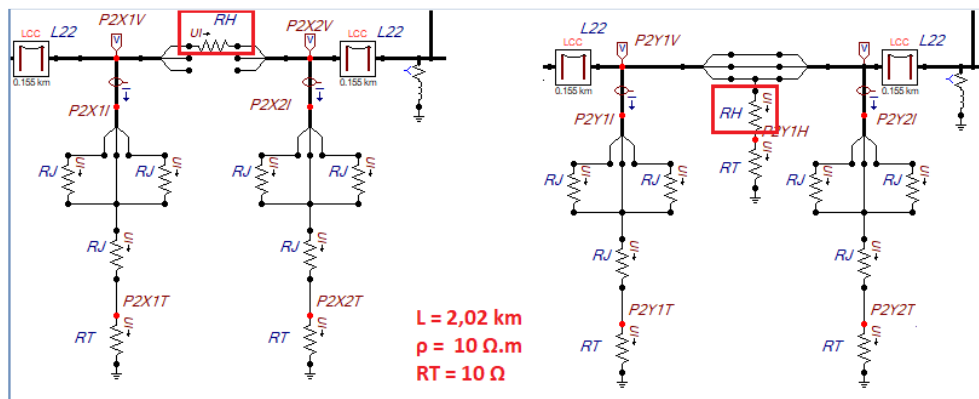


Figura 12: Circuito simulado no software ATPDraw

A Figura 13 apresenta a corrente que circula pela resistência R_H , a qual representa o trabalhador e a Figura 14 apresenta a tensão sobre a resistência R_H , com valores que superam os limites indicados na Tabela I para o tempo de exposição de 500 ms e o limite de corrente para pulsos inferiores a 10 ms indicados na Figura 1.

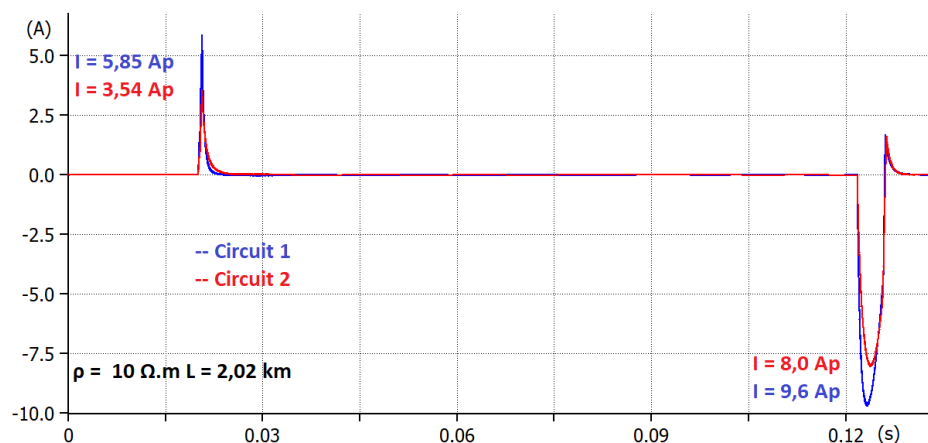


Figura 13: Corrente na resistência R_H .

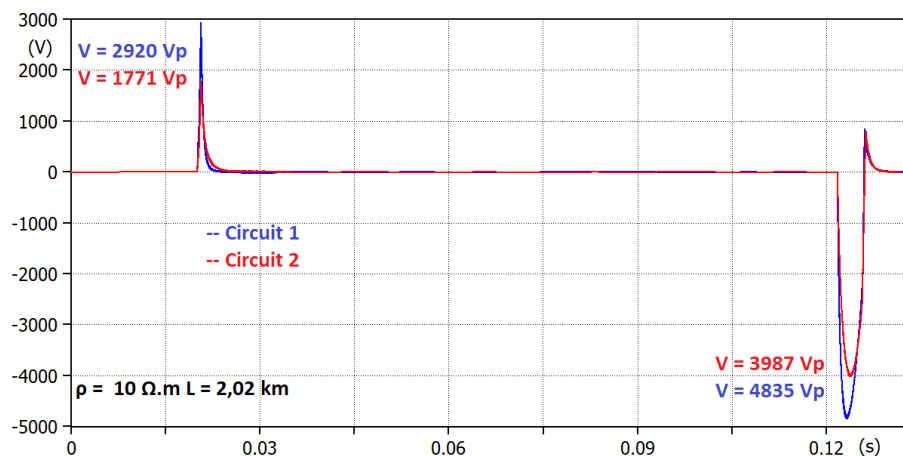


Figura 14: Tensão sobre a resistência RH.

Consta na norma IEEE Std. 1048, anexo B, item B.6, exemplos numéricos deste cenário e descreve como uma aplicação segura, porém, não foram considerados os picos de tensão e corrente nos momentos de fechamento e abertura do disjuntor. Se destaca que para valores superiores a 250V pode ocorrer ruptura da pele e a resistência do corpo humano reduzir significativamente [9].

2.2 Etapa 2 - Cenário 5

Foram simulados os mesmos circuitos do Cenário 4, porém, com a energização ocorrendo somente em uma fase. Consta na norma IEEE Std. 1048, anexo B, item B.6, exemplos numéricos deste cenário e apresenta um alerta desta aplicação a qual oferece riscos ao trabalhador. A Figura 15 apresenta a corrente que circula pela resistência RH, a qual representa o trabalhador e a Figura 16 apresenta a tensão sobre a resistência RH, ambas com valores que superam os limites de segurança estabelecidos como seguros.

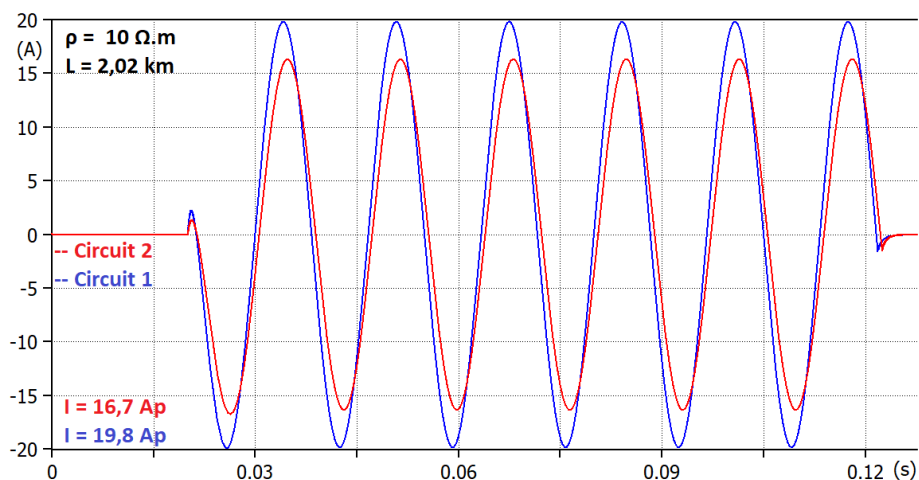


Figura 15: Corrente na resistência RH.

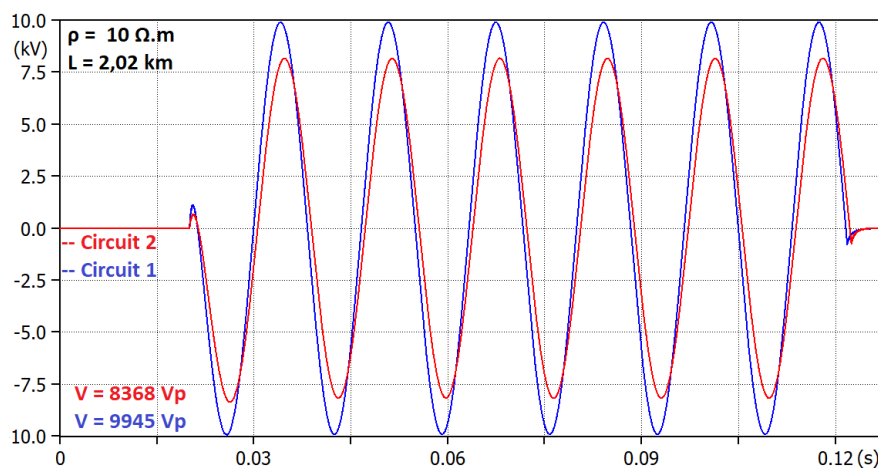


Figura 16: Tensão sobre a resistência RH.

3. Conclusão

Através das simulações foram constatados os altos níveis de tensão que se apresentam entre o ponto em que o aterramento temporário está conectado e a terra devido ao fechamento e abertura do disjuntor, mesmo em circuitos com baixa resistência de aterramento, baixa resistividade de solo e curto comprimento. Sendo estes níveis mais elevados em sistemas solidamente aterrados na subestação. Foi possível visualizar que as variações nos valores de resistência de aterramento e comprimento do circuito afetam mais do que as variações na resistividade de solo. Se constatou também os altos níveis de tensão entre o ponto em que o aterramento temporário está conectado e a terra nas energizações monofásicas. Além disso, foi possível verificar que as correntes que circulam nos cabos de aterramento temporário estavam acima da capacidade do cabo. Através dos resultados encontrados foi possível identificar no cenário 4 níveis de tensão e corrente superiores aos limites seguros contrariando as informações indicadas na norma IEEE Std. 1048, anexo B. Destaca-se que nos cenários 1 a 3 foi considerado que trabalhador estaria tocando somente uma das fases, porém, em campo o trabalhador pode estar em outras posições, como por exemplo uma mão em cada fase, ou seja, há mais cenários possíveis além dos simulados. A partir dos resultados obtidos se pretende motivar a realização de testes em campo para comparar com os resultados das simulações e consolidar a análise. Além disso, fomentar a utilização de simulações como ferramenta, a revisão de procedimentos e o desenvolvimento de novas soluções para evitar a ocorrências de energizações acidentais. A reavaliação da escolha dos EPIs também é um ponto importante, como o uso de luvas isolantes em locais de trabalho desenergizados e o emprego de mantas isolantes em trechos confinados.

4. Referências bibliográficas

- [1] NR-10 - Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade, 2019, pp. 5.
- [2] Diniz, Wagner Eustáquio, 'Aterramento temporário para linhas de transmissão: análise da segurança humana', Dissertação de Mestrado, PUC-MG, 2008, pp. 53,59.
- [3] IEEE Std 1048 Guide for Protective Grounding of Power Lines, 2016.

- [4] IEC Std 60479-2: Effects of current on human beings and livestock - Part 2: Special aspects, 2019, pp.. 36.
- [5] Ritz do Brasil S.A, "Catálogo de Produtos", 2023.
- [6] COPEL (PR), "Manual de Instruções Técnicas. MIT 161612. Conjunto de aterramento temporário para redes de distribuição de baixa e média tensão", 2021.
- [7] Conceição, Everaldo Nonato da, 'Modelagem e Simulação da Proteção de Alimentadores de Distribuição Utilizando Softwares Tipo EMTP'. Dissertação de Mestrado, UNB, 2012, pp. 71.
- [8] Castro, Caio Fiche Seabra, 'Uso do Software Atpdraw para Simulação da Proteção de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica', Monografia, UNB, 2017, pp. 32, 57.
- [9] Ferreira, Cláudio, "Efeitos Fisiológicos da Corrente Elétrica sobre o Corpo Humano", Monografia, UNIFEI, 2010, pp. 67.