



XX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica
SENDI 2012 - 22 a 26 de outubro
Rio de Janeiro - RJ - Brasil

Fabio Romero	Daimon Engenharia e Sistemas	fabio.romero@daimon.com.br
Alden Uehara Antunes	Daimon Engenharia e Sistemas	alden@daimon.com.br
Dario Takahata	Daimon Engenharia e Sistemas	dario@daimon.com.br
Fernando Locks Lange	Daimon Engenharia e Sistemas	lange@daimon.com.br
Andre Meffe	Daimon Engenharia e Sistemas	andre.meffe@daimon.com.br
Hamilton Guilherme Bueno de Souza	AES Eletropaulo Metropolitana - Eletr. de São Paulo S.A.	hamilton.bueno@aes.com
Antonio J. Monteiro	AES Eletropaulo Metropolitana - Eletr. de São Paulo S.A.	antonio.monteiro@aes.com
Paulo Henrique Chiarot	AES Eletropaulo Metropolitana - Eletr. de São Paulo S.A.	paulo.chiarot@aes.com

Soluções Alternativas para Minimização dos Problemas em Redes de Distribuição de Média Tensão Decorrentes do Furto de Condutores Neutro

Palavras-chave

Furto de neutro

Aterramentos elétricos

Desempenho de redes de distribuição

Resumo

O objetivo deste artigo é avaliar o impacto da falta de condutores neutro em trechos específicos da rede no desempenho de alimentadores de distribuição e propor soluções para mitigar os danos causados ao sistema devido ao furto destes condutores.

As simulações computacionais foram realizadas por meio do Interplan – programa desenvolvido pela Daimon Engenharia e Sistemas e que conta com funcionalidades de planejamento, operação e análise técnica de redes de distribuição – e mostram que a ausência de condutores neutro em determinados trechos dos alimentadores pode aumentar consideravelmente o nível das tensões neutro-terra, comprometendo, desta forma, a segurança operacional do sistema. A solução proposta neste artigo reduz os níveis das tensões neutro-terra a valores satisfatórios ou, ao menos, próximos àqueles obtidos antes do furto dos condutores neutro.

1. Introdução

Os furtos de condutores neutro em trechos das redes de média tensão podem ser considerados responsáveis por diversos problemas operacionais em alimentadores, especialmente no que tange o fornecimento em áreas

rurais e comunidades de baixa renda. No Brasil esse problema vem se agravando devido principalmente a questões sociais, tais como a facilidade de revenda dos materiais dos condutores neutro (cobre ou alumínio) na clandestinidade. A imprevisibilidade dos furtos associada às características das cargas dos alimentadores podem trazer consequências indesejáveis para as empresas de energia elétrica, tais como impactos na qualidade da energia fornecida, danos a equipamentos, aumento das perdas, aumentos nos níveis de interrupção e potenciais de toque e de passo, além dos altos custos relacionados à tradicional prática de recondução dos trechos com neutro furtado com condutores de alumínio ou cobre.

Uma das distribuidoras de energia brasileiras que vem sofrendo problemas devido ao furto de condutores neutro em seu sistema de distribuição é a AES Eletropaulo. A Companhia é responsável pelo fornecimento de energia a cerca de 6 milhões de consumidores no Estado de São Paulo, sendo que seu sistema de distribuição de energia é caracterizado pela presença de um condutor neutro comum às redes de média tensão (MT) e baixa tensão (BT) e multiterrado a cada 300 m e em todos os pontos da rede com equipamentos instalados (transformadores de distribuição, religadores, bancos de capacitores, reguladores de tensão etc.). O neutro multiterrado e comum às redes MT e BT é empregado para que se tenha um baixo valor de impedância para a corrente que retorna à subestação (ZIPSE, 2003).

O objetivo deste trabalho é analisar o impacto da ausência de condutores neutro em trechos específicos da rede de MT no que tange o desempenho técnico e a segurança da rede, bem como propor soluções para mitigação dos danos ocasionados pelo furto destes condutores.

As análises apresentadas neste artigo fizeram parte das atividades de um Projeto de P&D desenvolvido pela Daimon Engenharia e Sistemas em parceria com a AES Eletropaulo. Atualmente as conclusões estão servindo de base para a Empresa para aplicação prática em área piloto.

As soluções propostas contemplam a especificação de valores adequados de resistência de terra (R_t) em diferentes pontos de aterramento ao longo do alimentador aliados (ou não) à utilização de condutores bimetálicos nos trechos com furto de neutro, para manter o desempenho do alimentador com níveis satisfatórios no que tange a parte operacional e de segurança do sistema (AES Eletropaulo, 1993).

O estudo apresentado neste artigo foi realizado utilizando os dados do alimentador RGR-104 (Rio Grande da Serra) devido à alta incidência de furto de condutores neutro. Como referência para os resultados, o desempenho do alimentador RGR-104 foi avaliado considerando o neutro em todos os pontos da rede.

2. Desenvolvimento

2.1. Descrição do sistema

As simulações foram desenvolvidas pelo programa computacional Interplan (OLIVEIRA & KAGAN & GUARALDO & EL HAGE & MÉFFE & MIGUEL FILHO, 2004) e referem-se ao alimentador RGR-104. Este alimentador opera com tensão de 13,2 kV e tem comprimento total de 51 km. De acordo com informações da AES Eletropaulo, o furto de condutores neutro neste alimentador chega a 20% do comprimento total (dados de 2010), conforme apresentado na Figura 1.

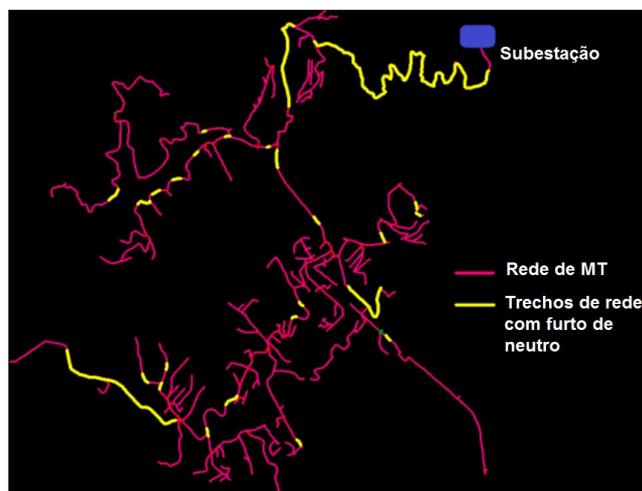


Figura 1 – diagrama unifilar do alimentador RGR-104 com indicação dos trechos com furto de neutro.

Nas simulações computacionais as seguintes considerações foram adotadas:

- a. de acordo com informações da Empresa, o alimentador RGR-104 utiliza atualmente condutores neutro de alumínio 3/0 AWG no tronco e 1/0 AWG nos ramais da rede;
- b. o alimentador RGR-104 é caracterizado pela presença de neutro multiaterrado e foram considerados como pontos de aterramento, conforme (AES Eletropaulo, 1993), todos os postes (barras):
 - com existência de equipamentos (transformadores, religadores, banco de capacitores, reguladores de tensão etc.);
 - a cada 300 m de rede primária;
 - quando não houver equipamento nos finais de rede, haverá um ponto de aterramento na barra a 70 m à montante do final da rede, e;
 - postes adjacentes a equipamentos.
- c. as simulações computacionais para avaliação do desempenho do alimentador foram realizadas por meio de cálculos de fluxo de potência, baseado na análise nodal da rede e no método de eliminação de Gauss, utilizando o *software* Interplan;
- d. como parâmetros de entrada nas simulações computacionais foram utilizadas as bases cadastrais dos dados de mercado do alimentador RGR-104 e como referência para os cálculos, as medições de carregamento das fases e do neutro na saída da subestação, conforme apresentado na Tabela 1;

Tabela 1 – medições de carregamento das fases e do neutro nas saídas da subestação do alimentador RGR-104.

Carregamento na fase D I_D (A)	Carregamento na fase E I_E (A)	Carregamento na fase F I_F (A)	Carregamento no neutro I_N (A)	Patamar
445	452	417	32	Noite

- e. baseado em medições de campo ao longo alimentador, a resistividade do solo foi considerada como sendo igual a 300 ohms.m e a resistência de terra, a menos que indicado em contrário, igual a R_t

- = 50 ohms em todos os pontos de aterramento da rede;
- f. adotou-se, como padrão de segurança adequado para o sistema elétrico de distribuição, a tensão máxima do neutro em relação à terra (V_{nt} , tensão neutro-terra) em condições normais de operação igual a $V_{nt} = 10 \text{ V}$ (AES Eletropaulo, 1993);
 - g. não foram levadas em conta as influências dos seguintes parâmetros:
 - o aterramento dos postes e das unidades consumidoras de baixa tensão. Nas simulações computacionais, o aterramento concentrou-se no lado da média tensão dos transformadores de distribuição da concessionária (transformadores de luz, delta aberto e trifásico estrela), e;
 - o os aterramentos de outros alimentadores adjacentes ao RGR-104.
 - h. nas alternativas de melhoria para mitigação dos danos causados devido ao furto dos condutores neutro, foram levadas em conta as configurações de aterramento e condutoramento dos trechos de rede com ausência de neutro conforme apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – configurações de aterramento e condutoramento dos trechos de rede com furto de neutro utilizadas como alternativa nas simulações de melhoria de desempenho técnico do alimentador RGR-104.

Configurações de aterramento		
Número de hastes	Comprimento total (mm)	Disposição
4	1500	Alinhadas
6	1500	Alinhadas
4	2400	Alinhadas
6	2400	Alinhadas
4	3000	Alinhadas
6	3000	Alinhadas
4	6000	Alinhadas
6	6000	Alinhadas
Configurações de condutoramento dos trechos de rede com furto de neutro		
Reinstalação de condutores de alumínio ϕ 1/0 AWG		
Reinstalação de condutores de alumínio ϕ 3/0 AWG		
Instalação de condutores bimetálicos 7N9 53% IACS (ϕ 1/0 AWG)		
Instalação de condutores de bimetálicos 7N7 53% IACS (ϕ 3/0 AWG)		

2.2. Resultados e discussões

Inicialmente, o desempenho do alimentador RGR-104 foi avaliado sem levar em conta os trechos com furto de neutro (caso de referência). Posteriormente, o desempenho do alimentador – no que tange os níveis de segurança na rede (tensões neutro-terra) – foi avaliado considerando as condições reais da rede (trechos com furto de neutro) e, por fim, foram propostas soluções para minimizar os danos causados pela ausência do condutor neutro.

2.2.1. Condição de referência do alimentador RGR-104

Na Figura 2 o desempenho do alimentador em estudo – no que tange os níveis de tensão V_{nt} ao longo da rede – é apresentado para a situação de referência e considerando o patamar a noite. Sendo que:

- os trechos em verde representam as barras de neutro com tensão $V_{nt} \leq 5 \text{ V}$;
- os trechos em amarelo representam as barras de neutro com tensão $5 < V_{nt} \leq 10 \text{ V}$;
- os trechos em vermelho representam as barras de neutro com tensão $V_{nt} > 10 \text{ V}$.

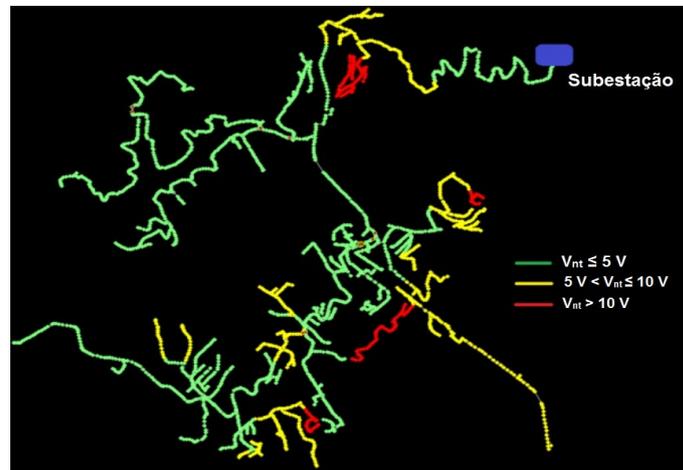


Figura 2 – diagrama unifilar do alimentador RGR-104 com indicação dos níveis de tensão neutro-terra (V_{nt}) para a condição de referência da rede. $R_t = 50 \text{ ohms}$ e patamar da noite.

Os resultados da Figura 2 mostram que mesmo na condição de referência, uma boa parte dos níveis de tensão V_{nt} se encontram dentro do limite aceitável (regiões em amarelo, $5 \text{ V} < V_{nt} \leq 10 \text{ V}$), enquanto que uma pequena (mas importante) parcela da rede está com níveis de tensão neutro terra superiores a 10 V (regiões em vermelho). As áreas críticas ($V_{nt} > 10 \text{ V}$) apresentadas na Figura 2 são devido ao desequilíbrio gerado pelos trechos com transformadores em ligação delta (monofásicos).

Nas análises seguintes, o desempenho do alimentador RGR-104 é avaliado considerando a condição real de operação (levando em conta os trechos de rede com furto de neutro) e, na sequência, soluções são propostas para mitigar os danos causados devido à ausência do neutro.

2.2.2. Condição real de operação do alimentador RGR-104

Os cálculos apresentados a seguir se referem à avaliação do desempenho das tensões neutro-terra no alimentador, levando em consideração os trechos de rede com furtos de neutro. De acordo com a AES Eletropaulo (dados de 2010), 20% dos 51 km de comprimento da rede de MT do alimentador RGR-104 estão operando sem o condutor neutro, assim como mostrado no diagrama unifilar da Figura 1.

Na Figura 3 tem-se, representado no diagrama unifilar do alimentador RGR-104, os níveis de tensão neutro-terra (V_{nt}) para a condição real de operação do alimentador.

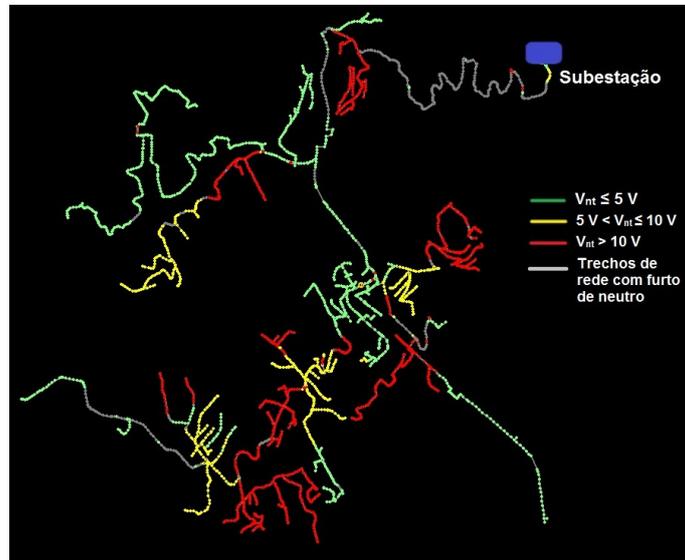


Figura 3 – diagrama unifilar do alimentador RGR-104 com indicação dos níveis de tensão neutro-terra (V_{nt}) para a condição real de operação do alimentador. $R_t = 50$ ohms e patamar da noite.

Comparando-se os resultados das Figuras 2 (rede referência) e 3 (rede real), verifica-se que a ausência do condutor neutro em determinados trechos da rede de MT piora as condições operacionais do alimentador, aumentando significativamente o número de barras em situação crítica ($V_{nt} > 10$ V). Observou-se também que houve um aumento significativo nos valores máximos das tensões V_{nt} obtidas ao longo da rede.

Se forem comparados os resultados das Figuras 1 (alimentador com indicação dos trechos com furto de neutro) e 3 (condição real de operação do alimentador), observa-se que as tensões mais críticas ($V_{nt} > 10$ V) não aparecem, necessariamente, nos trechos com furto de neutro e sim nas regiões onde há carga (na grande maioria com transformadores em ligação delta).

Destaca-se, ademais, que o furto de neutro ao longo da rede potencializa as tensões críticas nas áreas com transformadores monofásicos.

2.2.3. Soluções alternativas para mitigação dos danos causados pela ausência de condutores neutro e melhoria das condições de segurança da rede

Para melhorar o desempenho técnico e as condições de segurança da rede apresentada na Figura 3, foi desenvolvido e implementado no *software* Interplan um Algoritmo Genético capaz de avaliar o desempenho técnico do alimentador e indicar soluções adequadas (dentro daquelas apresentadas na Tabela 2) em diferentes pontos ao longo da rede de MT, a fim de reduzir os valores das resistências de terra em determinados pontos de aterramento e instalar condutores bimetálicos em determinados trechos da rede, para manter as condições operacionais e de segurança dentro dos padrões técnicos satisfatórios apresentados em (AES Eletropaulo, 1993).

Inicialmente, para facilitar as simulações computacionais e diminuir o tempo de processamento, o alimentador foi segmentado em 7 regiões. Para cada região selecionada foram realizadas simulações computacionais de fluxo de potência e indicadas as soluções mais adequadas para melhoria do desempenho operacional e da segurança (sob o ponto de vista de tensões neutro-terra) daquela determinada região. Nas Figuras 4 e 5 tem-se o diagrama unifilar com a segmentação do alimentador RGR-104 para efeito de estudo.

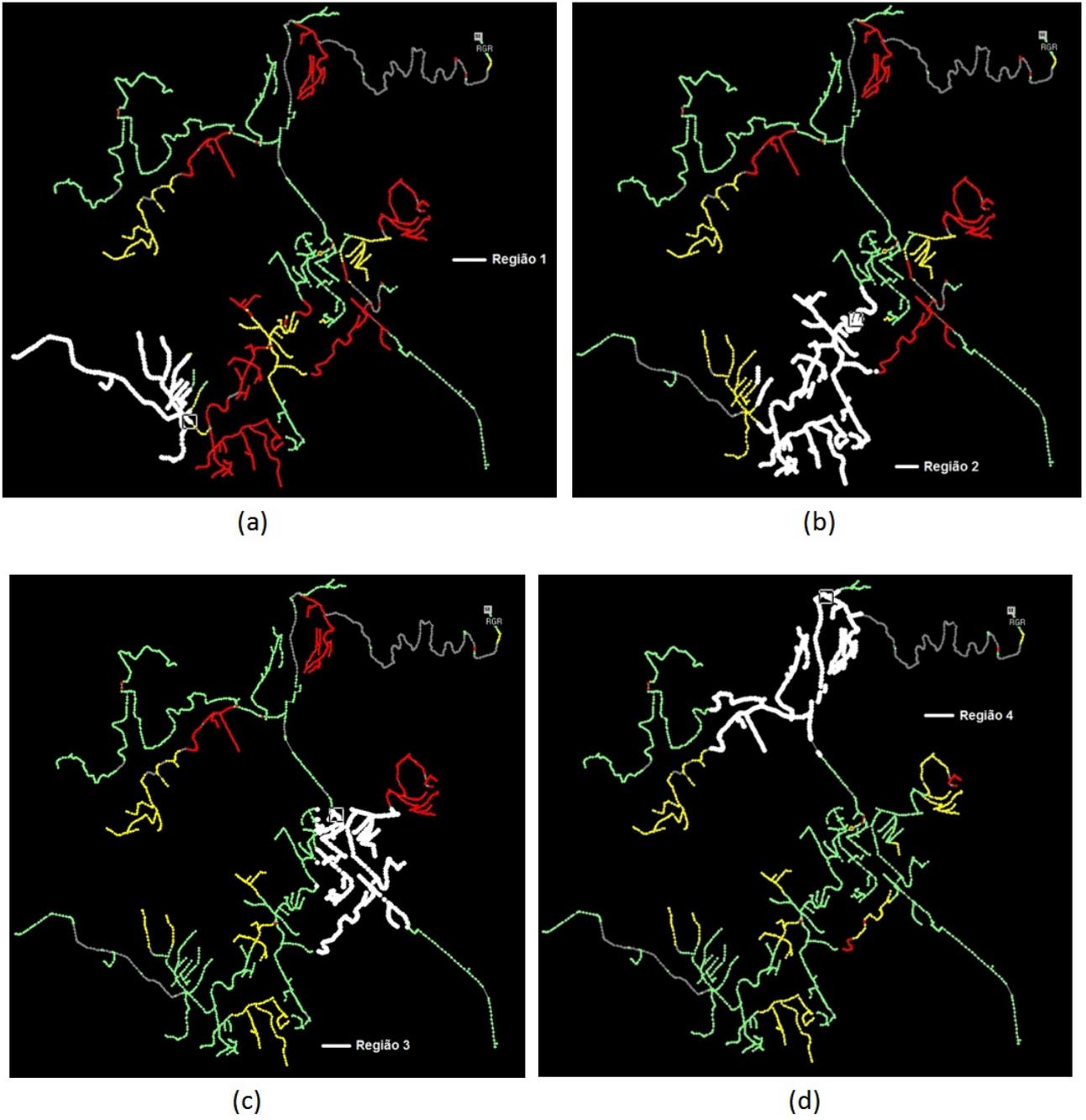


Figura 4 – segmentação do alimentador RGR-104 para efeito de estudo. $R_t = 50$ ohms e patamar da noite.
 (a) Região 1; (b) Região 2; (c) Região 3; (d) Região 4.

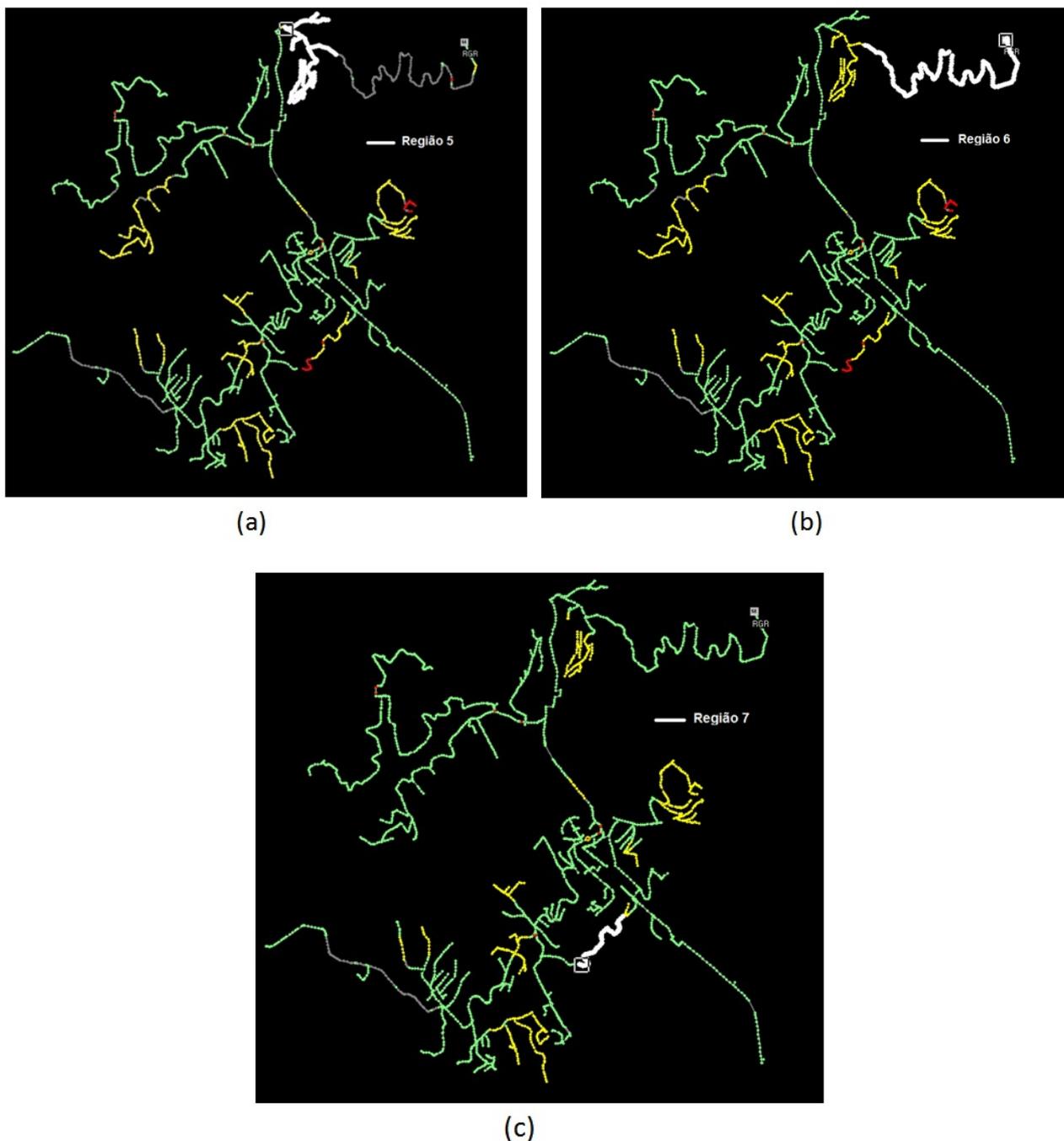


Figura 5 – segmentação do alimentador RGR-104 para efeito de estudo. $R_t = 50$ ohms e patamar da noite.
 (a) Região 5; (b) Região 6; (c) Região 7.

Como parâmetros de entrada para ações de melhoria do desempenho técnico do alimentador, foram consideradas as alternativas apresentadas na Tabela 2. Após cada melhoria sugerida pelo Algoritmo Genético um novo cálculo de fluxo de potência foi realizado para analisar as novas condições operacionais e de segurança da rede.

Na Figura 4b tem-se os resultados obtidos com as melhorias propostas na Região 1. Comparando-se as Figuras 4b e 3 (condição real de operação), nota-se que na solução proposta pelo Algoritmo Genético todas as barras da Região 1 ficaram dentro dos padrões de segurança ($V_{nt} \leq 10$ V) para as condições normais de operação da rede (Eletropaulo, 1993). Cabe ressaltar que, apesar de não fazer parte do escopo deste artigo, as simulações feitas pelo Algoritmo Genético também levam em conta as avaliações de custo/benefício de cada

uma das alternativas apresentadas na Tabela 2. Portanto, esta foi a razão pela qual o trecho da Região 1 com furto de neutro (trecho na cor cinza) não foi reconduzido.

Na Figura 4c são apresentados os resultados obtidos com as melhorias propostas na Região 2. Observa-se que as soluções propostas melhoraram significativamente os níveis de tensão neutro-terra nas Regiões 1 e 2, mantendo grande parte daquela área com tensões neutro-terra abaixo de 5 V. É importante salientar que após várias simulações computacionais, concluiu-se que os melhores resultados são obtidos quando se segmenta a rede (em função do tempo de processamento computacional), e as soluções regionais devem se iniciar do ponto mais a jusante da subestação, indo em direção à mesma. As próprias soluções propostas nos pontos mais distantes irão melhorando o desempenho dos pontos mais próximos à subestação.

A Figura 5c representa a situação operacional do alimentador RGR-104 após todas as intervenções realizadas na rede. Nota-se que além das melhorias técnicas obtidas no trecho próximo à SE (onde foi sugerida a instalação de condutores bimetálicos 7N7 53%), houve redução das tensões neutro-terra em outros pontos ao longo da rede, sendo que em todo o alimentador as tensões neutro terra ficaram dentro do limite de 10 V (Eletropaulo, 1993).

Comparando-se as Figuras 5c e 3, observa-se claramente que a solução proposta pelo Algoritmo Genético melhorou significativamente o perfil de tensão neutro-terra do alimentador RGR-104. Neste caso, cabe salientar que, além da diminuição dos níveis de tensão neutro-terra, amenizando-se possíveis riscos de eletroplessão (o neutro é comum entre as redes MT e BT), houve uma importante redução nas perdas técnicas (cerca de 2,5%) em comparação com a condição real de operação (Figura 3).

3. Conclusões

Este artigo avaliou o impacto da falta de condutores neutro em determinados trechos no desempenho de redes de distribuição de média tensão e propôs soluções técnicas para mitigar os danos causados pela operação da rede na ausência de neutro e melhorar as condições de segurança do alimentador em condições normais de operação, ou seja, nas análises não foi considerada a operação do sistema para condições de defeito (curto-circuito). As simulações foram realizadas no alimentador RGR-104 (Rio Grande da Serra) devido à alta incidência e furto de condutores neutro e os resultados estão sendo empregados em campo. Baseado em medições de campo, a resistividade do solo ao longo da região de atuação do alimentador e as resistências de terra nos pontos de aterramento da rede, foram consideradas como sendo iguais a, respectivamente, 300 ohms.m e 50 ohms.

Para avaliar o desempenho do alimentador levando em conta os trechos de rede com furto de neutro, uma nova metodologia de fluxo de potência baseada no método de Eliminação de Gauss foi desenvolvida e implementada no *software* Interplan. Os resultados das simulações mostram que a ausência de condutores neutro ao longo do alimentador aumenta consideravelmente os níveis de tensão neutro-terra, diminuindo a segurança da rede.

Para melhorar as condições operacionais e de segurança da rede, desenvolveu-se um Algoritmo Genético capaz de indicar soluções adequadas (entre elas alterações nos sistemas de aterramento e substituição e/ou instalação de condutores) capazes de manter o sistema operacional dentro de níveis técnicos e de segurança satisfatórios. Outras soluções alternativas para melhoria dos sistemas de aterramento (e conseqüente redução dos valores de resistência de terra) foram propostas em (ANTUNES & MÉFFE & TAKAHATA & ROMERO & NANNI & LANGE, 2010), (BEZERRA & KANASHIRO, 2010), (FAGAN & LEE, 1970), (SILVA FILHO, 2006) e (SOUZA & MOURA & CINTRA, 2007).

Como uma alternativa para eliminar os frequentes furtos de condutores neutro de alumínio em determinadas regiões do alimentador, condutores bimetálicos devidamente especificados foram utilizados nestes trechos

com alta incidência de furtos.

De acordo com os resultados apresentados na Figura 2 (condição de referência), o desequilíbrio provocado pelos transformadores com ligação delta ao longo da rede causa o aumento dos níveis de tensões neutro-terra, resultando, em alguns casos, em valores de tensões V_{nt} muito superiores ao limite estipulado em (AES Eletropaulo, 1993) para as condições normais de operação do alimentador. Cabe salientar que os níveis de tensão neutro-terra estão diretamente relacionados a diversos fatores, dentre eles, destacam-se a resistividade do solo e resistência de terra (que neste artigo, foram consideradas ao longo da rede, como sendo iguais a 300 ohms.m e 50 ohms.m, respectivamente).

Além disso, cabe ressaltar que outras soluções podem ser utilizadas nos casos em que os níveis de tensão V_{nt} ultrapassam os valores críticos. Dentre elas, destaca-se:

- mudança nos tipos de condutores de neutro;
- equilíbrio de carga na rede de distribuição de MT;
- conversão gradual dos transformadores em ligação delta para estrela.

Adicionalmente, medidas preventivas podem ser tomadas, tal como o uso de sistemas DAT (rede de distribuição transversal) nas regiões com maiores incidências de furto de condutores neutro.

Deve-se notar que os resultados apresentados neste artigo podem ser utilizados como referência para o planejamento de melhorias no desempenho de redes de distribuição. Contudo os resultados tendem a ser conservativos, pois, na prática, as influências dos aterramentos dos consumidores e dos alimentadores próximos ao de estudo e as variações na resistência de terra e resistividade do solo devem ser levadas em conta.

4. Referências bibliográficas

AES Eletropaulo. ID-5.50: Linha terra. Norma Técnica. São Paulo, 1993.

Antunes, A. U.; Méffe, A.; Takahata, D.; Romero, F.; Nanni, M.; Lange, F. L. Especificação de modelo de indicação de aterramentos alternativos e análise técnico-econômica de alternativas para minimização dos problemas decorrentes do furto do neutro. Relatório Técnico. São Paulo, 2010.

Bezerra, S. R. C.; Kanashiro, A. G. Sistema de aterramento elétrico com hastes envolvidas em concreto. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2010.

Fagan, E. J.; Lee, R. H. The use of concrete-enclosed reinforcing rods as grounding electrodes. IEEE Trans. on Industry and Gen. Applications, 1970.

Oliveira, C. C. B.; Kagan, N.; Guaraldo, J. C.; El Hage, F. S.; Méffe, A.; Miguel Filho, M. INTERPLAN – A tool for planning high, medium and low voltage networks. IEEE Trans. and Dist. Conf., 2004.

Silva Filho, F. G. Electric power supply distribution network through DAT (transversal distribution network) system. Comisión de Integración Energética Regional, 2006.

Souza, K. T.; Moura, R. F.; Cintra, G. Estudo de alternativas para a construção de malhas de aterramento num solo com alta resistividade elétrica. II Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica, 2007.

Zipse, D. W. The hazardous multigrounded neutral distribution system and dangerous stray currents. IEEE Petroleum and Chemical Ind. Conf., 2003.
