



ESTUDO DE CASO REAL: ANÁLISE DE QUALIDADE DE ENERGIA DE UM ALIMENTADOR DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO

Gustavo de Oliveira Bernardes de Souza*¹, Ivan Nunes Santos

FEELT – Universidade Federal de Uberlândia

Resumo - O presente trabalho aborda e analisa de forma prática alguns distúrbios de qualidade de energia em um determinado alimentador da rede de distribuição de energia. Tal estudo é realizado em um alimentador real encontrado na região sudeste do Brasil. Dentre os diversos distúrbios de qualidade da energia elétrica, foram selecionados os indicadores de flutuação de tensão, desequilíbrio e variações de tensão de longa duração para fins deste estudo de caso.

Palavras-Chave - flutuação de tensão, desequilíbrio de tensão, variação de tensão de longa duração, rede elétrica de distribuição.

ANALYSIS OF ENERGY QUALITY OF A DISTRIBUTION NETWORK FEEDER

Abstract - The present work approaches and analyzes in a practical way some disturbances of energy quality in a given power supply of the power distribution network. This study is carried out in a real feeder found in the southeastern region of Brazil. Among the various electrical power quality disturbances, voltage fluctuation, unbalance and long-term voltage variations were selected for the purposes of this case study.

Keywords - Voltage fluctuation, Voltage unbalance, Long-term voltage variations, distribution network.

I. INTRODUÇÃO

A sociedade atual e seu desenvolvimento são extremamente dependentes do fornecimento de energia e sua qualidade. A implantação de um sistema de distribuição de energia elétrica acarreta inevitavelmente em um maior conforto doméstico e aumenta a possibilidade da instauração de novos polos comerciais e industriais.

O debate a respeito da qualidade de energia é natural uma vez que a mesma é comercializada em larga escala. Consequentemente, existe uma cobrança quanto a garantia de um fornecimento razoável. Salienta-se que a energia com distúrbios pode prejudicar processos produtivos e, em casos

severos, interromper o fornecimento de energia para grandes regiões.

As cargas não-lineares de natureza eletrônica cresceram exponencialmente a partir da década de 70, tais como: micro-ondas, computadores, televisões, aparelhos de som e outros. As mesmas são grandes causadoras de distúrbios e também as que mais sofrem pelos seus efeitos [1].

Para um sistema elétrico trifásico, as tensões deveriam ser, em tese, equilibradas, possuir amplitude e frequência constantes, forma perfeitamente senoidal e continuamente oferecida no ponto de entrega. Entretanto, tais condições são raramente alcançadas, e, conseqüentemente, é comum a verificação de distúrbios na qualidade da energia, tais como: transitórios; variações de tensão de curta duração (VTCD); variações de tensão de longa duração (VTLD); distorções da forma de onda; flutuações de tensão; desequilíbrio de tensão e outros [2]. Tais distúrbios, devido suas particularidades, estão cada vez mais presentes nas redes de distribuição de energia. Neste contexto, encontra-se aqui apresentado um estudo de caso real encontrado na rede de distribuição brasileira.

II. DISTÚRBIOS ABORDADOS NESTE ESTUDO DE CASO

A. Desequilíbrio de tensão

De acordo com os procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional (PRODIST), tem-se a definição: “O desequilíbrio de tensão é o fenômeno caracterizado por qualquer diferença verificada nas amplitudes entre as três tensões de fase de um determinado sistema trifásico, e/ou na defasagem elétrica de 120° entre as tensões de fase do mesmo sistema.” [3].

O fator de desequilíbrio é definido pela norma como sendo a razão entre os módulos da tensão de sequência negativa e positiva.

$$FD\% = \frac{V_-}{V_+} 100\% \quad (1)$$

Onde:

V_- - Módulo da tensão de sequência negativa.

V_+ - Módulo da tensão de sequência positiva.

FD% - fator de desequilíbrio.

Porém, devido a limitação da maioria dos equipamentos de medição quanto a aquisição do ângulo das tensões, também é possível utilizar a seguinte expressão:

* gustavo.280913@gmail.com

$$FD\% = 100 \sqrt{\frac{1-\sqrt{3-6\beta}}{1+\sqrt{3-6\beta}}} \quad (2)$$

Sendo:

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2} \quad (3)$$

Sendo:

V_{ab}, V_{bc}, V_{ca} – Módulo das tensões de linha.

A norma ainda estabelece que o valor do fator de desequilíbrio deve ser menor ou igual a 2% para barramentos cuja tensão nominal esteja entre 1kV e 230kV.

As consequências da alimentação trifásica desbalanceada se manifestam como a degradação da potência útil disponibilizada principalmente em processos de conversão eletromecânica de energia, afetando seu desempenho operacional com a redução da eficiência, aumento indevido de temperatura, queima de equipamentos, aumento na geração de harmônicos por inversores e operação inadequada de equipamentos em geral [4].

O maior causador desse distúrbio é a má distribuição das cargas por fase.

B. Flutuação de tensão

De acordo com o PRODIST, tem-se a definição: “A flutuação de tensão é um fenômeno caracterizado pela variação aleatória, repetitiva ou esporádica do valor eficaz ou de pico da tensão instantânea.”.

Tal distúrbio está fortemente vinculado com as variações rápidas e bruscas das componentes ativas e reativas de potência, tensões inter-harmônicas, entrada de bancos de capacitores, baixo nível de curto circuito e outros.

A flutuação de tensão pode ocasionar a geração de harmônicos não característicos em inversores de frequência, oscilações eletromecânicas em máquinas rotativas e perda de eficiência em equipamentos em geral. Além disso, pode causar o efeito da cintilação luminosa (flicker), o mesmo possui alto grau de complexidade uma vez que se relaciona com a perspectiva da visão humana e seus efeitos como dor de cabeça, cansaço visual, estresse mental e perda de concentração [5].

C. Variação de tensão de longa duração

O PRODIST estabelece limites adequados, precários e críticos para os níveis de tensão em regime permanente. Tais níveis de tensão são mostrados na Tabela I.

TABELA I. FAIXAS DE TENSÃO PARA BARRAMENTOS DE MÉDIA TENSÃO SEGUNDO O PRODIST

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência (TR)
Adequada	$0,93TR \leq TL \leq 1,05TR$
Precária	$0,9TR \leq TL < 0,93TR$
Crítica	$TL < 0,9TR$ ou $TL > 1,05TR$

A norma estabelece que a medição deverá ser realizada de tal forma que se estabeleça um conjunto que contenha 1008 leituras válidas obtidas em intervalos consecutivos de 10 minutos, totalizando uma semana de medição.

Os indicadores são:

$$DRP\% = \frac{nlp}{1008} 100\% \quad (4)$$

$$DRC\% = \frac{nlc}{1008} 100\% \quad (5)$$

Onde:

DRP – duração relativa da transgressão para tensão precária.

DRC – duração relativa da transgressão para tensão crítica.

nlc e nlp – representam o maior valor entre as fases do número de leituras situadas nas faixas precárias e críticas respectivamente.

A norma define que o valor limite para o DRC é de 0,5%, enquanto para o DRP é de 3%.

Tais fenômenos têm como principal consequência a queima e mal funcionamento de equipamentos além de maior drenagem de corrente para cargas de potência constante.

III. ESTUDO DE CASO REAL: MEDIÇÕES REALIZADAS

As medições foram realizadas em um ponto de média tensão do sistema de distribuição de uma concessionária de energia elétrica.

As Figuras 1 e 2 foram obtidas utilizando o software Sistema de Gestão da Distribuição de Energia (G-DIS). A Figura 1 indica que a corrente de curto circuito no ponto analisado é de 311A e a Figura 2 mostra que a distância do ponto de medição até a subestação é de aproximadamente 45km.

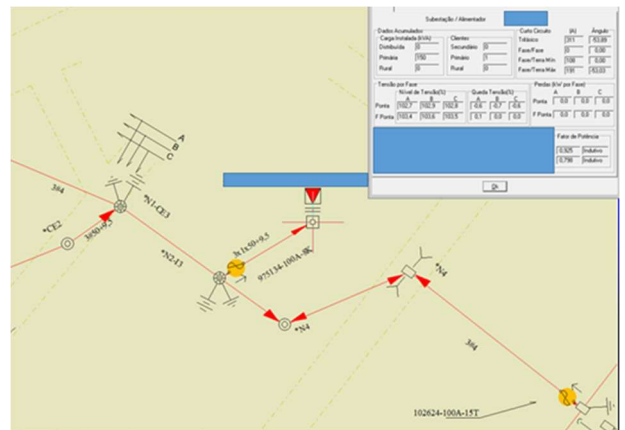


Fig. 1. Ponto de medição

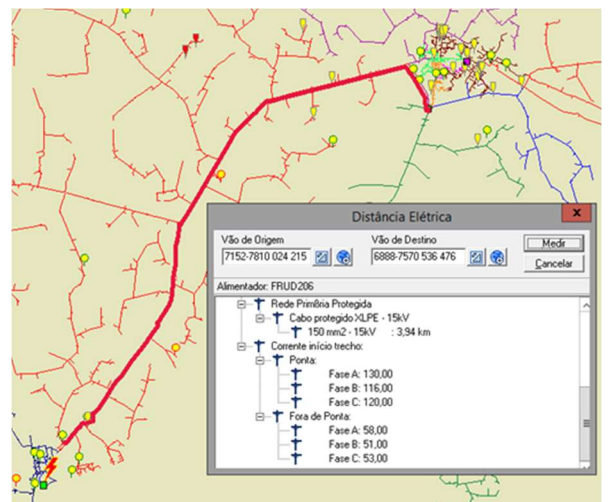


Fig. 2. Caminho da subestação até o ponto de medição.

A medição foi realizada utilizando um *IMS PowerNET P-600 G4* fornecida em forma de tabela e, após a transformação em por unidade, foi resumida nos seguintes gráficos.

A medição foi realizada durante nove dias, totalizando 188 horas. Tem-se nos gráficos apresentados nas Figuras 3 à 11 as medições de tensão ora avaliadas. As mesmas são representativas de medições trifásica (fase-neutro), com valores em pu e estão subdivididas em intervalos diários.

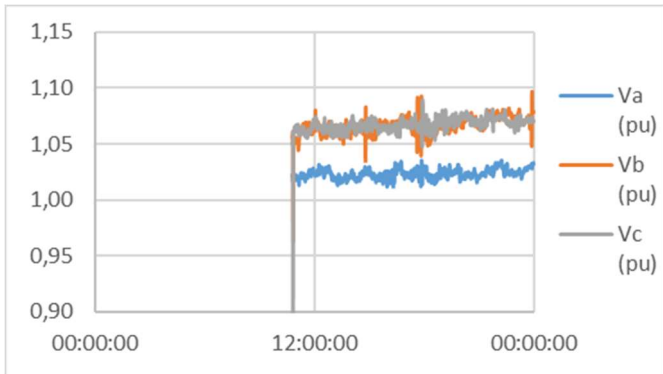


Fig. 3. Medições de tensão do primeiro dia.

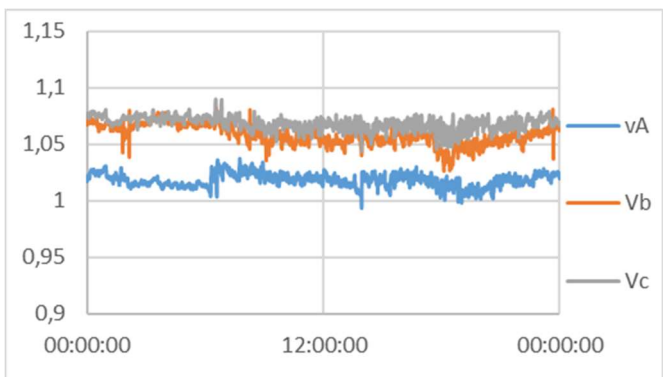


Fig. 4. Medições de tensão do segundo dia.

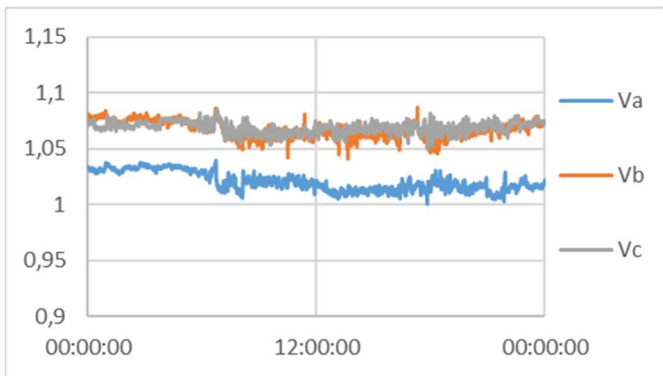


Fig. 5. Medições de tensão do terceiro dia.

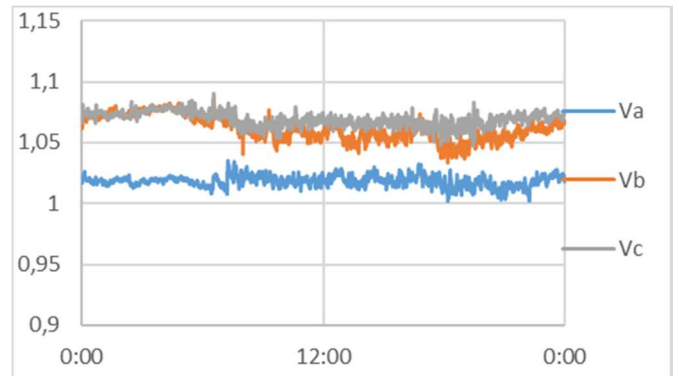


Fig. 6. Medições de tensão do quarto dia.

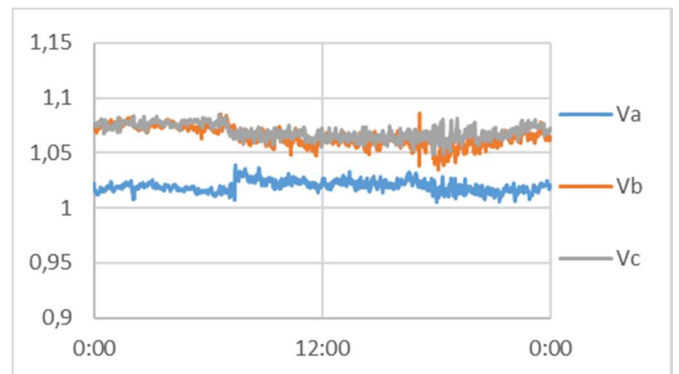


Fig. 7. Medições de tensão do quinto dia.

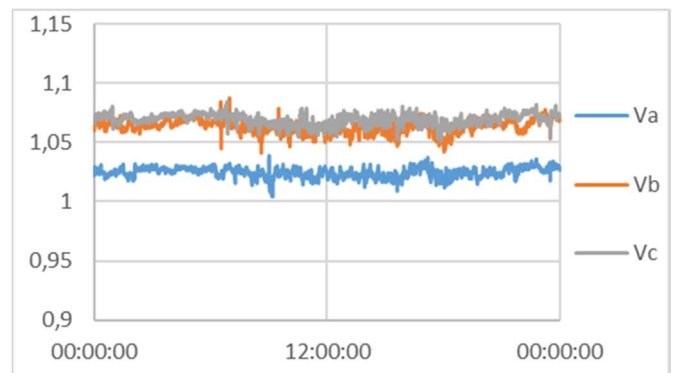


Fig. 8. Medições de tensão do sexto dia.

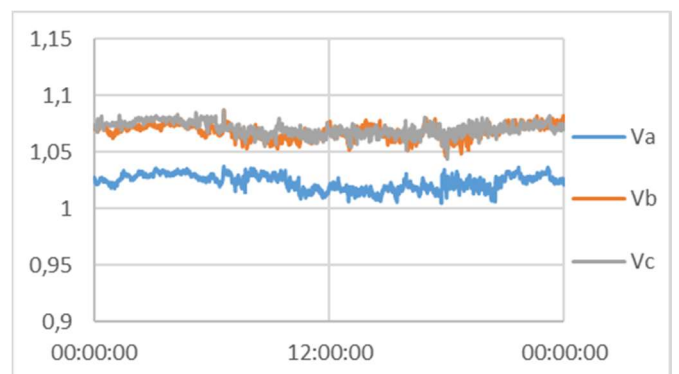


Fig. 9. Medições de tensão do sétimo dia.

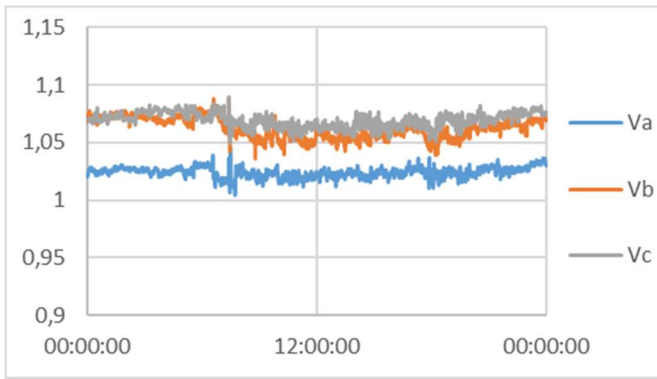


Fig. 10. Medições de tensão do oitavo dia.

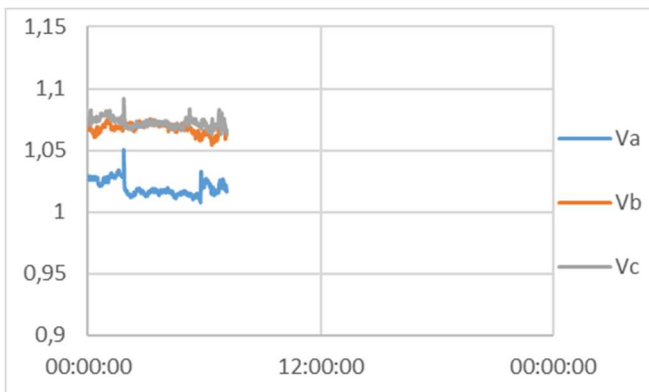


Fig. 11. Medições de tensão do nono dia.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A. Desequilíbrio de tensões

A partir da manipulação dos dados no Excel foi possível obter o desequilíbrio instantâneo de tensão, que pode ser visto na Figura 12.

Percebe-se pela Figura 2 que se trata de um alimentador longo com grande parte na zona rural. Conseqüentemente, o tronco principal do alimentador possui muitas ramificações que alimentam transformadores monofásicos e, devido à incerteza quanto à posição das fases e a intermitência das cargas, podem haver discrepâncias em relação ao planejado para o equilíbrio na região. A melhor solução para o problema é um levantamento de dados em campo em relação a distribuição dos ramais entre as fases.

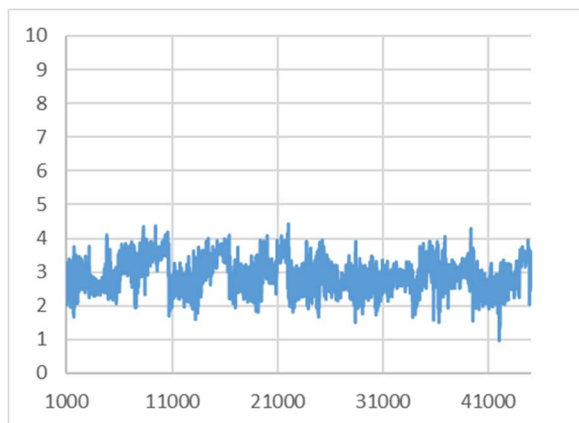


Fig. 12. Gráfico de FD% no período amostrado em função da numeração da amostra

Vale ressaltar que as primeiras 1000 amostras, deste processo de medição, foram excluídas devido à existência de um transitório provocado por uma falta fase-terra, conforme pode ser observado na Figura 3.

Ainda neste gráfico da figura anterior, pode-se observar que o desequilíbrio instantâneo. Ao longo do período medido manteve-se, via de regra, com valor superior ao limite estabelecido no PRODIST, qual seja, 2%. Neste tocante, não foi calculado o percentil 95%, porém é visível que o sistema está em situação inadequada neste critério avaliativo.

B. Variação de tensão de longa duração

A partir das Figuras 3 a 11 é possível notar que os valores de tensão estão, principalmente nas fases b e c, acima do nível permitido pelo PRODIST, conforme apresentado na Tabela I.

Os dados foram divididos em intervalos de dez minutos, em consonância com a resolução, e, após a estratificação dos resultados conforme os limites estabelecidos pela norma, foi visto que todos os 1008 valores estavam na faixa de tensão crítica superior. Logo, os indicadores apresentados nas equações 4 e 5 foram calculados e encontram-se abaixo destacados.

$$DRP\% = 0\% \quad (6)$$

$$DRC\% = 100\% \quad (7)$$

Ademais, de acordo com a norma, houve a devida agregação de fases para a obtenção de tais valores. Neste resultado, salienta-se que todos DRC ocorreram em virtude de sobretensões em pelo menos uma das fases deste sistema.

Complementarmente, a Figura 13 foi obtida utilizando o software CYME e representa o caminho da subestação até o ponto de medição. Os círculos azuis representam os reguladores de tensão e os amarelos, os bancos de capacitores.

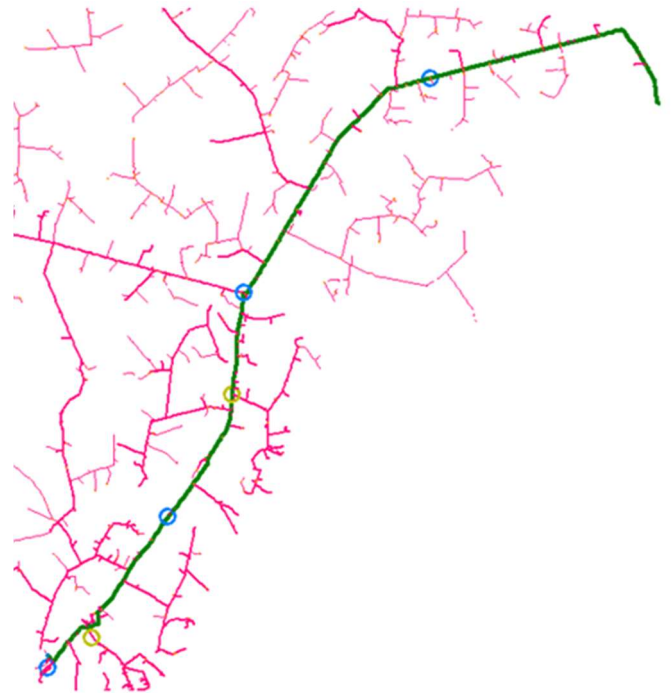


Fig. 13. Caminho da subestação até o ponto de medição

O distúrbio da elevação do nível de tensão pode ser causado pelo fato de possuir três bancos de reguladores e dois bancos de capacitores a montante. Quanto maior a linha, mais complexo é o controle de tensão. Para casos como esse deve-se levar em consideração alterar a posição do banco regulador.

C. Flutuação de tensão

Apesar de não ter sido calculado neste trabalho os valores de Pst e Plt (indicadores de flicker), é notória a existência de flutuações de tensão neste sistema de distribuição.

A possível causa desse distúrbio é o baixo nível de curto circuito do ponto de medição, conforme mostrado na Figura 1. O nível de curto circuito no local é de 311A, o que representa na média tensão 7,434MVA.

Os condutores utilizados na distribuição possuem altos valores de resistência e, com a distância elevada, oferecem um caminho com impedância considerável. Consequentemente, o barramento no ponto de medição torna-se sensível às variações de carga.

A Figura 14 apresenta outra rede disponível no local que pertence a uma subestação mais próxima, e conseqüente maior nível de curto.

O nível de curto de 849A representa na média tensão 20,293MVA, o que representa um aumento de 273% no valor atual.

Para realização da obra seria necessária a construção de poucos metros de linha, abertura de uma chave e, talvez, reconduzimento de um pequeno trecho da rede, dependendo da queda de tensão.

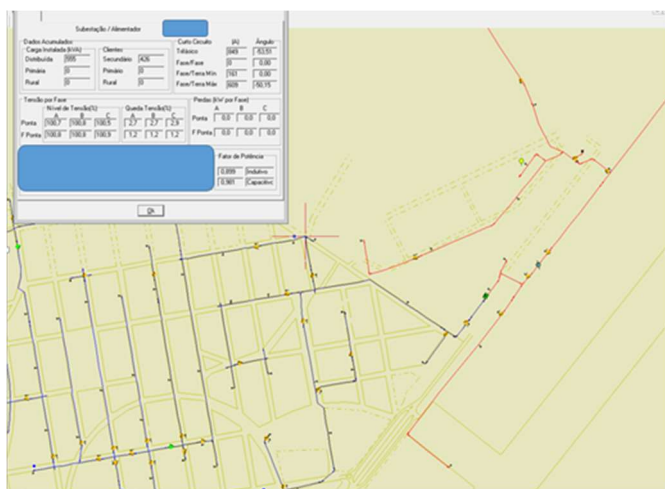


Fig. 14. Rede da subestação mais próxima do ponto de medição.

V. CONCLUSÕES

Tem-se neste trabalho um estudo de caso real com respectiva análise de dados de medições tendo em vista os principais indicadores de qualidade da energia pertinentes ao mesmo. Os distúrbios elencados se mostram dominantes neste alimentador, fazendo com que o presente trabalho tenha aplicabilidade prática, podendo auxiliar na escolha do melhor processo de mitigação destes eventos neste sistema e também em arranjo elétricos similares.

Ressalta-se que o caso apresentado não requer altos investimentos em obras de adequação da qualidade da energia.

Todavia, estudos complementares se mostram necessários para a segura definição da melhor solução a ser adotada, atendendo-se assim as exigências impostas pelo PRODIST e evitando-se eventuais penalidades.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à Faculdade de Engenharia Elétrica (FEELT) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e ao apoio dos engenheiros Blunio, Diego, Elpenor, Geová e Wanderlei para com este trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] MARTINS, J. S.; COUTO, C.; AFONSO, J. L. Qualidade de energia eléctrica. In: GOMES, J.; PELEMBE, L. **Engenharia e Inovação para o Desenvolvimento** : atas do Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia (CLME'03), vol. 3, p.219-231, Maputo, 2003.
- [2] MELO, M. O. B. C.; CAVALCANTI, G. A. Avaliação do impacto da qualidade de energia elétrica no mercado e na produção industrial análise e metodologia. V Seminário Brasileiro sobre qualidade da Energia Elétrica - SBQEE, p.477-482, Agosto de 2003.
- [3] ANEEL. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico Nacional – PRODIST**, 2018. Disponíveis em <<http://www.aneel.gov.br/modulo-8>>, Acesso em 25 de Julho de 2018.
- [4] TEODORO, R. G. **Metodologia para compensação de desequilíbrio em redes elétricas**. 2005, 84f. Dissertação (Dissertação em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Júlio de Mesquita Filho. Ilha Solteira, 2005.
- [5] COLNAGO, G.; MACEDO JR, J. R.; VIEIRA, J. L. F. Análise dos efeitos da flutuação de tensão sobre lâmpadas por medição luminosa direta. **Research Gate**, 2014, Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Jose_Vieira7/publication/262933466_Analise_dos_Efeitos_da_Flutuacao_de_Tensao_sobre_Lampadas_por_Medicao_Luminosa_Direta/links/02e7e5395bc7d372df00000/Analise-dos-Efeitos-da-Flutuacao-de-Tensao-sobre-Lampadas-por-Medicao-Luminosa-Direta.pdf>, Acesso em 25 de Julho de 2018.