

Modelagem de Alimentador e Suprimento de Reativo na B.T. em Ambiente Simulink[®]

G.M.F.Ferraz; M.L.B. Martinez; P.F.Ribeiro

Resumo—Através de uma série de curvas de demanda aferidas para transformadores de distribuição, da implementação da estrutura física de um alimentador típico, da alocação de cargas e do cálculo dos elementos da rede, foi possível simular o comportamento dinâmico da tensão de fornecimento para com os consumidores e as características elétricas – tensão, corrente, potência ativa e reativa – do ramo principal do alimentador. Por fim, avaliou-se tecnicamente a implementação de compensação de reativo na baixa tensão.

Palavras-Chave – alimentador, consumidor, MatLab[®], potência ativa, potência reativo, rede de distribuição, Simulink[®], tensão.

I. INTRODUÇÃO

O ambiente de simulação reflete os anseios e tentativas de implementação física do programador. Todavia, este pode incorrer em erros grosseiros de premissa na falta de ferramentas e dados típicos para a modelagem. Deste modo, a parte inicial deste artigo trata sobre a modelagem de um alimentador, dado que este é o passo inicial na criação de cenários para a implementação do sistema de suprimento de reativo. Além disso, tal modelagem pode ser convertida em ferramenta para análise de inserção fontes renováveis de energia - eólica e foto voltaica - chaves automáticas, sinalizadores de faltas, neutro ressonante entre outros.

Não obstante, faz parte do escopo deste artigo a simulação comparativa entre o alimentador típico e o mesmo com a implementação de um equipamento suprindo a potência reativa na rede de distribuição de baixa tensão – 220 [V]. Esta análise, contempla a potência reativa fornecida pelo alimentador, corrente de fase na alta tensão - 25 [kV] - e variação de tensão no alimentador e nos consumidores.

O primeiro passo desta análise consistiu em aglutinar informações suficientes sobre as demandas em diferentes tipos de transformadores de modo a melhor condicionar e definir os valores de potência ativa e reativa supridas pelo alimentador. Vale ressaltar que a modelagem do carregamento através do valor médio incorre em erros grosseiros como mostrado na Fig. 1, na qual, observa-se que as curvas de demanda por fase em um transformador com potência de 45 [kVA] é distinta em termos de carregamento e, portanto de valores médios [1].

Vale ressaltar que a demanda pode apresentar características próximas entre transformadores, mas nunca de forma idêntica – variando inclusive de dia a dia para o mesmo transformador. Portanto para este estudo foram sorteadas curvas de demanda, classificadas por potência, na proporção dos transformadores presentes no alimentador.

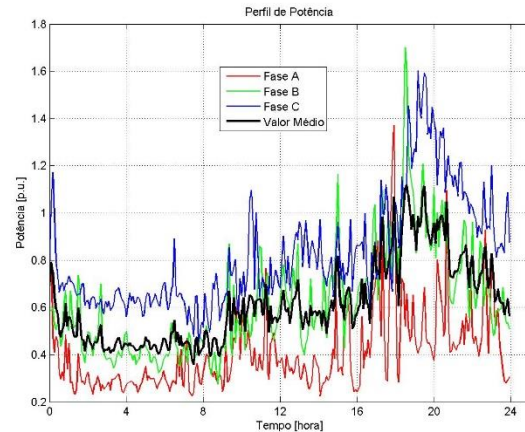


Fig. 1 – Perfil de demanda por fase em transformador de 45 kVA. Novamente, foi escolhido de forma aleatória, dentro de um banco de dados, os alimentadores modelados no projeto de P&D “Coordenação de Isolamentos em Redes de Média Tensão com Neutros Ressonantes” [2]. Aquele sorteado é denominado como Prefeitura, na cidade de Canoas, estado do Rio Grande do Sul, sob concessão da AES-SUL, visualizado na Fig. 2. Com auxílio do software Google Earth[®] esta imagem foi tratada e realizou-se as medições das distâncias dos trechos de linha em alta tensão e localização dos transformadores. Destaque em vermelho a subestação e o segmento de alta tensão da rede de distribuição.



Fig. 2 – Alocação da subestação e rede de distribuição do alimentador Prefeitura;

Com o processamento adequado através de software desenvolvido em ambiente MatLab[®], tornou-se possível a visualização e o dimensionamento em plano cartesiano, Fig. 3, informação de soma importância para determinação dos parâmetros de linha na simulação.

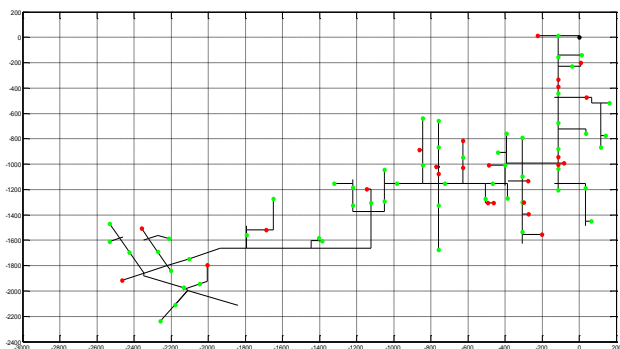


Fig.3 – Plano cartesiano do alimentador;

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A. Cálculo do condutor, resistência e indutância por km;

O método recomendado por este trabalho utiliza diferentes carregamentos e o conhecimento das potências dos transformadores sob análise atendendo os requisitos normativos [3]. No alimentador selecionado, tem-se 80 transformadores trifásicos, 25 [kV], com potências variando e 30 a 75 kVA, ligação DYn1 em uma rede aérea convencional, distribuídos na seguinte proporção:

- 30 kVA – 21 transformadores;
- 45 kVA – 32 transformadores;
- 75 kVA – 27 transformadores;

Deste modo, tem-se que a potência máxima nominal de transformação é 4.095 kVA. De acordo com o fator de diversidade [4] a Carga máxima diária esperada é de 1.310 kVA, resultando em uma corrente de aproximadamente 30 amperes. Na condição de operação máxima a corrente nominal seria de 95 amperes. Portanto o cabo escolhido é um CAA, cabo de alumínio com alma de aço, denominado *Swan*, área total de 24,71 mm², diâmetro nominal de 6,36 mm, resistência elétrica de 1,35545 Ohm/km, e capacidade de condução de corrente de 130 amperes.

Para o cálculo da indutância deve-se levar em consideração as características físicas acima, a disposição dos condutores, distância entre fases e para com o solo, seguindo detalhamento da Fig. 4, as recomendações [5] e os preceitos técnicos, descritos nas equações I a V. [6].

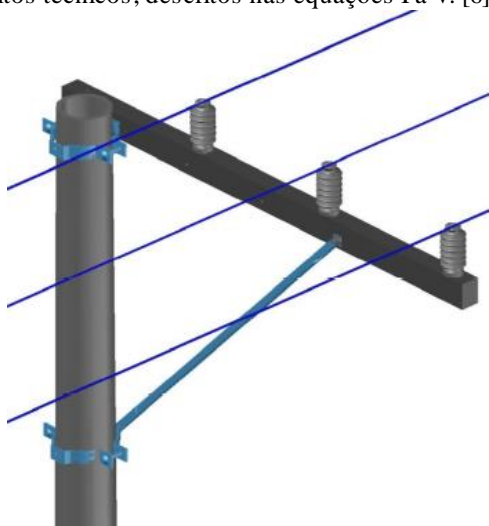


Figura 4 – Disposição dos Condutores em Rede Aérea Convencional;

Sendo assim, a distância entre fases é de 0,7 [m], distância para solo de 11 [m] e a indutância pode ser determinada pelas equações:

Eq. I

$$X_{l1} = w * (f_{aa} - f_{ab})$$

Eq. II

$$f_{aa} = 2 * 10^{-4} * \ln \frac{2 * h_m}{D_a}$$

Eq. III

$$f_{ab} = 2 * 10^{-4} * \ln \frac{2 * D_{mi}}{D_m}$$

Eq. IV

$$x_{l2} = 2 * 10^{-4} * w * \left(\ln \frac{2 * h_m}{D_i} - \ln \frac{D_m}{D_i} \right)$$

Eq. V

$$x_{l3} = 2 * 10^{-4} * w * \left(\ln \frac{D_m}{D_i} + \ln \frac{2 * h_m}{D_i} \right)$$

Onde:

D_m – Distância média geométrica entre condutores;

D_{mi} – Distância média geométrica entre condutores e as imagens de seus vizinhos;

h_m – Altura média geométrica entre condutores

D_i – Raio médio geométrico dos condutores

Assim o valor médio por fase é de 1,17 [mH/km]. Destaca-se que não há transposição de fases em redes de distribuição, todavia, como os valores calculados foram muito próximos e as derivações do alimentador podem selecionar fases distintas para a ser aquela central, tal aproximação, não deve afetar significativamente o resultado final.

B. Cálculo das perdas a vazio, corrente de excitação e impedâncias série;

A tabela 1 resume os valores utilizados para representação adequada dos transformadores na simulação, extraídos dos valores mais prováveis oriundos da avaliação estatística de um banco de dados com mais de 150 ensaios de rotina seguindo as recomendações técnicas, preceitos normativos e equacionamentos [7 a 13].

Tabela 1 – Parâmetros dos transformadores

Potência [kVA]	Perdas a Vazio [W]	Corrente de Excitação [%]	Resistência Série [p.u.]	Reatância série [p.u.]
30	145	1.80	0.020	0.04
45	205	2.50	0.020	0.04
75	270	0.95	0.017	0.04

C. Compensação de reativo

Os fenômenos de transmissão e transformação de energia elétrica em corrente alternada têm por aspecto inerente a defasagem entre as formas da tensão aplicada e da corrente fornecida aos circuitos elétricos. Isto por sua vez acaba por impor a conveniência de, na forma fasorial, representar o fenômeno por duas formas de potência. Uma, em fase com o eixo real cartesiano, denominada "potência ativa", modela o trabalho mecânico realizado e

a outra, em quadratura, "potência reativa" representa o resultado da defasagem observada entre tensão e corrente, que é associada aos fenômenos eletromagnéticos quando se trabalhar com excitações na forma senoidal. A composição fasorial destes duas componentes resulta no que se denomina "potência total ou aparente", expressa em volt-ampere (VA).

A relação em módulo entre a "potência ativa" e a "potência aparente" é denominada de "fator de potência". Deste modo, este índice indica qual porcentagem da potência total fornecida (potência aparente) é efetivamente utilizada para executar trabalho (potência ativa). Assim, o fator de potência é capaz de indicar o grau de eficiência no uso das redes e sistemas elétricos operando sob excitação senoidal. Valores elevados para o fator de potência (próximos de 1,0) indicam que a energia elétrica está sendo usada de forma mais eficiente.

O fator de potência é numericamente igual ao cosseno do ângulo ϕ formado entre a tensão e a corrente. Corrigir o fator de potência consiste em manter a potência ativa P constante e reduzir o valor do ângulo ϕ , através da redução da necessidade de potência reativa Q . Na prática isso é obtido através da inserção de capacitores em pontos da rede ou da sobreexcitação das máquinas síncronas, o que em qualquer destes casos implica em custos adicionais, que devem ser convenientemente avaliados.

As principais consequências de um baixo valor do fator de potência para uma instalação são:

- Incremento das perdas de energia;
- Flutuações de tensão, que podem ocasionar queima de aparelhos;
- Sobrecarga da instalação, danificando-a ou gerando desgaste prematuro;
- Aumento do desgaste nos dispositivos de proteção e manobra da instalação elétrica;
- Aumento do investimento em condutores e equipamentos elétricos sujeitos à limitação térmica de corrente;
- Saturação da capacidade das instalações e dos equipamentos, impedindo a conexão de novas cargas;
- Dificuldade de regulação do sistema.

As principais vantagens da correção do fator de potência para os consumidores são:

- Redução do custo de energia elétrica (não pagamento de multas e redução de perdas);
- Aumento da eficiência energética;
- Melhoria dos níveis de tensão;
- Aumento da capacidade dos equipamentos de manobra;
- Aumento da vida útil das instalações e equipamentos;
- Redução de perdas de energia e das quedas de tensão, através da redução da amplitude da corrente que circula pelas redes.

Já para a concessionária de energia elétrica as principais vantagens são:

- Redução do volume de reativo que circula nos sistemas de transmissão e distribuição;

- Redução das perdas de energia;
- Aumento na capacidade de transmissão de potência ativa dos sistemas de transmissão e distribuição;
- Aumento da disponibilidade de geração com intuito de atender mais consumidores;
- Diminuição dos custos de geração.

Um baixo valor do fator de potência em uma instalação implica em operar com maior amplitude de corrente em todo o sistema de alimentação, desde a rede da companhia concessionária até a parte interna da instalação, incluindo os equipamentos em uso.

Está previsto a cobrança de multas para consumidores cujas instalações elétricas possuam um baixo valor para o fator de potência e sejam classificadas como consumidor tipo A. O Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica [14], fixou o valor mínimo para o fator de potência em 0,92, tanto capacitivo como indutivo. Caso o fator de potência fique abaixo desse valor, a concessionária pode cobrar uma sobretaxa na conta de energia elétrica da empresa. Essa multa corresponde a quantidade de energia ativa que poderia estar sendo transportada no lugar da energia reativa.

Além disso, a compensação de energia reativa está se tornando essencial para cumprir os requisitos estabelecidos por norma ou procedimentos técnicos para conexão de geradores de energia renovável. Em muitos países define-se os requisitos técnicos e operacionais mínimos para a conexão da geração, estipulando estado estacionário e os requisitos de potência reativa dinâmica. Estes requisitos devem ser satisfeitos no ponto de conexão, como em um parque eólico, onde a compensação de energia reativa é muitas vezes necessária.

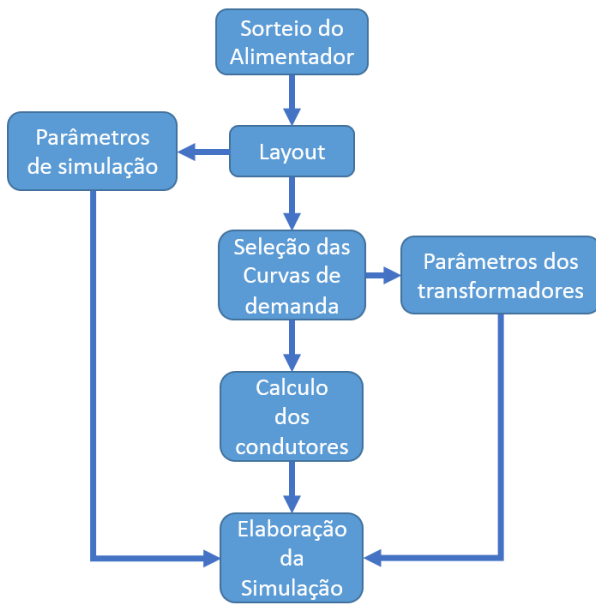
Os dispositivos de compensação de energia reativa *shunt* são comumente encontrados nos sistemas elétricos. Os capacitores fixos proporcionam uma reatância capacitiva à rede (em algumas aplicações, um indutor *shunt* é usado para obter uma reatância indutiva) equilibrando a geração e consumo das potências reativas.

III. METODOLOGIA

A. Fluxograma de simulação;

O fluxograma 1, resume a metodologia empregada na construção desta simulação. Destaque que as curvas de demanda, representavam um dia de medição, distribuído em 576 medidas, já a simulação contava com 12 segundos em passos fixos de 50 [us], gerando vetores com 240 mil pontos. Este fato permite avaliar transitórios elétricos e ao mesmo tempo ter uma representação da evolução diária do carregamento. Em outras palavras, a curva de demanda varia sobre passos de 20,8 [ms], enquanto os níveis de tensão e corrente em passos de 50 [us].

Fluxograma 1 – Mapeamento de simulação



B. Elaboração da simulação;

Com o auxílio do software MatLab® e a plataforma Simulink®, foi possível inserir os parâmetros do alimentador, das impedâncias série das linhas de distribuição, dos transformadores e das cargas – potência ativa e reativa consumidas. Entretanto, por limitações dos blocos de simulação, os valores de demanda inseridos foram extraídos da média entre as potências fornecidas por fase. Desse modo, perdeu-se a significância do desequilíbrio entre fases, fator de extrema relevância em algumas localidades. Destaca-se que durante a análise das curvas de carga em alguns transformadores constatou-se o subcarregamento de uma fase, ao longo do dia, enquanto outras passavam por períodos de operação em potência superior à nominal entre as 17 e 23 horas deste dia. Tal fato, eleva a temperatura do óleo refrigerante e reduz a vida útil esperada ao degradar os materiais isolantes da fase com sobrepotência.

C. Incrementos de Cargas

O presente estudo de carregamento evoluiu no sentido de incrementar cargas por passos pré-determinados validando as simulações e analisando este impacto nos perfis de tensão – no alimentador e em alguns consumidores, corrente, potência ativa e reativa fornecida pela subestação. Desta forma a Fig. 7 demonstra o perfil final do alimentador usado na simulação.

Vale ressaltar que cada bloco representativo de carga é modelado por um subsistema, este que por sua vez é composto de um transformador com potências entre 30 e 75 kVA, uma carga trifásica equilibrada e blocos contendo a variação das potências ativas e reativas consumidas.

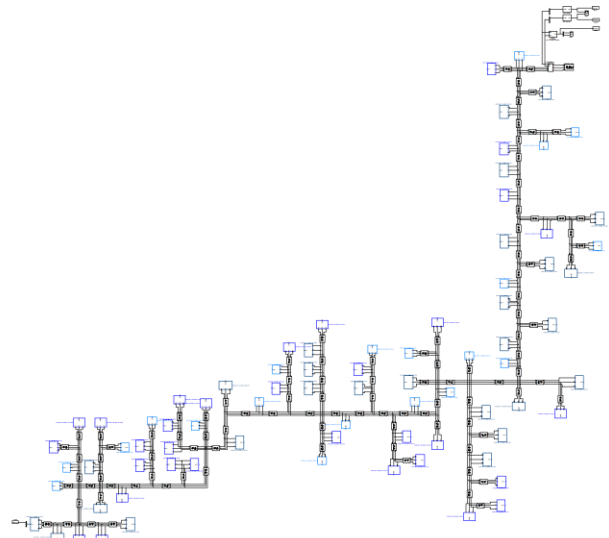


Figura 7 – Simulação do alimentador com 80 transformadores;

IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A. Comparativo do incremento de Cargas

A variação da corrente RMS na saída da subestação é dependente do carregamento, evidenciado pelo número de cargas e do período do dia. Deste modo, está destacado na Fig. 9 que quanto maior o número de cargas supridas pelo alimentador maior é a amplitude da corrente consumida e sua variação ao longo do dia. Além disso, é possível observar os picos de demanda pela manhã e ao final da noite.

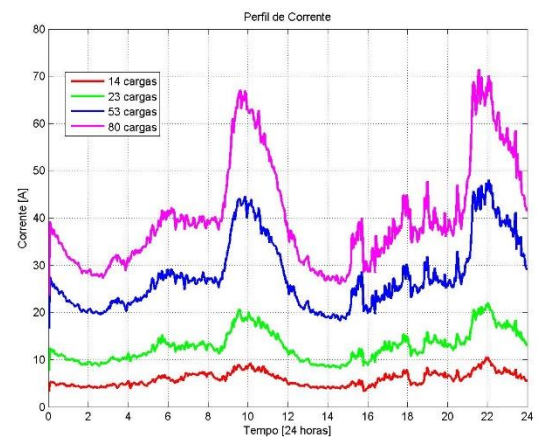


Figura 9 – Corrente RMS fornecida pelo alimentador;

Em sítio é possível observar a flutuação de tensão RMS, fase neutro em p.u., disponível na subestação. Desta forma quanto maior a corrente suprida maior é a queda de tensão, Fig. 10. Por fim a Fig. 11 demonstra a variação da potência ativa e reativa fornecida pela subestação ao longo do dia de acordo com o incremento de carga do alimentador.

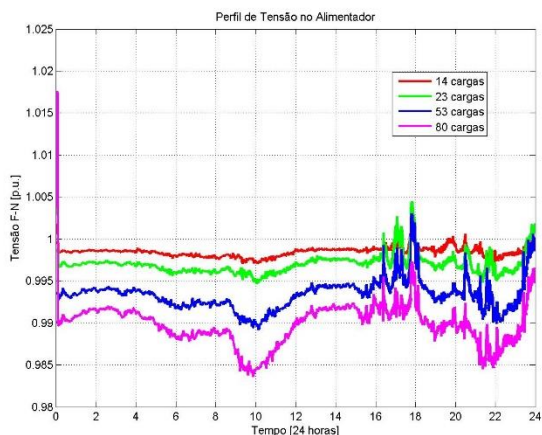


Figura 10 – Tensão RMS em p.u. no alimentador;

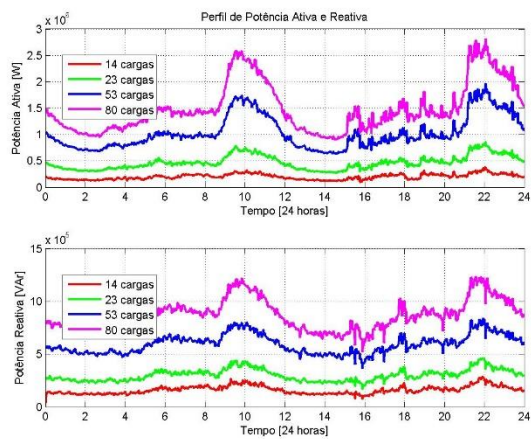


Figura 11 – Potência ativa e reativa no alimentador;

B. Suprimento de Reativo de Característica Indutiva na Baixa Tensão

A segunda parte deste trabalho consistiu na avaliação do suprimento de potência reativa diretamente nas redes de baixa tensão, ou seja, no secundário do transformador, no nível de 220 [V]. Deste modo, a geração de potência reativa está ao lado do principal centro de consumo. Esta metodologia e, correspondente equipamento de compensação, Compensador de Fator de Potência® - HVEX difere da tradicional que fornecer reativos, pois atua de forma local, provendo além da redução de perdas, um controle residual de tensão e de fator de potência que, de forma automática, é mantido próximo da unidade o que permite uma maior flexibilidade na conexão de micro geradores às redes de distribuição dentro do conceito de "smart grids".

Desta forma as figuras a seguir demonstram o comparativo antes da inserção de potência reativa – na cor azul – e depois da utilização desta técnica – na cor vermelha. A Fig. 13 retrata redução da amplitude de corrente no alimentador após a aplicação dos controladores e técnica.

Já a Fig. 14 retrata o fornecimento ao alimentador de potência ativa e reativa antes e depois do suprimento na carga. Notoriamente a curva de demanda de potência reativa reduz-se drasticamente, todavia, ela não é eliminada pela característica indutiva das linhas de distribuição aérea e dos transformadores. Por fim, apesar de quase

imperceptível, a curva de potência ativa com a compensação está inferior àquela denominada de real, este pequeno deslocamento representa 44 [MW/h] por ano-

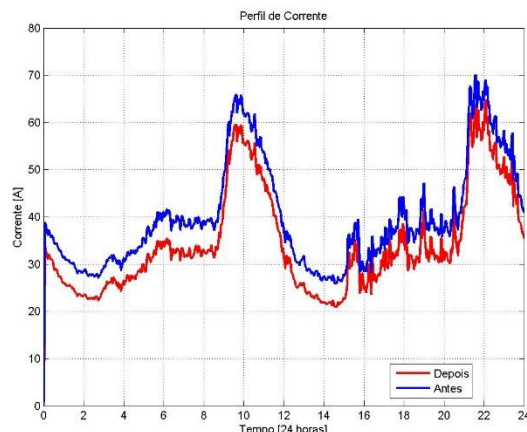


Figura 13 – Perfil de corrente fornecido pelo alimentador antes e depois da compensação de reativo;

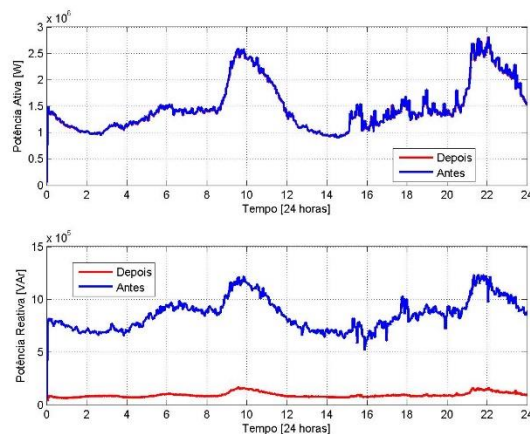


Figura 14 – Perfil de potência ativa e reativa fornecida pelo alimentador antes e depois da compensação de reativo;

Quanto aos perfis de tensão, o suprimento de reativo, reduz a flutuação observada nas curvas de cor azul da Fig. 15, destacando 4 perfis de tensões nos consumidores ao longo do alimentador com banco capacitivo implementado na baixa tensão, na cor vermelha.

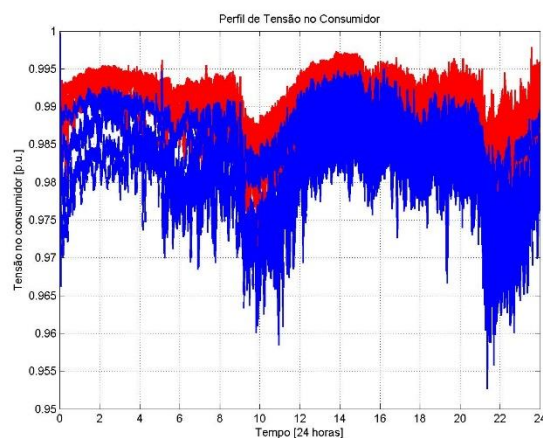


Figura 15 – Perfis de tensão de diferentes consumidores, antes e depois da compensação de reativo;

Como apresentada a técnica pressupõe a compensação de todos os transformadores da rede. Esta tem por benefí-

cio maximizar a redução das perdas técnicas em termos de transporte e transformação, bem como preparar o sistema para conexão de micro geração a qualquer um dos seus pontos de consumo. Por certo, pode não apresentar a maior potencialidade econômica, que deve ser balanceada pelos ganhos com redução de perdas e a não utilização de compensação de reativos nas redes de média tensão. O sistema e equipamento desenvolvido também permite realizar de forma eficiente o controle das perdas não técnicas uma vez que seus módulos de medição e controle totalizam a energia consumida.

Finalmente, o trabalho mostra uma aplicação do MATLAB® - SIMULINK® para a simulação do comportamento de alimentadores de média tensão, com ênfase ao desempenho diário sobre curvas de carga estatisticamente determinadas a partir de medições de campo. A aplicação conjunta de Técnicas de Monte Carlo pode permitir melhor definição do que se considera "perdas técnicas" e seus limites de confiança e deve ser objeto de futuras análises.

V. CONCLUSÃO

Variações de carga são comuns aos transformadores de distribuição, principalmente em regiões residenciais e comerciais, dado o comportamento dinâmico do consumo. Entretanto quando se analisa o fornecimento de potência ativa e reativa de um alimentador a diversidade é minimizada pela somatória das demandas.

Deste modo, o presente artigo realizou o tratamento das curvas de demanda para atribuição a um alimentador típico de acordo com o seu carregamento, modelado em ambiente SIMULINK®, considerando de forma paralela alguns os possíveis ganhos com a utilização de compensadores automáticos de fator de potência, em baixa tensão, Compensador de Fator de Potência® - HVEX, verificando-se, como esperado, a viabilidade técnica e as melhorias nas condições de suprimento.

Deve-se ainda ressaltar que o modelo e as ferramentas desenvolvida são de grande utilidade na implementação de simulações como a inserção de:

- Geradores eólicos;
- Plantas fotovoltaicas, com ou sem auxílio de banco de baterias;
- Religadores e chaves automáticas;
- UPS;

O desenvolvimento de desta ferramenta computacional permite a aplicação de técnicas de particionamento, em termos de carga, obtém-se: ganhos de velocidade computacional, bem como é possível aferir a sensibilidade da eficiência das implementações de *Smart Grids* a partir de novos desenvolvimentos e complementos no modelo.

VI. REFERÊNCIAS

[1] P&D “*Aplicação de Transformadores Eficientes nas Redes de Média Tensão*”, Grupo AES-SUL e Labo-

ratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá;

- [2] P&D “*Coordenação de Isolamentos em Redes de Média Tensão com Neutros Ressonantes*” Grupo AES-SUL e Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá;
- [3] NBR-5440 “*Transformadores para rede aéreas de distribuição – Padronização*” de 1999;
- [4] W. H. Kersting, “*Distribution System Modeling and Analysis*”, CRC Press LLC, 2002.
- [5] NTU AES - 001-5 “*Condutores Elétricos – Distribuição Aérea*”, Norma Técnica Unificada – AES Eletropaulo e AES Sul;
- [6] R.D. Fuchs, “*Transmissão de Energia Elétrica, Linhas Aéreas*”, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. Escola Federal de Engenharia de Itajubá;
- [7] Especificações técnicas AES SUL “*Transformadores de Distribuição para Redes Aéreas*”;
- [8] NBR 5440 – “*Transformadores para Redes Aéreas de Distribuição*” de 1999;
- [9] P. S. Georgilakis, *Spotlight on Modern Transformer Design*, Springer 2009, p. 33 -43.
- [10] W. Reis, “*Transformadores Fundamentos para Projeto e Cálculo*”, EDIPUCRS, 2007, p. 245 – 290.
- [11] A. Martignoni, *Transformadores*, Globo, p. 227 - 237.
- [12] IEEE C 57.91 – 1995 “*IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers*”, IEEE Power Engineering Society, S.A. 1957.
- [13] J.M.E. Vicente, - “*Uma contribuição à automação de ensaios em transformador de distribuição de média tensão*”, Dissertação de Doutorado, Programa de Pós- Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, 2006.
- [14] Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST “*Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica*”, Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, Rev. 5.

VII. BIOGRAFIA

Guilherme Martinez Figueiredo Ferraz: Iniciou a graduação em Economia pela UNICAMP em 2007. Em 2013 graduou-se em Engenharia Elétrica com ênfase em sistemas elétricos de potência pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) e em 2014 iniciou o mestrado na mesma instituição. Atuou em 2009 na área de gestão de qualidade com e no mesmo ano iniciou atividades como colaborador no Laboratório de Alta Tensão (LAT-EFEI). Em 2011 fundou a HVEX. Atuou em P&Ds com a AES-SUL, ENERGISA e CHESF.

Manuel Luís Barreira Martinez: possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá (1982), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá (1993), doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo (2000). Possui experiência no projeto e construção de equipamentos, componentes e sistemas de ensaios em Alta tensão. Atualmente é Professor Adjunto da Universidade Federal de Itajubá e Coordenador do Laboratório de Alta Tensão. É autor e coautor de ao redor de 250 artigos divididos entre seminários nacionais, internacionais e periódicos.

Paulo F. Ribeiro received a BS in Electrical Engineering from the Federal University of Pernambuco, Brazil, completed the Electric Power Systems Engineering Course with Power Technologies, Inc. (PTI), and received his Ph.D. from the University of Manchester, Manchester–England. Presently, he is a Professor of Electrical Engineering at Calvin College, Grand Rapids, Michigan. Dr. Ribeiro is a Fellow of the IEEE.