

ESTRATÉGIA FUZZY PARA CONTROLE DE TENSÃO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

DANILO H. SPATTI[†], IVAN N. SILVA[†], VINICIUS M. BENICHIO[‡], MARCOS E. G. ALVES[¶]

[†]*Laboratório de Automação Inteligente de Processos e Sistemas
Departamento de Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia de São Carlos, USP
Av. Trabalhador São-carlense, 400, CEP 13566-590, São Carlos – SP
E-mails: {spatti, insilva, wesleyfu}@sel.eesc.usp.br*

[‡]*ELEKTRO – Eletricidade e Serviços S/A
Rua Ary Antenor de Souza, 321, CEP 13053-024, Campinas – SP
E-mail: vinicius.benichio@elektro.com.br*

[¶]*TREETECH – Sistemas Digitais Ltda
Praça Claudino Alves, 141, CEP 12940-040, Atibaia – SP
E-mail: marcos.alves@treetech.com.br*

Abstract— This paper presents a fuzzy strategy for voltage control in power distribution systems. The fuzzy control will act in real time on the load tap changer of power transformers. The intelligent systems have been used to become the voltage regulator relays adaptive for dynamic behaviors of loads. The variables measurements and control will be performed only in the secondary bus of the substation. Fuzzy systems are able to treat uncertain data and qualitative information, allowing designing a voltage control that is according to the Brazilian standards. Simulation results using real data from substations are presented to validate the proposed approach.

Keywords— Voltage regulator relay, fuzzy systems, load tap changer, distribution systems

Resumo— Este trabalho apresenta uma estratégia *fuzzy* no controle de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica, o qual atuará em tempo-real nos transformadores de potência dotados de comutadores de tap sob carga. Os sistemas inteligentes foram empregados para tornar os relés reguladores de tensão adaptativos frente ao comportamento dinâmico das cargas. Busca-se atuar apenas na subestação de distribuição, realizando medições no barramento secundário e acionando medidas de controle também neste barramento. A capacidade dos sistemas *fuzzy* em tratar incertezas permite a criação de um sistema de controle de tensão que atende todas as regulamentações dos órgãos fiscalizadores brasileiros. Simulações com dados reais das subestações de distribuição comprovaram a eficiência da estratégia, pois os resultados obtidos foram bem satisfatórios.

Palavras-chave— Relé regulador de tensão, sistemas fuzzy, comutador de tap, sistemas de distribuição

1 Introdução

A energia elétrica é um produto indispensável para a manutenção das atividades da sociedade. A constante busca por uma melhor qualidade do produto apenas reforça este fato. Desde a reestruturação do setor elétrico, que instituiu a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), novas regulamentações foram elaboradas para a conformidade dos níveis de tensão entregues pelas empresas distribuidoras aos consumidores. Dentre estas regulamentações pode-se citar a Resolução ANEEL N° 505/2001 que estabelece os níveis de tensões considerados operativos e não operativos, bem como o tempo que as concessionárias de distribuição podem fornecer tensões em níveis não operativos. Para atender a referida regulamentação, o controle de tensão tem sido identificado como uma operação fundamental para a qualidade no fornecimento da energia elétrica. Tal controle é essencial, pois os equipamentos dos consumidores são projetados para operar em níveis regulados de tensão.

A aplicação crescente de técnicas de sistemas inteligentes agregadas às técnicas convencionais tem gerado resultados bastante eficientes e cada vez mais convincentes para o controle de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica, pois o objetivo de destaque da aplicação dessas técnicas consiste no alcance de tratabilidade, robustez, baixo custo e altas taxas de eficiência. Mais especificamente, a utilização de sistemas e controladores *fuzzy*, possui elevado potencial de aplicação em sistemas dedicados ao controle de tensão, pois as características mais atrativas desses sistemas consistem na sua elevada habilidade de resolver problemas não-lineares e tratar as eventuais incertezas associadas ao processo.

Levando-se em consideração todos os aspectos envolvidos com a conformidade dos níveis de tensões estabelecidos na Resolução ANEEL n° 505, este trabalho tem como objetivo propor uma estratégia de controle de tensão que contemple:

1. Atuar de forma automática apenas no transformador da subestação de distribuição equipado com comutador de tap sob carga.
2. Racionalizar o número de comutações do tap do transformador.

3. Melhorar o perfil de tensão para consumidores de média tensão.

Os principais problemas relatados pelos consumidores são níveis de tensão abaixo do valor nominal, comprometendo assim a qualidade no fornecimento de energia elétrica. A queda de tensão que ocorre ao longo do alimentador de distribuição acaba por submeter os consumidores a níveis de tensão fora do padrão de operação considerado adequado, conforme observado na Resolução nº 505 da ANEEL. A maioria das técnicas de regulação de tensão fundamenta-se na compensação por queda de tensão na linha, cujo objetivo é manter constante a tensão no consumidor (Choi et. al, 2001).

Sem a utilização dessa compensação, ao final do alimentador, haverá uma variação de tensão que dependerá da impedância da linha para uma condição de carga pesada, e da variação da corrente de carga para uma condição de carga leve. De fato, observa-se em cargas consideradas pesadas, níveis de tensão abaixo da tensão de referência. Na carga leve, a situação se inverte, pois os consumidores passam a ser submetidos a tensões mais elevadas. No sistema elétrico brasileiro, trabalhar com tensões mais elevadas durante a carga pesada privilegia todos os comportamentos de carga e propicia inúmeros benefícios, pois se reduzem o carregamento dos condutores e conseqüentemente as perdas.

Em literatura da área é possível encontrar diversos pesquisadores buscando soluções para resolver este tipo de problema. Como exemplo de tais soluções, os objetivos da proposta apresentada em Choi (2001) consistem em minimizar o erro entre a tensão de referência e a tensão do consumidor final, reduzindo também a frequência de comutações do tap do transformador. Para tanto, foram empregados métodos convencionais de otimização, que forneceram resultados satisfatórios para a regulação de tensão. Entretanto, o número de comutações do tap foi relativamente maior.

Já em Hu (2003) uma proposta utilizando sistemas inteligentes foi estudada para determinar o despacho programado nas operações de chaveamento de capacitores e comutação de tap, levando-se em consideração a previsão de carga para o próximo dia. Foram utilizados algoritmos genéticos para particionar a curva de carga e encontrar o escalonamento ótimo entre os dispositivos de controle de tensão. Esta estratégia reduziu o número de operações de comutações de tap e banco de capacitores, além de melhorar o perfil de tensão e minimizar as perdas de potência.

A proposta de se investigar o controle de tensão e potência reativa em Liang (2003) é encontrar um despacho ótimo para o comutador de tap do transformador, bem como o estado dos capacitores instalados ao longo dos alimentadores e também no barramento secundário da subestação, observando-se algumas horas no futuro. Foi empregado um método de *Simulated Annealing* e sistemas *fuzzy*, o que gerou bons resultados de regulação de tensão.

Em Hsu (1998) foi empregada uma técnica híbrida, que utiliza uma rede neural e a técnica de programação dinâmica *fuzzy* para realizar um despacho programado para as 24 horas do dia seguinte. Trata-se de um sistema híbrido do tipo seqüencial, que realiza um despacho preliminar por meio das redes neurais e, em seguida, utiliza a programação dinâmica *fuzzy* para encontrar o despacho final. A técnica apresentou uma significativa melhora do perfil de tensão e do fator de potência, mas o número de comutações do tap foi relativamente maior se comparado ao método convencional.

Observa-se das técnicas envolvendo despacho programado que as mesmas só podem ser efetuadas em subestações cujo comportamento de carga seja periódico, o que não ocorre nas subestações de interesse deste trabalho.

Em Liu (2002) o problema do controle de tensão foi dividido em duas partes, utilizando programação dinâmica para resolver o problema da subestação e sistemas *fuzzy* para o lado dos alimentadores. A coordenação entre os dois subproblemas é realizada por algoritmos convencionais, que resultaram em diminuição das perdas de potência e considerável melhora no perfil de tensão.

Em Dixon (2001) é apresentada proposta que utiliza o comportamento da potência reativa para coordenar de forma automática a ação do comutador de tap, capacitores e reguladores de tensão instalados ao longo do alimentador. Esta estratégia melhorou o desempenho do sistema e conseqüentemente a qualidade na entrega de energia para o consumidor final, pois a corrente total foi reduzida.

Dentre todas as propostas investigadas, apenas aquela apresentada em Choi (2001) realiza medições e controle apenas no barramento secundário da subestação, sendo tal estratégia de atuação também assumida no trabalho aqui proposto. As demais apresentam estratégias eficientes, mas necessitam de elevado esforço computacional ou atuam por despacho programado, tornando muito difícil as suas aplicações em tempo real, sendo também este um dos objetivos principais de nossa estratégia. Além disso, todas elas possuem propósitos diferentes daqueles almejados aqui, pois são voltadas para controlar a tensão a mais próxima possível da tensão de referência, ignorando assim a ação de elevar a tensão acima da referência nos casos onde cargas pesadas são demandadas e de evitar comutações em situações de carga leve.

Uma ampla avaliação qualitativa de todas as estratégias estudadas mostrou que a maioria delas obteve sucesso na melhora do perfil de tensão mediante um número maior de comutações de tap. Isto se deve ao fato de que o relé convencional não realiza comutações para tensões que se encontram dentro da faixa de operação parametrizada pelo usuário. Assim, qualquer medida de controle que visa melhorar o perfil de tensão, dentro da chamada zona morta dos relés, irá resultar em um número maior de comutações de tap.

Esses estudos motivaram ainda mais a busca por uma ferramenta inteligente que possa utilizar de maneira mais eficiente as comutações do tap do transformador, melhorando o perfil de tensão, atuando-se para tanto apenas na subestação de distribuição.

2 Aspectos relacionados à estratégia inteligente

Há diversas formas de se regular a tensão em um sistema de distribuição de energia elétrica, sendo a principal a regulação da tensão no barramento secundário da subestação pela comutação de tap em transformador. A regulação de tensão ou o controle automático de tensão pela comutação de tap em transformadores de potência é comandado pelo relé regulador de tensão, atuando de forma a elevar ou abaixar a tensão, conforme necessário.

Os relés convencionais responsáveis pela regulação de tensão não são capazes de atuar corretamente sob algumas condições de comportamento do sistema, tais como manobras, variações atípicas de carga, dentre outras, pois apenas monitoram a tensão do barramento secundário. Devido às características não-lineares e dinâmicas do sistema elétrico, pode-se afirmar que esse problema é de difícil tratamento quando se utilizam técnicas convencionais, o que justifica o emprego de técnicas de inteligência computacional.

Neste trabalho foi desenvolvida uma estratégia inteligente para se controlar a tensão no transformador principal da subestação de distribuição. A estratégia proposta consiste em utilizar a lógica *fuzzy* para deixar a tensão de referência dinâmica aos relés reguladores de tensão, pois nos relés convencionais tal parâmetro é fixo e definido pelo usuário. Tornar a tensão de referência dinâmica e automática permite melhorar o perfil de tensão nas diferentes situações de operação levantadas anteriormente.

A modelagem de problemas de controle através de lógica *fuzzy* permite o tratamento de informações qualitativas, pois esta forma de estruturação do raciocínio é capaz de tomar decisões racionais mesmo estando em um ambiente de incertezas e imprecisões, onde dados desta natureza e até mesmo conflitantes são tratados Lee (1990). Tais situações têm sido extensivamente observadas no escopo das variáveis deste trabalho, pois tanto as cargas como os desvios de tensão (em relação à referência) são variáveis que possuem comportamentos não-lineares diversificados e incertos que são de difícil modelagem por técnicas convencionais de identificação de sistemas.

Assim, o controle *fuzzy* agregado ao relé regulador de tensão é apresentado na Fig. 1. A saída desse controle é um sinal de incremento ou decremento sobre a referência atual do relé regulador de tensão. Desta forma, a inserção desse módulo inteligente em um relé convencional torna dinâmico o seu ajuste de tensão de referência.

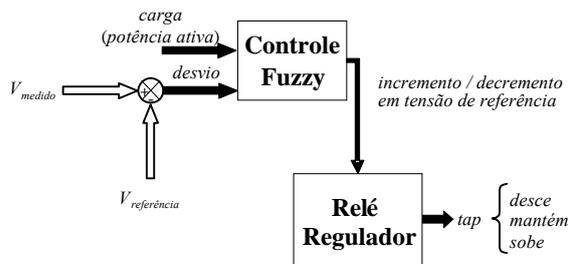


Figura 1. Diagrama simplificado do controle *fuzzy* proposto.

A primeira é representada pela potência ativa que foi normalizada para valores entre 0.5 e 1.5 por meio da Expressão (1).

$$\text{carga} = \frac{P_{medida}}{P_{normalização}} \quad (1)$$

A normalização é realizada sobre a medida instantânea de potência ativa (P_{medida}) por meio de um valor médio e um desvio padrão calculado através de análises fundamentadas em dados históricos, que produzem o quociente ($P_{normalização}$). Em alguns casos apenas a média aritmética não é o suficiente para representar corretamente o comportamento de carga.

Observou-se que em situações onde a subestação opera a maior parte do tempo em carga pesada, a média acabava por não representar corretamente esta situação.

É preciso, portanto, realizar um ajuste sobre a média aritmética, para subestações com comportamento predominante de carga pesada. A normalização então deve ser efetuada levando-se em consideração o desvio padrão das amostras utilizadas para o cálculo da média, com a finalidade de racionalizar as comutações em cargas predominantemente pesadas. A potência média calculada a partir de dados históricos receberá um estímulo de $\pm 15\%$, de acordo com o módulo do desvio padrão das amostras, de maneira automática, para se adaptar às diversas situações de carga. Esta correção foi definida a partir de estudos empíricos sobre o desvio padrão, considerando diversos comportamentos de carga.

Foram realizadas várias tentativas para se obter a correção na potência e as que apresentaram melhores resultados consideravam um ajuste máximo de $\pm 15\%$, variando de forma linear com o desvio padrão. A potência de normalização pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$P_{normalização} = \begin{cases} \left(1 + \frac{3}{10}\sigma\right)P_{média}, \text{ Se } 0 \leq \sigma \leq 0.5 \\ \left(1 + 0.15 - \frac{3}{10}\sigma\right)P_{média}, \text{ caso contrário} \end{cases} \quad (2)$$

onde:

σ é o desvio padrão relativo à potência média

As funções de pertinência para esta variável podem ser visualizadas na Fig. 2.

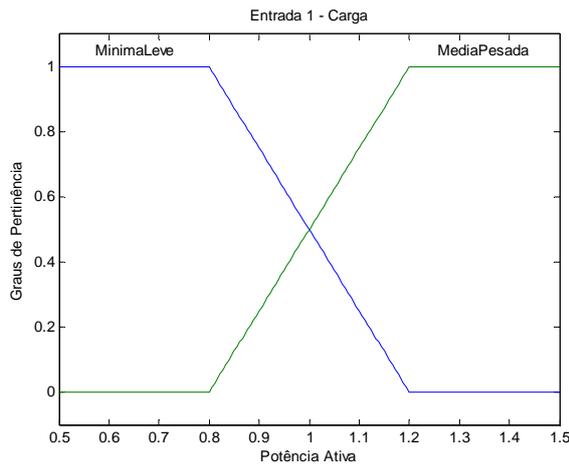


Figura 2. Variável *carga* do controle *fuzzy*.

Já o *desvio* da tensão em relação a uma tensão de referência é calculado como se segue:

$$desvio = \frac{V_{medido} - V_{referencia}}{V_{referencia}} \quad (3)$$

As funções de pertinência para esta variável estão registradas na Fig. 3.

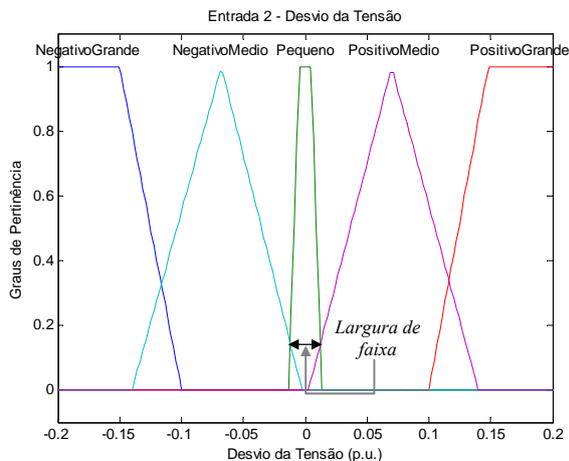


Figura 3. Variável *desvio* do controle *fuzzy*.

A largura de faixa de atuação do controle *fuzzy* é definida por meio dos pontos de cruzamento das funções de pertinência do parâmetro *desvio* de tensão, onde o ponto comum entre *Pequeno* e *PositivoMedio* indica o limite superior da faixa, enquanto que o ponto comum entre *NegativoGrande* e *Pequeno* indica o limite inferior da faixa. O parâmetro linguístico de saída, ou seja, o estímulo à tensão de referência foi mapeado por meio de cinco funções de pertinência conforme ilustradas na Fig. 4, ou seja, *INGde* (*Incremento Negativo Grande*), *INMed* (*Incremento Negativo Médio*), *Mantém*, *IPMed* (*Incremento Positivo Médio*) e *IPGde* (*Incremento Positivo Grande*).

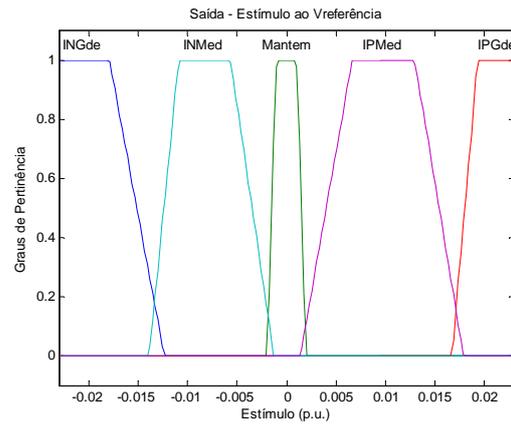


Figura 4. Saída do controle *fuzzy*.

Esta saída é um número real, o qual será enviado diretamente ao relé visando então alterar (incrementar/decrementar) a tensão de referência. Quando o *estímulo* estiver dentro da faixa *Mantém* significa que a tensão de referência do relé permanece inalterada. A base de conhecimento do sistema proposto se encontra armazenada nas regras *fuzzy* do tipo:

1. Se *carga* é *Mínima/Leve* e *desvio* é *Negativo Grande* então *estímulo* é *IPGde*
 2. Se *carga* é *Mínima/Leve* e *desvio* é *Negativo Médio* então *estímulo* é *Mantém*
- (...)

Todas as regras *fuzzy* podem ser mais bem compreendidas por meio da Tabela 1.

Tabela 1. Regras *fuzzy*.

| Carga (Potência Ativa) | Desvio da Tensão | | | | |
|------------------------|------------------|----------------|---------|----------------|-----------------|
| | Negativo Grande | Negativo Médio | Pequeno | Positivo Médio | Positivo Grande |
| Mínima/Leve | IPGde | Mantém | Mantém | Mantém | INGde |
| Média/Pesada | IPGde | IPGde | IPMed | INMed | INMed |

Observa-se na Tabela 1 uma predominância de incrementos positivos em cargas Média/Pesada, ao passo que em carga leve há uma predominância de “Mantém”. Estas regras foram confeccionadas para economizar comutações em carga Mínima/Leve e aumentar a tensão em carga Média/Pesada.

3 Processo de simulação utilizando dados reais

Para investigar o comportamento da abordagem proposta, o software *Matlab* foi usado para implementar a abordagem convencional e a *fuzzy*, com e sem o ajuste automático da potência média. As simulações tiveram como base as curvas históricas reais de potência ativa e reativa de subestações administradas pela concessionária ELEKTRO Eletricidade e Serviços S/A.

A partir destas curvas reais, realizou-se então um fluxo de carga simplificado para determinar a tensão na subestação para cada valor de potência ativa e

reativa fornecidos, os quais são então apresentados às simulações dos relés *fuzzy* e convencional. Na Fig. 5 se encontra o modelo simplificado de simulação utilizando o fluxo de carga.

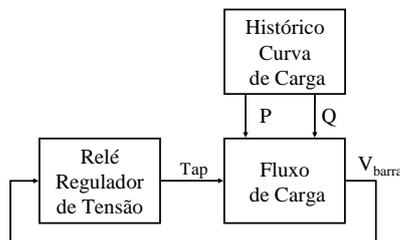


Figura 5. Modelo simplificado de simulação com fluxo de carga.

Os novos valores de tensão obtidos das comutações de tap realimentam o fluxo de carga simplificado, passando então a conter dados dinâmicos de tensão. As subestações utilizadas para simulações foram Cordeirópolis TR2, Ubatuba TR2, Votuporanga TR2. As curvas de carga representam diferentes perfis de consumidores, as quais compreendem um período total de 7 dias com medições de potência ativa e reativa adquiridas em intervalos de 10 minutos.

A tensão de referência adotada para as simulações foi de 14.1 kV, com desvio de $\pm 1.25\%$ em relação à referência (176.25 V) e temporização para comutação de 90 segundos.

4 Resultados computacionais

Na Fig. 6 encontra-se representado os perfis de tensão para a subestação Cordeirópolis TR2, usando-se a abordagem convencional e também a *fuzzy*. É possível constatar nesta figura a melhora no perfil de tensão, sendo que a média para a estratégia *fuzzy* foi 55V mais elevada que a média convencional.

Sem o ajuste automático da potência média, esta subestação apresenta 1.81 vezes mais comutações que quando controlada pelo relé convencional. Com as correções na potência média, a estratégia *fuzzy* realiza 1.22 vezes mais comutações que o relé convencional. Levando-se em consideração que o comutador de tap para esta subestação recebe manutenção a cada 100 mil comutações ou 6 anos, para a abordagem convencional seriam necessários 13.7 anos para se atingir o limite máximo. Este limite, para a abordagem *fuzzy* sem correção da potência média seria atingido em 7.6 anos e com correção 11.2 anos. Os resultados mostraram que mesmo aumentando-se o número de comutações para melhorar o perfil de tensão por meio da abordagem inteligente, a manutenção preventiva continua sendo realizada pelo tempo mínimo de 6 anos, o que comprova a flexibilização do uso das comutações. A filosofia desta estratégia *fuzzy* torna a tensão de referência dinâmica, portanto é necessário averiguar se a tensão extrapola a faixa dinâmica. Pode-se comprovar na Fig. 7 que

para a subestação de Cordeirópolis TR2 a tensão não excede a faixa dinâmica em nenhum instante.

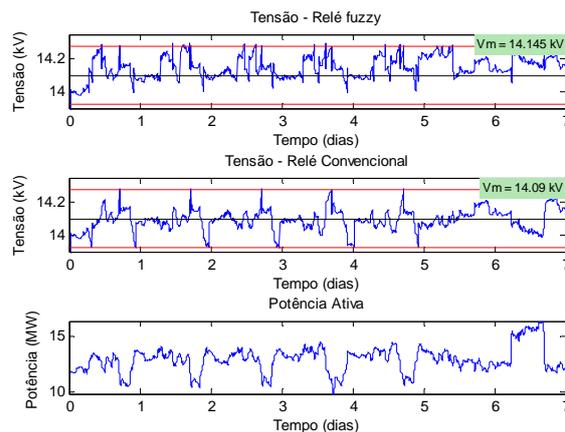


Figura 6. Perfil de tensão para Cordeirópolis TR2.

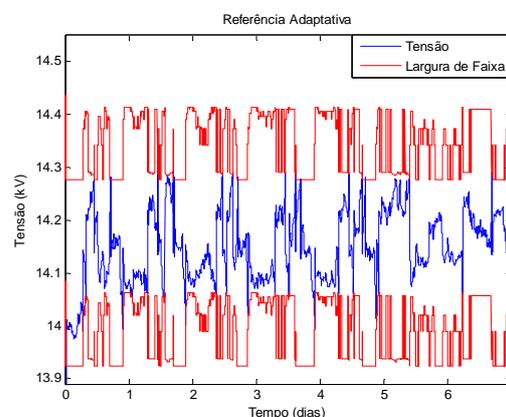


Figura 7. Faixa dinâmica de tensão para Cordeirópolis TR2.

A Fig. 7 mostra o comportamento da tensão e também da largura de faixa obtida com o sistema *fuzzy*. A largura de faixa é calculada em relação à tensão de referência dinâmica, aplicando-se o desvio de $\pm 1.25\%$.

A eficiência da estratégia *fuzzy* em deixar mais alta a tensão em carga pesada pode ser observada na Fig. 8, onde se constata que para todos os níveis de carga pesada a tensão no barramento secundário da subestação foi mantida mais elevada para a estratégia *fuzzy*, sendo que acima de 15.9 MW a tensão média foi 158V mais alta.

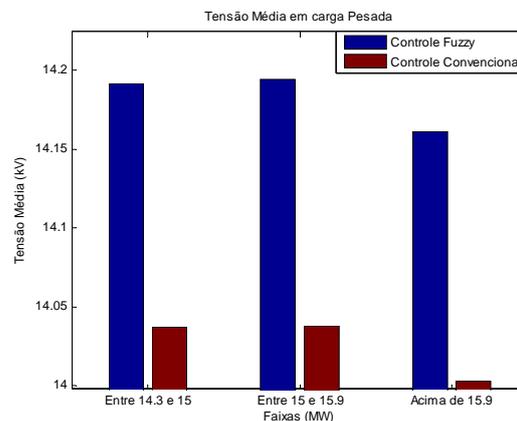


Figura 8. Níveis de carga pesada para Cordeirópolis TR2.

Nas tabelas a seguir encontram-se os principais resultados obtidos com as simulações do Controle Convencional da Tensão (CCT), Controle *fuzzy* da tensão sem correção da potência média (CFT) e com correção da potência média (CFTm). Foram comparados os ganhos médios de tensão obtidos em carga pesada na barra da subestação e também a tensão média de todo o período de simulação, a começar pela subestação Ubatuba TR2, na Tabela 2. Também foram relacionados os tempos de manutenção levando-se em consideração o limite de 100 mil comutações.

Tabela 2. Principais resultados de simulação para Ubatuba TR2.

| Faixas de Carga Pesada (MW) | Tensão Média CCT (V) | Ganho Médio CFT (V) | Ganho Médio CFTm (V) |
|------------------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| Entre 6.86 e 8.17 | 14098 | 45 | 45 |
| Entre 8.17 e 9.67 | 14079 | 78 | 78 |
| Acima de 9.67 | 14055 | 164 | 164 |
| Tensão média (7 dias) | 14096 | 14114 | 14114 |
| Manutenção (anos) | 24.22 | 15.40 | 15.40 |

Na Tabela 3 encontram-se os principais resultados para Votuporanga TR2.

Tabela 3. Principais resultados de simulação para Votuporanga TR2.

| Faixas de Carga Pesada (MW) | Tensão Média CCT (V) | Ganho Médio CFT (V) | Ganho Médio CFTm (V) |
|------------------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| Entre 11.6 e 13.1 | 14111 | 73 | 73 |
| Entre 13.1 e 14.8 | 14067 | 136 | 136 |
| Acima de 14.8 | 14019 | 169 | 169 |
| Tensão média (7 dias) | 14089 | 14149 | 14143 |
| Manutenção (anos) | 13.77 | 6.88 | 7.21 |

Em todas as subestações simuladas houve melhoria do perfil de tensão quando se utiliza o controle *fuzzy*, sem transgredir os limites impostos pela Resolução n.º 505 da ANEEL. É importante destacar que as comutações necessárias para se elevar a tensão em carga pesada não comprometeram o tempo de manutenção do comutador. Este fato reforça a idéia de que este tipo de controle pode ser realizado por meio de sistemas inteligentes.

5 Conclusões

Este trabalho apresentou inúmeros desafios, principalmente em relação às normalizações necessárias para tornar a estratégia *fuzzy* genérica. O ajuste automático da potência ativa média se mostrou um excelente parâmetro de regulação para todas as subestações testadas. É importante frisar que tais subestações representam os mais diversos comportamentos de cargas presentes no setor elétrico brasileiro. Assim, as principais potencialidades da estratégia *fuzzy* apresentada neste artigo são as seguintes: i) adaptação automática às mudanças ocorridas na demanda de carga da subestação; ii) resposta produzida de forma rápida, possibilitando aplicações em tempo-

real; iii) elevação da tensão em condições de carga pesada; e iv) otimização do número de comutações de tap em condições de carga mínima/leve.

Finalmente, vale destacar o desempenho da estratégia inteligente frente aos objetivos deste trabalho. A validação da estratégia proposta por meio de dados reais de subestações de distribuição, apresentou resultados bem satisfatórios, contribuindo para melhorar a regulação de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica.

Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte financeiro da CAPES e do CNPq, sem o qual não seria possível a realização deste trabalho. Finalmente, à empresa ELEKTRO pelas informações fornecidas.

Referências Bibliográficas

- Choi, J.H., Kim, J.C. (2001). The online voltage control of ULTC transformer for distribution voltage regulation, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 23, pp. 91-98, 2001.
- Dixon, M. (2001). Innovative Volt/VAr management provides payback, in *Proc. 2001 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, pp. 461-468.
- Hsu, Y.Y., Lu, F.C. (1998). A combined artificial neural network-fuzzy dynamic programming approach to reactive power/voltage control in a distribution substation, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 13, n. 4, pp. 1265-1271, 1998.
- Hu, Z., Wang, X., Chen, H., Taylor, G.A. (2003). Volt/VAr control in distribution systems using a time-interval based approach, in *Proc. 2003 IEEE Generation, Transmission and Distribution*, pp. 548-554.
- Lee, C.C. (1990). Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controllers – Part I and II, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 20, pp. 404-435, 1990.
- Liang, R.H., Wang, Y.S. (2003). Fuzzy-based reactive power and voltage control in a distribution system, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 18, n. 2, pp. 610-618, 2003.
- Liu, Y., Zhang, P., Qiu, X. (2002). Optimal volt/var control in distribution systems, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 24, n. 4, pp. 271-276, 2002.
- Resolução N° 505/2001 – ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <http://www.aneel.com.br>. Acessado em: 26 de julho de 2006.