



## XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica

SENDI 2008 - 06 a 10 de outubro

Olinda - Pernambuco - Brasil

### Controle de Tensão em Transformadores de Subestação de Distribuição de Energia Elétrica Usando Relés com Funcionalidades Inteligentes

**Vinicius M. Benichio**  
**ELEKTRO**

vinicius.benichio@elektro.com.br

**Fernando Amorim**  
**Treetech**

fernando.amorim@treetech.com.br

**Ivan N. da Silva**  
**USP/EESC**

insilva@sel.eesc.usp.br

**Marcos Alves**  
**Treetech**

marcos.alves@treetech.com.br

**Rogério A. Flauzino**  
**USP/EESC**

raflauzino@feb.unesp.br

**Luis F. S. Dias**  
**ELEKTRO**

luis.dias@elektro.com.br

#### Palavras-chave

Comutador de tap

Sistema de distribuição

Sistemas *fuzzy*

Relé regulador de tensão

#### Resumo

Este trabalho apresenta uma estratégia *fuzzy* para realizar o controle de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica. Esse sistema de controle atua de maneira a comandar o comutador de tap de transformadores de potência. Foram empregadas técnicas de sistemas *fuzzy* para tornar os relés reguladores de tensão adaptativos. Ainda, como objetivo do estudo, atuou-se apenas na subestação de distribuição, realizando medições de tensão e de corrente. A capacidade dos sistemas *fuzzy* em tratar incertezas permitiu a criação de um controle que melhora automaticamente o perfil de tensão das subestações de distribuição, atendendo as regulamentações dos órgãos fiscalizadores e também aos anseios das concessionárias de distribuição de energia elétrica. Para exemplificar essas afirmações, resultados reais são apresentados nesse artigo.

#### 1. Introdução

A energia elétrica é um produto indispensável para a manutenção das atividades da sociedade. A exigência dos consumidores e órgãos fiscalizadores por uma melhor qualidade no fornecimento de energia apenas reforça este fato. Como concessionárias do sistema elétrico brasileiro, as empresas de energia estão sujeitas às resoluções da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) no que diz respeito às conformidades dos níveis de tensão em regime permanente.

Para tensões de distribuição maiores que 1 kV e menores que 69 kV, foco deste estudo, a Resolução nº 505 da ANEEL define quais os níveis de tensão que a empresa distribuidora de energia deve fornecer aos seus consumidores [1]. A Tabela 1 sintetiza a classificação das faixas de tensão a serem observadas no sistema elétrico brasileiro e a partir da análise da mesma, verifica-se que tensões compreendidas entre 0,93 e 1,05 p.u. em relação a uma tensão  $V_{nominal}$  de 1 p.u. se encontram dentro da faixa de tensão denominada *Adequada*, a qual é a faixa operativa dos sistemas de distribuição.

**Tabela 1 – Classificação das faixas de tensão segundo a ANEEL.**

Classificação	Faixa de Variação da Tensão
<i>Adequada</i>	$0,93 \text{ p.u.} \leq V \leq 1,05 \text{ p.u.}$
<i>Precária</i>	$0,90 \text{ p.u.} \leq V \leq 0,93 \text{ p.u.}$
<i>Crítica</i>	$V < 0,90 \text{ p.u.}$ ou $V > 1,05$

É importante ressaltar que esta faixa é assimétrica em relação a 1 p.u., sendo o mínimo 0,93 p.u. e o máximo 1,05 p.u. Valores de tensão acima de 1,05 p.u. se enquadram na faixa de tensão denominada *Crítica*. A entrega de energia nesta faixa pode danificar os equipamentos dos consumidores. Níveis críticos de tensões também são encontrados para valores inferiores a 0,90 p.u. em relação à tensão nominal. A faixa de tensão denominada *Precária* se encontra entre 0,90 e 0,93 p.u. Não há uma faixa de tensão *Precária*, acima da tensão *Adequada*, para níveis de tensão entre 1 kV e 69 kV. O fornecimento de energia nas faixas de tensão *Precária* e *Crítica* pode resultar em penalidades às empresas distribuidoras de energia conforme estabelece a Resolução nº 505 da ANEEL. Com isso, um adequado controle de tensão pode evitar prejuízos financeiros a essas empresas.

A utilização de sistemas inteligentes, notadamente aqueles baseados em 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 anteriores envolvidos com a conformidade dos níveis de tensão, este trabalho tem como objetivo propor uma estratégia de controle que atue de forma automática apenas no comutador de tap do transformador da subestação de distribuição. Esse controle deve tornar as comutações do tap em ações capazes de melhorar o perfil de tensão para os consumidores do sistema de distribuição. Um dos motivadores para ações com os objetivos citados reside no fato de que os principais problemas relatados por estes consumidores são tensões abaixo do valor nominal, comprometendo assim a qualidade da energia.

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*. Portanto, para os consumidores, principalmente para aqueles mais distantes da subestação, serão atendidos por uma energia elétrica dentro de níveis de tensão adequados ao se operar o sistema com tensões mais elevadas no barramento secundário da subestação de distribuição.

O comportamento não uniforme de determinadas cargas em um sistema de distribuição torna o controle de tensão complexo [2]. Na literatura correlata à área é possível encontrar diversos trabalhos onde pesquisadores buscam novas soluções para resolver este tipo de problema. Como exemplo dessas soluções, os objetivos da proposta apresentada em [3] consistem em encontrar as melhores posições do tap do transformador ao longo do tempo de acordo com as necessidades dos consumidores. Para tanto, foram empregados métodos convencionais de otimização que forneceram resultados satisfatórios para a regulação de tensão, minimizando com eficiência o desvio da tensão em relação à referência. Entretanto, o número de comutações do tap foi relativamente maior do que abordagens tidas como convencionais.

Já em [4] 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 dividir a curva de carga e também encontrar o escalonamento ótimo entre os dispositivos. 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. Entretanto, a aplicação da técnica exige um elevado esforço computacional para obtenção dos parâmetros de regulação.

A proposta apresentada em [5] utiliza programação dinâmica para controlar os dispositivos reguladores de tensão associados à subestação e sistemas *fuzzy* para aqueles relacionados aos

alimentadores. A coordenação entre os dois tipos de dispositivos, da subestação e dos alimentadores, é realizada por algoritmos convencionais, que resultaram em diminuição das perdas de potência e considerável melhora no perfil de tensão.

Em [6] os autores utilizaram 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. O controle proposto apresentou uma significativa melhora do perfil de tensão e do fator de potência, mas o número de comutações do tap foi relativamente maior quando comparado às técnicas convencionais.

Ainda, a proposta de se investigar o controle de tensão e potência reativa em [7] 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. Foram empregados os sistemas *fuzzy* e também *Simulated Annealing* para refinar a resposta do sistema *fuzzy*. A estratégia proposta apresentou bons resultados tanto para o refinamento do sistema *fuzzy* como para a solução do controle de tensão e potência reativa em sistemas de distribuição.

Em [8] é apresentada uma forma inovadora de coordenação entre os dispositivos de controle de tensão em um sistema de distribuição, onde se utiliza o comportamento da potência reativa para coordenar de forma automática a ação do LTC (*Load Tap Changer*), 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.

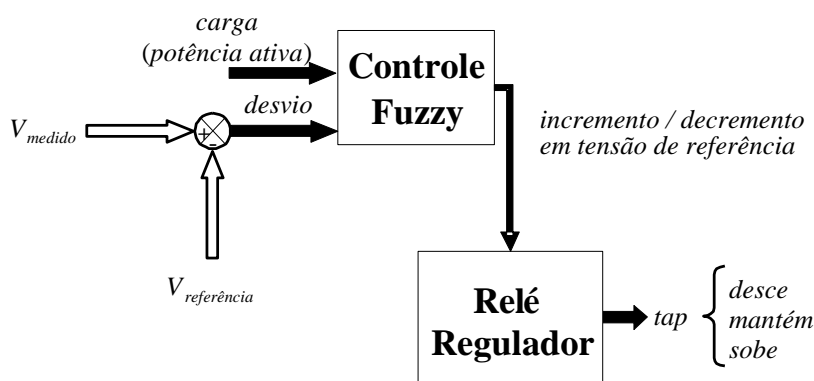
Dentre todas as propostas investigadas, apenas aquela apresentada em [3] realiza medições e controle apenas no barramento secundário da subestação, sendo que essa estratégia de atuação é também assumida no trabalho aqui proposto. As demais apresentam estratégias eficientes, mas necessitam de elevado esforço computacional, tornando muito difícil as suas aplicações em tempo real, sendo também este um dos objetivos principais da estratégia apresentada nesse trabalho. 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. Esses trabalhos motivaram ainda mais a busca por uma ferramenta inteligente que possa racionalizar as comutações do tap do transformador e melhorar o perfil de tensão, atuando-se para tanto apenas na subestação de distribuição.

## **2. Aspectos relacionados às estratégias inteligentes**

A regulação de tensão ou o controle automático de tensão pela comutação de tap em transformadores de potência é comandada pelo relé regulador de tensão, atuando sobre o LTC de forma a elevar ou abaixar a tensão, conforme necessário. Relés que implementam a função ANSI 90 tidos como convencionais não são capazes de atuar corretamente sob algumas condições de comportamento do sistema, tais como manobras e variações atípicas de carga, dentre outras, pois apenas monitoram a tensão do barramento secundário. Devido às características dinâmicas do sistema elétrico brasileiro, pode-se afirmar que esse problema é de difícil tratamento quando se empregam métodos convencionais, o que justifica o emprego de técnicas de inteligência computacional.

Neste trabalho foi desenvolvida uma estratégia, denominada Controle Adaptativo da Referência (CAR), que consiste em se utilizar lógica *fuzzy* para aplicar estímulos na tensão de referência de um relé regulador de tensão convencional. Neste caso, a tensão de referência do relé regulador de tensão passa a ser dinâmica, sendo atualizada a todo momento. No entanto, a decisão de comutar ou não o tap é ainda realizado pelo relé regulador de tensão.

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 [9]. Assim, a estratégia fuzzy desenvolvida consegue tratar as variáveis empregadas no CAR de forma apropriada, agregando robustez e contribuindo para que o controle de tensão seja realizado de forma mais otimizada. A estratégia a ser apresentada propõe um sistema auxiliar de tomada de decisão a ser integrado aos relés reguladores de tensão já existentes. Tal sistema tem como objetivo tornar dinâmico o ajuste da tensão de referência para o relé convencional. Nesse caso, o sistema *fuzzy* é empregado como um módulo inteligente auxiliar ao relé convencional. A Figura 1 ilustra o diagrama simplificado de funcionamento do CAR.

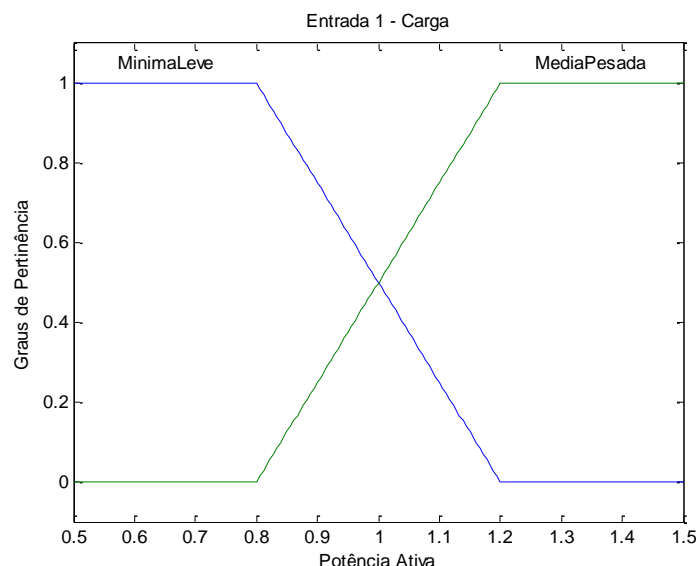


**Figura 1 – Diagrama simplificado de funcionamento da estratégia CAR.**

O relé com funcionalidades inteligentes irá monitorar o *desvio* da tensão e a *carga* (potência ativa). A saída do controle *fuzzy* é um sinal de incremento ou decremento sobre a referência atual do relé regulador de tensão. Desta forma, a inserção deste módulo inteligente em um relé convencional torna dinâmico o seu ajuste de tensão de referência. O CAR irá *incrementar* ou *decrementar* a tensão de referência de acordo com os limites de tensão *Adequada* especificados na Tabela 1, levando-se também em consideração os objetivos do trabalho, ou seja, elevar a tensão média e racionalizar as comutações de tap.

Busca-se assim a flexibilização da utilização do tap, elevando-se a tensão em carga *Média/Pesada*, por meio da elevação da tensão de referência, e tendo diminuição no número de comutações em carga *Mínima/leve* pela não alteração da tensão de referência. Ainda, através do sistema *fuzzy* é possível evitar comutações prematuras pela não alteração da tensão de referência. A normalização da potência ativa foi feita em relação a um valor médio por meio de análises fundamentadas em dados históricos.

Assim, para o funcionamento desta estratégia é necessário o ajuste deste valor de potência média, tendo então por objetivo que o sistema *fuzzy* possa se adaptar a qualquer subestação. O ajuste é realizado por um módulo que calcula a potência média com base em dados históricos. Os termos das funções de pertinência para a *potência ativa* são apresentados na Figura 2. Deseja-se distinguir duas situações básicas, ou seja, em carga *Mínima/Leve* deve-se preservar a comutação de tap; em carga *Média/Pesada* deve-se manter a tensão mais elevada, considerando os limites estabelecidos na Tabela 1.

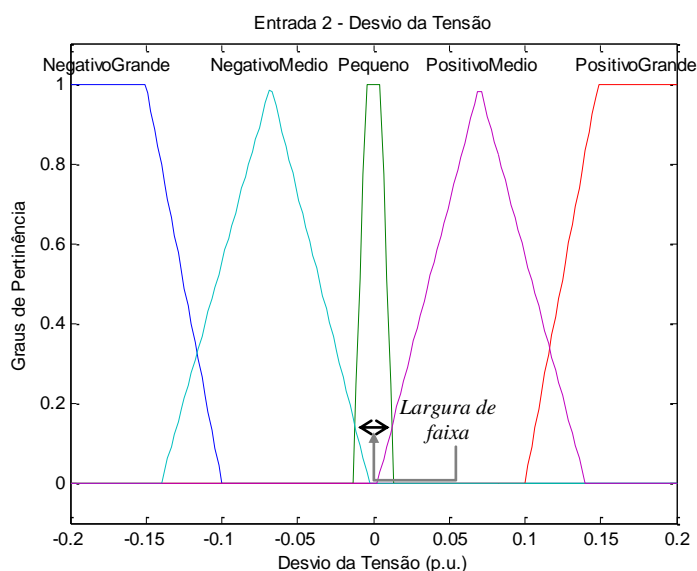


**Figura 2 – Variável carga da estratégia CAR.**

Em relação à segunda entrada (*desvio de tensão*), a mesma é calculada usando a expressão dada em (1).

$$desvio = V_{medido} - V_{referência} \quad (1)$$

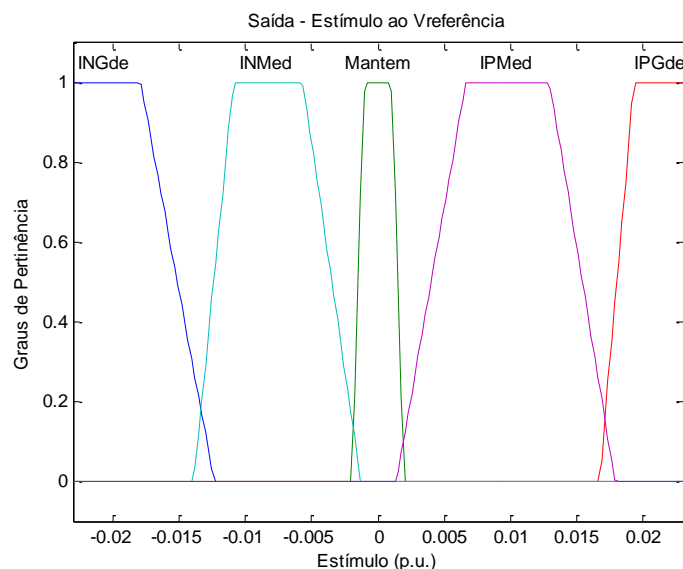
A variável *desvio* foi representada em todo o seu universo de discurso por intermédio de cinco funções de pertinência como mostrado na Figura 3, onde os termos utilizados foram *NegativoGrande*, *NegativoMedio*, *Pequeno*, *PositivoMedio* e *PositivoGrande*. A utilização de 5 funções de pertinência para essa entrada permite uma combinação maior de regras para elevar a tensão em carga *Média/Pesada* e diminuir a comutação em carga *Mínima/Leve*.



**Figura 3 – Variável desvio da estratégia CAR.**

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.

A variável lingüística de saída, ou seja, o estímulo à tensão de referência foi mapeado por meio de cinco funções de pertinência conforme ilustradas na Figura 4, ou seja, *INGde* (*Incremento Negativo Grande*), *INMed* (*Incremento Negativo Médio*), *Mantém*, *IPMed* (*Incremento Positivo Médio*) e *IPGde* (*Incremento Positivo Grande*). Assim, a saída do sistema fuzzy 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.



**Figura 4 – Variável estímulo de tensão  $V_{referência}$  da estratégia CAR.**

A base de conhecimento do sistema proposto se encontra armazenada nas regras fuzzy “Se-Então” do seguinte 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*
- (...)

As regras fuzzy podem ser mais bem compreendidas por meio da Tabela 2.

**Tabela 2 – Regras fuzzy da estratégia CAR.**

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

Observa-se na Tabela 2 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. Análise dos resultados obtidos com ensaios em campo

Para investigar o comportamento do CAR no controle de tensão empregou-se o software Matlab para implementar a abordagem convencional e a estratégia fuzzy visando realizar inúmeras simulações, que tiveram como base as curvas históricas reais de potência ativa e reativa de subestações administradas

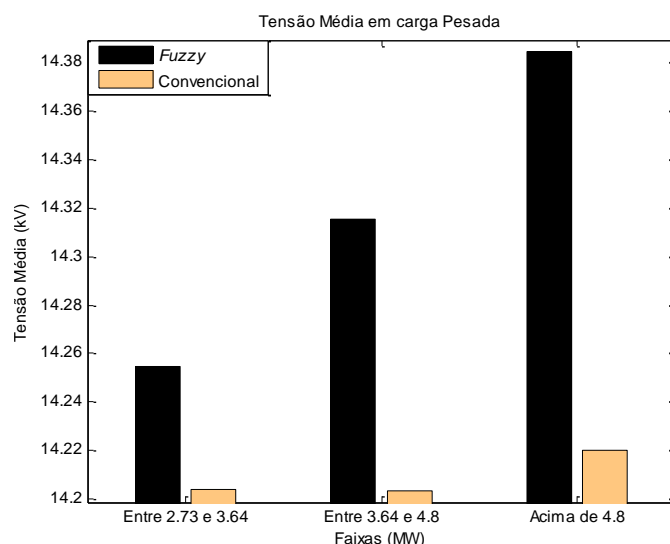
pela concessionária ELEKTRO. A partir das curvas reais, realizou-se então um fluxo de carga simplificado para determinar a tensão na subestação para cada valor de potência ativa e reativa fornecidos, os quais são então apresentados às simulações dos relés *fuzzy* e convencional que realizam suas operações matemáticas para decidir sobre comutar ou não o tap. Uma vez que o sistema *fuzzy* foi completamente ajustado, iniciou-se então a etapa de testes em laboratório, sendo que a estratégia CAR foi implementada em um protótipo de relé regulador de tensão, o AVR da empresa TreeTech Sistemas Digitais.

Uma vez validada em laboratório a estratégia inteligente, diversos aperfeiçoamentos foram realizados no protótipo do AVR para que se pudesse realizar ensaios em campo. Escolheu-se a subestação Mogi Guaçu 2, administrada pela ELEKTRO, com dois transformadores, para receber a instalação do relé regulador de tensão inteligente. Inicialmente, o AVR foi instalado no transformador TR-1. O relé que já estava operando neste transformador foi mantido como retaguarda. Uma chave seletora foi inserida para colocar o relé inteligente ou o convencional (Relé 90) em operação como ilustra a Figura 5.



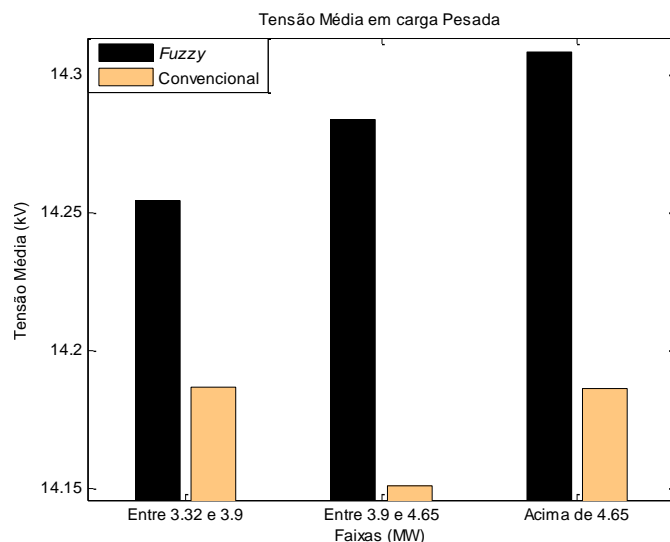
**Figura 5 – Chave Seletora para o AVR *fuzzy* ou Relé 90 convencional.**

Para um período de avaliação de 7 dias de operação do relé AVR *fuzzy*, a tensão média foi mantida 115 V mais elevada no TR-1, se comparada ao mesmo período de operação do relé convencional (Relé 90). Na faixa de carga mais pesada a tensão média foi 164 V mais elevada no TR-1, como pode ser comprovado na Figura 6.



**Figura 6 – Tensão média em carga pesada para Mogi Guaçu 2 (TR-1).**

Também para 7 dias de operação do relé AVR *fuzzy*, a tensão média foi mantida 57 V mais elevada no TR-2. Na faixa de carga mais pesada a tensão média foi 122 V mais elevada no TR-2, como pode ser comprovado Na Figura 7.



**Figura 7 – Tensão média em carga pesada para Mogi Guaçu 2 (TR-2).**

Para o período de uma semana o relé AVR *fuzzy* deixou a tensão mais elevada no barramento secundário da subestação Mogi Guaçu 2, proporcionando inúmeros benefícios aos clientes e também para a concessionária, respeitando-se sempre as regulamentações dos órgãos fiscalizadores.

A análise de comutações para o período de uma semana mostrou também que não foram transgredidos os limites da concessionária, de 100 mil comutações em 6 anos, o que evidencia um uso mais racional do comutador de taps, explorando melhor a faixa de operação do sistema de distribuição.

Outro ponto importante que pode ser destacado em relação à atuação do relé com sistema *fuzzy* é a economia obtida com estudos de comportamento de carga, uma vez que o sistema realiza o ajuste automático da tensão de referência a partir da análise histórica da potência ativa. Este ajuste automático permite por exemplo uma excelente atuação de regulação de tensão em situações de transferência de cargas, onde um transformador passa a suprir o papel de dois transformadores, atendendo uma carga maior com uma tensão mais elevada, mantendo-se ainda uma segurança considerável dos limites mínimos operativos impostos pela ANEEL.

#### 4. Conclusões

O controle *fuzzy* apresentou excelentes resultados quando aplicado na regulação de tensão em campo, validando as simulações e os testes em laboratório. Assim, as principais potencialidades da estratégia fuzzy apresentada neste artigo são as seguintes: i) facilidade de implementação hardware; ii) adaptação automática às mudanças ocorridas na demanda de carga da subestação; iii) resultados de saída são produzidos de forma extremamente rápida, possibilitando aplicações em tempo-real; iv) elevação automática do perfil de tensão em condições de carga pesada; e v) otimização do número de comutações de tap em condições de carga mínima/leve. Além disso, os processamentos executados pela estratégia *fuzzy* são baseados apenas em valores medidos das variáveis de entrada, sendo que eventuais imprecisões associadas aos dispositivos de aquisição de dados de entrada são também intrinsecamente tratadas pelas funções de pertinência.

A exploração contínua da faixa, racionalizando-se as comutações de tap em carga leve e buscando melhorar o perfil de tensão em carga pesada apresenta benefícios tanto para o consumidor quanto para a concessionária. Com níveis de tensão mais elevados em carga pesada o consumidor tem a garantia que seus equipamentos não serão submetidos a tensões abaixo da nominal ao fim do alimentador. Para um sistema de distribuição predominantemente modelado à impedância constante, tensões mais elevadas significam uma maior oferta de energia por parte da concessionária de distribuição. Por outro lado, cargas com comportamento de potência constante apresentam uma diminuição das perdas



elétricas quando submetidas a tensões mais elevadas, o que diminui o carregamento dos condutores e libera o sistema para disponibilizar mais energia útil aos consumidores.

Finalmente, torna-se de grande valia destacar o desempenho da estratégia inteligente frente aos objetivos delineados no início deste trabalho. A validação dessa estratégia *fuzzy* inteligente, por meio de dados reais de subestações de distribuição em simulações, testes em laboratório e ensaios em campo, apresentou resultados bem satisfatórios, contribuindo para melhorar a regulação de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica.

## 5. Referências bibliográficas

- 1 ANEEL. Resolução N° 505/2001 – Estabelece a conformidade dos níveis de tensão em regime permanente. ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Acesso em 26/07/2006, disponível em: <http://www.aneel.com.br>.
- 2 DUGAN, R.C., MCGRANAGHAN, M.F., SANTOSO, S., BEATY, H.W. Electrical Power Systems Quality. New York, Ed. McGraw Hill 2nd ed., 2003, 528 p.
- 3 CHOI, J.H., KIM, J.C. The online voltage control of ULTC transformer for distribution voltage regulation. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 23, 2001, p. 91-98.
- 4 HU, Z., WANG, X., CHEN, H., TAYLOR, G.A. Volt/VAr control in distribution systems using a time-interval based approach. IEE Proceedings – IEE Generation, Transmission and Distribution, vol. 50, 2003, p. 548-554.
- 5 LIU, Y., ZHANG, P., QIU, X. Optimal volt/var control in distribution systems. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 24, n. 4, 2002, p. 271-276.
- 6 HSU, Y.Y., LU, F.C. 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, 1998, p. 1265-1271.
- 7 LIANG, R.H., WANG, Y.S. Fuzzy-based reactive power and voltage control in a distribution system. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 18, n. 2, 2003, p. 610-618.
- 8 Dixon, M. Innovative Volt/VAr management provides payback, in Proc. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, pp. 461-468, 2001.
- 9 LEE, C.C. Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controllers – Part I and II. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol. 20, 1990, pp. 404-435.