

# Relé Regulador Fuzzy Para Melhoria do Perfil de Tensão em Sistemas de Distribuição

Vinicius M. Benichio, Marcos E. G. Alves, Ivan N. da Silva e Rogério A. Flauzino

**Resumo** – Este trabalho apresenta uma estratégia *fuzzy* para controle de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica. Tal controle atuará em tempo real no comutador de tap do transformador de potência da subestação. A técnica de sistemas inteligentes foi empregada para tornar o relé regulador de tensão adaptativo. Objetiva-se também atuar apenas na subestação de distribuição, realizando medições no barramento secundário e tomando medidas de controle também neste barramento. A capacidade dos sistemas *fuzzy* em tratar imprecisões, bem como sua consagrada interpretabilidade de informações qualitativas, permitiu a criação de um controle de tensão inteligente que atende todas as regulamentações dos órgãos fiscalizadores brasileiros e também os anseios das concessionárias de distribuição de energia elétrica, pois os resultados obtidos foram bem satisfatórios.

**Palavras-chave** — Comutador de tap, qualidade de energia, relé regulador de tensão, sistema de distribuição, sistemas *fuzzy*.

## I. INTRODUÇÃO

O presente trabalho é resultado do projeto de P&D (código ANEEL N° 1533), intitulado “Desenvolvimento de Funções Inteligentes para Relés Reguladores de Tensão na ELEKTRO”, o qual foi pertencente aos ciclos 2004/2005, sendo o mesmo executado pela Universidade de São Paulo (USP), Universidade Estadual Paulista (UNESP) e TreeTech Sistemas Digitais Ltda, com suporte financeiro da concessionária ELEKTRO.

A crescente exigência dos consumidores por uma melhor qualidade no fornecimento de energia tem sido uma preocupação dos órgãos fiscalizadores brasileiros. Com isso, a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) elaborou resoluções no que diz respeito à qualidade no fornecimento de energia, bem como às conformidades dos níveis de tensão em regime permanente. Como exploradoras do sistema elétrico brasileiro, as empresas concessionárias de energia estão sujeitas a essas resoluções e para isso é necessário atender a tais exigências. Levando-se em consideração os

---

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do V Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (V CITENEL), realizado em Belém/PA, no período de 22 a 24 de junho de 2009.

V. M. Benichio trabalha na ELEKTRO – Eletricidade e Serviços S/A, Rua Ary Antenor de Souza, 321, CEP 13053-024, Campinas, São Paulo (e-mail: [vinicius.benichio@elektro.com.br](mailto:vinicius.benichio@elektro.com.br)).

M. E. G. Alves trabalha na Treotech Sistemas Digitais Ltda, Praça Claudino Alves, 141, CEP 12940-040, Atibaia, São Paulo (e-mail: [marcos.alves@treotech.com.br](mailto:marcos.alves@treotech.com.br)).

I. N. da Silva e R. A. Flauzino trabalham no Departamento de Engenharia Elétrica da USP (Campus São Carlos), CP 359, CEP 13566-590, São Carlos, São Paulo (e-mails: [insilva@sel.eesc.usp.br](mailto:insilva@sel.eesc.usp.br); [raflauzino@sc.usp.br](mailto:raflauzino@sc.usp.br)).

aspectos envolvidos com a conformidade dos níveis de tensão, o controle dessa grandeza tem grande importância para a melhoria da qualidade da energia elétrica fornecida aos consumidores.

A aplicação crescente de técnicas de sistemas inteligentes agregadas às técnicas convencionais tem gerado resultados bastante eficientes e cada vez mais convincentes para os problemas envolvendo 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 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.

Com relação aos níveis de tensão em regime permanente para a distribuição primária, ou seja, maiores que 1kV e menores que 69kV, foco deste trabalho, a Resolução n° 505 da ANEEL [1] define quais os níveis mais adequados que a empresa distribuidora de energia deve fornecer aos seus consumidores. A tabela I sintetiza a classificação das faixas de tensão adotada no sistema elétrico brasileiro.

Tabela I. Classificação das faixas de tensão.

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 $V > 1.05 \text{ p.u.}$

A partir da análise da tabela I se verifica 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. 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 e também da concessionária. Se o tempo de fornecimento nesta faixa for superior a 1 minuto, pode-se então caracterizar uma sobretensão nos consumidores [2]. Níveis críticos de tensões também são encontrados para valores inferiores a 0.9 p.u. em relação à tensão nominal. O fornecimento de tensão nesta faixa para tempos superiores a 1 minuto submetem os consumidores a situações de

subtensões [2].

A faixa de tensão denominada *Precária* se encontra entre 0.9 e 0.93 p.u. É importante salientar que não há uma faixa de tensão *Precária*, acima da tensão *Adequada*, para níveis de tensão entre 1kV e 69kV [1].

Desta forma, pode-se enquadrar em níveis operativos, valores de tensão compreendidos apenas pela tensão *Adequada*. As faixas de tensão *Precária* e *Crítica* são enquadradas em níveis não operativos. A análise da conformidade dos níveis de tensão deve ser realizada juntamente com o tempo de transgressão máximo permitido para faixas não operativas.

O tempo total de medição, para avaliação dos tempos de transgressão é correspondente a 1008 amostras consecutivas medidas a cada 10 minutos. A duração de transgressão de tensão *Precária* (DRP) não pode ultrapassar 3% do tempo de medição. O mesmo acontece para a duração de transgressão de tensão *Crítica* (DRC) tanto para níveis superiores a 1.05 p.u quanto para inferiores a 0.9 p.u. Este índice foi estabelecido em 0.5% [1].

Levando-se em consideração todos os aspectos anteriores envolvidos com a conformidade dos níveis de tensões, bem como os tempos de transgressão, 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.
2. Flexibilizar o número de comutações de tap.
3. Melhorar o perfil de tensão

Os principais problemas relatados pelos consumidores são tensões abaixo do valor nominal, comprometendo assim a qualidade no fornecimento de energia elétrica. Uma das principais responsabilidades das distribuidoras de energia elétrica é fornecer aos consumidores tensões em faixas adequadas, pois muitas atividades exigem níveis regulados de tensões. 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* (tabela I). Em [3], pode-se encontrar embasamento matemático que prova que para fatores de potência elevados, a queda de tensão depende fortemente da resistência do alimentador; ao passo que, para fatores de potência ativa de médio a baixo, a queda de tensão depende principalmente da reatância do alimentador.

A maioria das técnicas de regulação de tensão fundamenta-se na compensação por queda de tensão na linha. O objetivo desta técnica é manter a tensão constante no consumidor, tomando medidas de controle no barramento secundário da subestação, através de um modelo interno de impedância do alimentador de distribuição para encontrar a impedância da linha [4]. Sem a utilização dessa compensação, ao final do alimentador, haverá uma variação de tensão que dependerá da impedância do alimentador para uma condição de carga pesada, e da variação da corrente de carga para uma condição de carga leve [3]. 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.

Os alimentadores do sistema de distribuição de energia elétrica brasileiro são tipicamente modelados como sendo à impedância constante, assim como em outros países em desenvolvimento conforme observado na tabela II [5].

Tabela II. Aproximações recomendadas para modelagem de alimentadores.

Tipo do Alimentador	Potência Constante (%)	Impedância Constante (%)
<b>Residencial e comercial<sup>(1)</sup></b>	67	33
<b>Residencial e comercial<sup>(2)</sup></b>	40	60
<b>Urbano</b>	50	50
<b>Industrial</b>	100	0
<b>Países em Desenvolvimento</b>	25	75

<sup>(1)</sup> Pico do verão      <sup>(2)</sup> Pico do inverno

Em uma modelagem à impedância constante a potência aumenta com o quadrado da tensão, já que a impedância da carga não varia com a tensão. Esta abordagem é interessante para se modelar cargas puramente resistivas, uma vez que a corrente acompanha a variação da tensão de forma linear, diminuindo a queda de tensão [3].

Em uma modelagem à potência constante, as potências reativas e ativas se mantêm constantes mesmo que a tensão varie, o que obriga a carga solicitar mais corrente do sistema caso a tensão diminua. Este tipo de modelagem privilegia sistemas com motores de indução e acentua a queda de tensão quando se utilizam tensões mais baixas. No sistema elétrico brasileiro, trabalhar com tensões mais elevadas durante a carga pesada privilegia todos os tipos de modelagens e propicia inúmeros benefícios, pois reduzem o carregamento dos condutores e conseqüentemente as perdas. A natureza não linear da carga em um sistema de distribuição torna o controle de tensão extremamente complexo. 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 [4] consistem em encontrar as melhores posições do tap do transformador em função do tempo e, de acordo com as necessidades dos consumidores, minimizar o erro entre a tensão de referência e a tensão do consumidor final, reduzindo também a freqüência de comutações do tap do transformador.

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 bem maior. Já em [6] 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. Em tal proposta se busca a coordenação ótima entre comutadores de tap, banco de capacitores ligados ao barramento secundário da subestação e também espalhados

ao longo do alimentador, minimizando-se as operações de comutação de tap e chaveamento dos bancos de capacitores. Foram utilizados algoritmos genéticos para particionar a curva de carga e também encontrar o escalonamento ótimo. 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.

Uma maneira de diminuir a complexidade do problema de controle de tensão é dividi-lo em dois: um com os controles da subestação e o outro com o controle dos alimentadores. Este é o caso da proposta apresentada em [7], que utiliza programação dinâmica para resolver o problema do lado da subestação e sistemas *fuzzy* para o lado dos alimentadores. Os objetivos principais desta estratégia são minimizar as perdas de potência e melhorar o perfil de tensão. A subestação em questão é equipada com reguladores automáticos de tensão e bancos de capacitores conectados ao barramento secundário. Também há bancos de capacitores instalados ao longo do alimentador. Esta divisão em dois subproblemas proporciona uma simplificação considerável da programação dinâmica se comparada à utilização desta ferramenta para solucionar o problema completo. 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.

Uma outra maneira de se solucionar o problema de controle de tensão é a utilização de sistemas híbridos, que combinam duas ou mais ferramentas inteligentes. Como exemplo, esta é a proposta apresentada em [8], 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. O sistema híbrido é responsável por definir quais as posições do tap do transformador da subestação e também o status do banco de capacitores instalado no barramento secundário. Essa proposta permite um planejamento diário da operação do transformador principal e também do capacitor instalado na barra da subestação.

A partir dos resultados obtidos, houve-se 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. Já a proposta de se investigar o controle de tensão e potência reativa em [9] 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. As considerações para a aplicação da mesma são também definidas em termos qualitativos. Assim, utilizaram-se sistemas *fuzzy* e também um método de simulação de *annealing* para refinar a resposta do sistema *fuzzy*. A estratégia proposta apresentou bons resultados tanto

para o refinamento do sistema *fuzzy* quanto para a solução do controle de tensão e potência reativa em sistemas de distribuição. Em [10] é apresentada uma forma inovadora de coordenação entre os dispositivos de controle de tensão em um sistema de distribuição. Nesta proposta 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. Pelo fato de não requerer intervenção humana e com a diminuição do número de operações do tap do transformador e chaveamentos dos capacitores, há uma diminuição dos custos de manutenção e operação do sistema.

Dentre todas as propostas investigadas, apenas aquela apresentada em [4] 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, 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 a estratégia de controle 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 racionalizar as comutações do tap do transformador e melhorar o perfil de tensão, atuando-se para tanto apenas na subestação de distribuição.

## II. ASPECTOS RELACIONADOS À ESTRATÉGIA INTELIGENTE

Em um mercado cada vez mais exigente quanto à qualidade da energia elétrica e com regras mais restritas para a definição dos parâmetros e limites de fornecimento aceitáveis, há uma necessidade crescente de ferramentas capazes de se adequar a esta realidade e permitir uma regulação de tensão apropriada.

Neste contexto, 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 sobre o *LTC* 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 elaborada uma estratégia inteligente para se controlar a tensão por meio do transformador de potência da subestação de distribuição. Tal estratégia proposta consiste em implementar um relé inteligente fundamentado em lógica *fuzzy*, onde o mesmo é responsável por todas as decisões de comutar ou não o tap visando atender os objetivos principais delineados no início deste artigo.

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 [11]. 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.

Portanto, o sistema *fuzzy* (*SF*) desenvolvido consegue tratar tais variáveis de forma apropriada, agregando robustez e contribuindo para que o controle de tensão seja realizado de forma mais otimizada.

Essa estratégia propõe um relé regulador de tensão que irá atuar diretamente no tap utilizando o critério de correlação entre a tensão e a curva de carga, visando então a tomada de decisão quanto à regulação de tensão. Tal estratégia avalia também, de forma automática, condições específicas de manobra, evolução de cargas e topologia da rede.

As decisões de operação de comutação de tap dependem do monitoramento de duas variáveis de entrada, ou seja, potência ativa e desvio de tensão. Um sistema *fuzzy* foi confeccionado para representar a base de conhecimento do relé regulador de tensão levando em consideração o monitoramento das variáveis citadas.

Para uma melhor compreensão da estratégia, na figura 1 se encontra representado de forma simplificada o relé regulador de tensão baseado em sistemas *fuzzy*, o qual atua diretamente sobre o *LTC*, enviando sinais para elevar ou abaixar a tensão. A tomada de decisão deve manter a tensão no ponto de entrega dos clientes dentro da faixa de tensão considerada *Adequada* conforme indicada na tabela I.

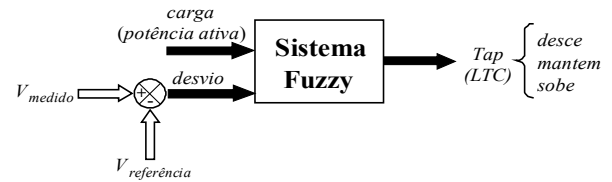


Figura 1. Diagrama simplificado de funcionamento do sistema proposto.

O monitoramento da potência ativa, juntamente com a tensão, permite atender aos objetivos previamente estabelecidos neste trabalho, ou seja, de propiciar perfis de tensão mais elevados no barramento secundário da subestação em situações de carga média e pesada. Já em condições de carga mínima e leve, o principal objetivo é otimizar o número de comutações de tap, mantendo também os níveis de tensão em *Adequado* conforme a tabela I.

Assim, busca-se uma racionalização do uso do comutador de tap. Em condições de carga Média/Pesada, para manter a tensão em níveis mais elevados, um maior número de comutações será necessário; por outro lado, em condições de carga Mínima/Leve, o número de comutações de tap será otimizado.

Este tipo de flexibilidade é possível devido à capacidade dos sistemas *fuzzy* se adaptarem automaticamente às mudanças que venham a ocorrer na demanda de carga do sistema elétrico, quer sejam elas decorrentes de oscilações normais ao longo do tempo, quer advenham de alterações na configuração do sistema como, por exemplo, de manobras ou da expansão do sistema elétrico.

Desta forma, evita-se que a ocorrência de eventos imprevistos na rede, tais como o isolamento de um trecho ou entrada de nova carga, tenha como consequência o fornecimento de tensão acima ou abaixo dos limites preestabelecidos para cargas consumidoras, além do uso desordenado do comutador de tap. Essa característica adaptativa do relé inteligente se mostra capaz de atuar em qualquer subestação de distribuição de energia elétrica, contribuindo ainda para reduzir o tempo destinado aos estudos que visam ajustes operacionais quando comparado ao relé convencional. Conforme observado na figura 1, os parâmetros de entrada são processados pelo relé inteligente de forma que os resultados das saídas possam ser inferidos pelo mesmo. As entradas foram definidas como sendo a *carga*, representada pela *potência ativa* que foi normalizada para valores entre 0.5 e 1.5, e o *desvio* da tensão em p.u.

A normalização da *potência ativa* foi feita em relação a um valor médio por meio de análises fundamentadas em dados históricos. Desta forma, para o funcionamento de tal estratégia é necessário o ajuste deste valor de potência média, objetivando que o sistema *fuzzy* possa se adaptar a qualquer subestação. Este valor de ajuste pode ser parametrizado diretamente pelo usuário, ou ainda, poderá ser obtido através de uma rotina que seja capaz de calcular a potência média com base em dados históricos.

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

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

onde  $V_{medido}$  é a magnitude da tensão de fase (p.u.) e  $V_{referencia}$  é a tensão de referência do sistema ( $V_{referencia} = 1$  p.u.).

A entrada da potência ativa foi modelada com apenas duas funções de pertinência, pois se deseja que o comportamento do sistema *fuzzy* consiga 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. Os formatos das funções de pertinência *fuzzy* deste parâmetro são mostrados na figura 2.

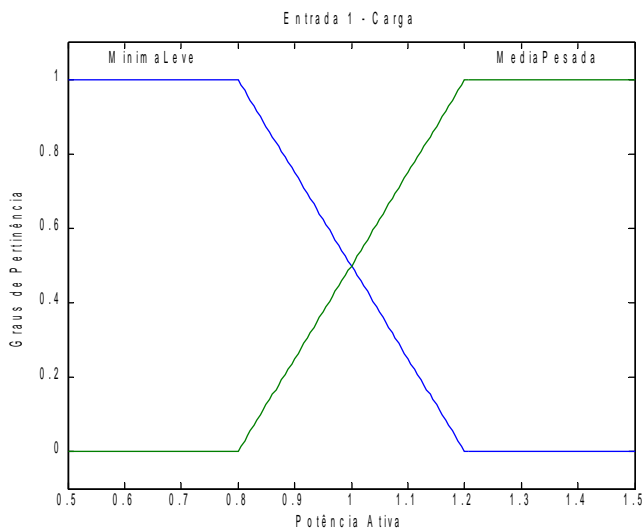


Figura 2. Entrada 1 do sistema *Fuzzy*.

Pode-se observar na figura 2 que todos os valores de potência vindos da medição são normalizados em torno de um valor médio. Assim, quanto mais próximo da média histórica de carga da subestação de distribuição estiver um valor de medição, mais próximo de 1 estará o valor normalizado.

Devido à excelente capacidade de interpretar regiões de fronteiras que os sistemas *fuzzy* possuem, uma grande região de indecisão entre as situações de carga *Mínima/Leve* e *Média/Pesada* foi implementada (figura 2), pois dessa forma haverá maiores contribuições das regras ativas para a composição da saída. Já o parâmetro de entrada *desvio* de tensão foi representado em todo o seu universo de discurso através de quatro funções de pertinência como ilustradas na figura 3, onde os termos utilizados foram *NegativoGrande*, *DI* (*DesvioInferior*), *DS* (*DesvioSuperior*) e *PositivoGrande*.

As faixas de desvios de tensão compreendidas por *DI* e *DS* foram criadas como faixas adicionais do desvio da tensão. Tal procedimento foi adotado para permitir maiores níveis de tensão em carga *Média/Pesada* e menores comutações de tap em carga *Mínima/Leve*.

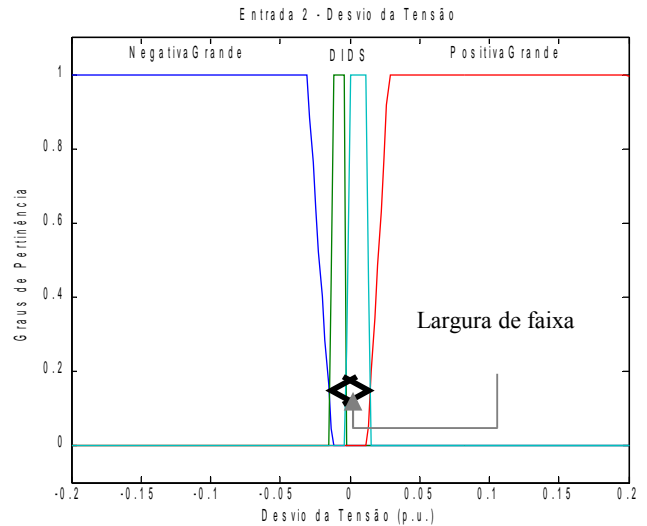


Figura 3. Entrada 2 do sistema *fuzzy*.

A largura de faixa de atuação do relé *fuzzy* é definida por meio dos pontos de cruzamento das funções de pertinência *DI* e *DS* com *NegativoGrande* e *PositivoGrande*, respectivamente. O ponto comum entre *DS* e *PositivoGrande* indica o limite superior da faixa, enquanto que o ponto comum entre *NegativoGrande* e *DI* indica o limite inferior da faixa. Os desvios *DS* e *DI* estão também em conformidade com a faixa de tensão *Adequada* indicada na tabela I.

O parâmetro linguístico de saída (*tap*) foi mapeado por meio de três funções de pertinência, ou seja, *sobe*, *desce* e *mantém*. O termo *sobe* representa comutar o tap de forma a elevar a tensão. O termo *desce* indica uma operação de comutação de tap para abaixar a tensão e o termo *mantém* aponta que a posição do tap não deve ser alterada. A figura 4 mostra as funções de pertinência deste parâmetro de saída no sistema *fuzzy* modelado.

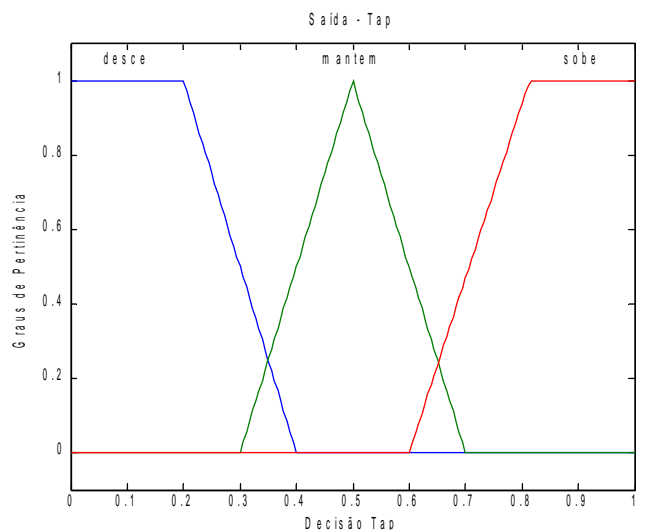


Figura 4. Saída do sistema *fuzzy*.

Neste caso, o sistema *fuzzy* atua como um classificador de padrões. Assim, deve-se interpretar a saída para inferir uma ação de comutação de tap como mostrado na tabela III, onde os limitantes intermediários 0.35 e 0.65 foram extraídos da

intersecção entre os termos desce/mantém e mantém/sobe, respectivamente.

Tabela III. Interpretação da saída *fuzzy*.

Tap	Saída do Sistema <i>fuzzy</i> (Tap)
<i>desce</i>	$0 \leq tap < 0.35$
<i>mantém</i>	$0.35 \leq tap \leq 0.65$
<i>sobe</i>	$0.65 < tap \leq 1.0$

A base de conhecimento do sistema proposto se encontra armazenada nas regras *fuzzy* do tipo *Se-Então*, as quais são apresentadas a seguir:

1. Se *desvio* é *NegativoGrande* e *carga* é *Mínima/Leve* então *tap* é *sobe*
2. Se *desvio* é *NegativoGrande* e *carga* é *Média/Pesada* então *tap* é *sobe*
3. Se *desvio* é *DS* e *carga* é *Mínima/Leve* então *tap* é *mantém*
4. Se *desvio* é *DS* e *carga* é *Média/Pesada* então *tap* é *mantém*
5. Se *desvio* é *DI* e *carga* é *Mínima/Leve* então *tap* é *mantém*
6. Se *desvio* é *DI* e *carga* é *Média/Pesada* então *tap* é *sobe*
7. Se *desvio* é *PositivoGrande* e *carga* é *Mínima/Leve* então *tap* é *desce*
8. Se *desvio* é *PositivoGrande* e *carga* é *Média/Pesada* então *tap* é *desce*

As regras 3 e 5 são responsáveis por diminuir o número de comutações de tap em situações de carga *Mínima/Leve*. A regra 6 é responsável por manter a tensão em carga *Média/Pesada* em níveis mais elevados. A regra 4 é responsável por não se realizar comutações prematuras em carga *Média/Pesada*. As demais regras são responsáveis por manter a tensão dentro dos limites de tensão *Adequada* conforme estabelecidos na tabela I.

Tais regras contêm todo o conhecimento especialista da operação do relé regulador de tensão e são definidas pela utilização do critério de correlação entre a tensão (*tap*) e a curva de carga (potência ativa), visando então determinar a posição de tap apropriado baseado no histórico e na avaliação das condições específicas de manobra, evolução de cargas e topologia da rede. Essa correlação entre as entradas e a saída do sistema pode ser mais bem compreendida por intermédio da superfície de relacionamento entrada/saída *fuzzy* registrada na figura 5, a qual é resultante da aplicação das regras anteriores para valores discretizados de *carga* e *desvio* de tensão.

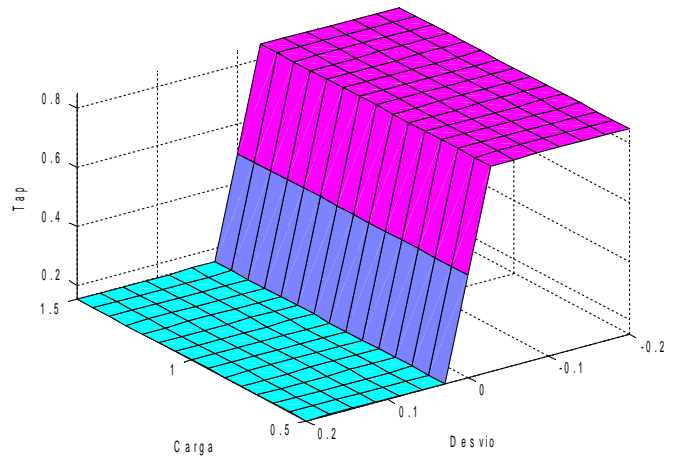


Figura 5. Superfície *fuzzy* de relacionamento entre entradas e saída.

O processo de inferência adotado no sistema *fuzzy* proposto foi o max-min, tendo como método de defuzzificação de saída o centro de área. Uma descrição detalhada de todos aspectos envolvendo a teoria de sistemas *fuzzy* pode ser encontrada em [12,13].

### III. ASPECTOS DOS PROCEDIMENTOS DE SIMULAÇÃO USANDO DADOS REAIS

O sistema de controle proposto neste artigo e também o relé convencional foram implementados e simulados em ambiente *Matlab/Simulink*. Tais 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 do relé *fuzzy* e convencional que realizam suas operações matemáticas para decidir sobre comutar ou não o tap. Na figura 6 se encontra o modelo simplificado de simulação utilizando o 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.

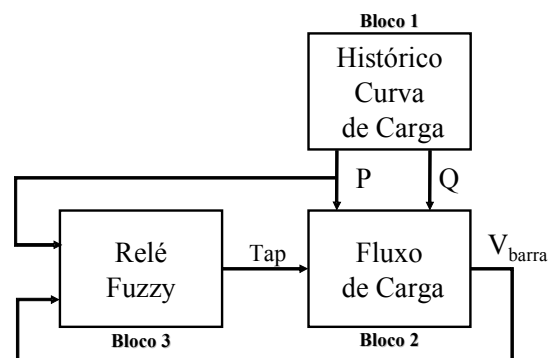


Figura 6. Modelo simplificado de simulação para o relé *fuzzy*.

O uso do fluxo de carga simplificado foi necessário para se poder estimar a tensão na subestação pela realização de uma simulação dinâmica bastante eficiente, pois como se objetiva apenas atuar na subestação, a modelagem completa das subestações, incluindo todos os detalhes do alimentador, deixaria extremamente complexo o modelo de simulação. Assim, utilizando-se então de dados reais de potência ativa e reativa em função do tempo, observados no barramento secundário das subestações, foi também possível realizar simulações bem rápidas.

As subestações utilizadas para simulações foram Andradina (Transformador 1), Cordeirópolis (Transformador 2), Mogi Guaçu 2 (Transformador 1). Tais subestações, pertencentes à empresa ELEKTRO, foram escolhidas em virtude de suas curvas de carga representarem diferentes perfis de consumidores, as quais compreendem um período total de 7 dias entre 19/06/2006 e 26/06/2006, com medições de potência ativa e reativa aquisitadas em intervalos de 10 minutos.

Para uma melhor caracterização da simulação da estratégia, torna-se necessário utilizar um intervalo de tempo menor. Uma reamostragem feita com intervalo de 10 segundos entre as medições foi realizada por intermédio do método numérico de interpolação linear, transformando as informações originais com intervalo de medição de 10 minutos em dados discretizados de 10 em 10 segundos. Após este processo, as informações de potência ativa e reativa podem então ser aplicadas nas simulações.

Deve-se destacar um aspecto relevante em relação ao intervalo de tempo de medição. Ao se realizar o processo de reamostragem, indispensável para as simulações, a cada 1 ponto original fornecido pela ELEKTRO são então acrescentados 60 pontos (10 minutos, de 10 em 10 segundos) com comportamento linear.

Como consequência deste procedimento, espera-se um número de comutações menor que os registrados pelos dispositivos da concessionária, tanto para as simulações convencionais quanto para as inteligentes, uma vez que a reamostragem irá substituir o comportamento desconhecido para os 10 minutos entre cada ponto original por pontos espaçados linearmente e com intervalo de 10 segundos.

Desta forma, apesar dos números de comutações estarem distantes de valores de comutações reais, as simulações convencionais e *fuzzy* se encontram na mesma base de tempo e podem então ser comparadas em termos percentuais.

Tabela IV. Potência média e dados dos transformadores das subestações simuladas.

Subestação	Potência Ativa Média (MW)	Número de taps	Variação Máxima de tensão (%)
<b>Andradina (Transformador 1)</b>	9.893	33	$\pm 17.637$
<b>Cordeirópolis (Transformador 2)</b>	12.956	33	$\pm 17.577$
<b>Mogi Guaçu 2 (Transformador 1)</b>	2.660	33	$\pm 17.589$

A tabela IV apresenta os valores de potência média

associada a cada subestação, bem como os dados dos transformadores. Observa-se também que foram simuladas situações distintas de comportamento médio de carga. A subestação de Andradina alimenta cargas com predominância rural. A subestação Cordeirópolis possui uma carga altamente resistiva devido à atividade industrial de cerâmicas. Em Mogi Guaçu há uma geração conectada na barra da subestação. A variação máxima da tensão permitida para os transformadores se refere a uma tensão de 13.8 kV. A tensão de referência adotada para as simulações foi de 14.1 kV, com largura de faixa de 1.25% em relação à referência (352.5 V) e temporização de comutação de 90 segundos.

A tensão de referência e a largura de faixa foram ajustadas de acordo com informações da própria empresa concessionária de energia.

#### IV. RESULTADOS DE SIMULAÇÕES USANDO DADOS REAIS

A partir da figura 7, pode-se observar o perfil de tensão obtido com as simulações da subestação Andradina (Transformador 1) tanto para a estratégia convencional quanto para as inteligentes. Nesta figura também se encontram registradas as tensões médias obtidas para o período de simulação. A estratégia *fuzzy* obteve uma tensão média de 25 V mais elevada que a média obtida com o sistema convencional. O número de comutações obtido para as simulações foi de 15 e 25 para o sistema convencional e *fuzzy* de controle de tensão, respectivamente.

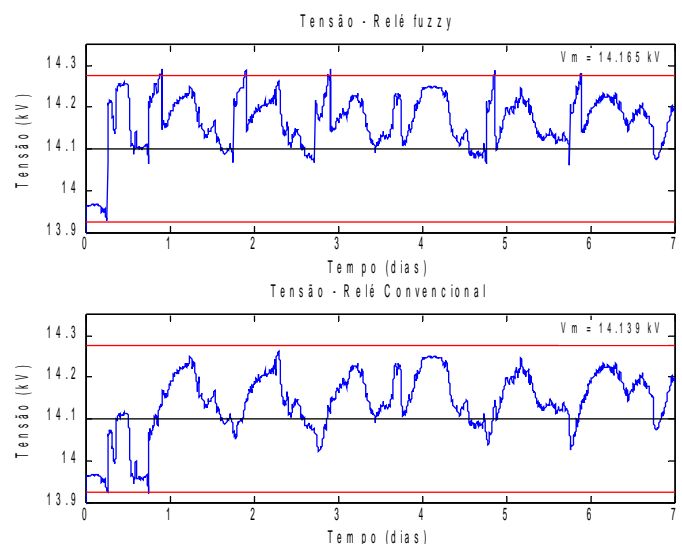


Figura 7. Perfis de tensão para Andradina (Transformador 1).

O aumento de comutações observado para a estratégia *fuzzy* já era esperado, conforme discutido anteriormente. No entanto, uma melhora significativa foi obtida em carga pesada como pode ser observado nas comparações dos perfis de tensão resultantes da aplicação das estratégias de controle *fuzzy* e convencional para a subestação Andradina (Transformador 1).



Observa-se na figura 8 que em todos os trechos de carga pesada a tensão foi mantida acima da referência para a estratégia *fuzzy*.

Os reais benefícios obtidos com a estratégia *fuzzy* podem ser contemplados na figura 9, onde estão registradas as tensões médias para os níveis de cargas pesadas obtidos na subestação Andradina (Transformador 1).

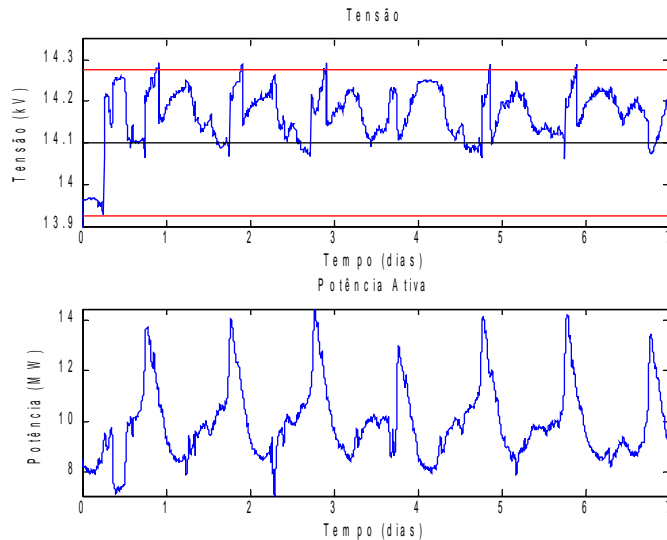


Figura 8. Tensão em carga pesada para a estratégia fuzzy obtida para Andradina (Transformador 1).

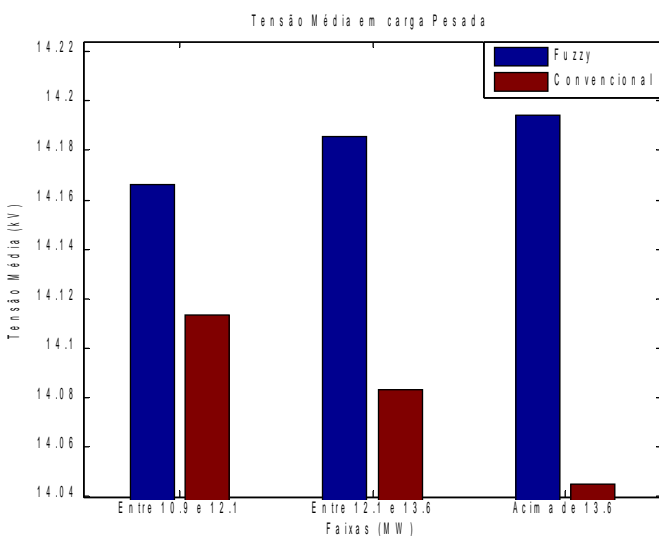


Figura 9. Tensão média em carga pesada para Andradina (Transformador 1).

Para todos os níveis de carga pesada avaliados, a tensão média para a estratégia adaptativa foi mais elevada se comparada com a obtida pela estratégia de controle de tensão convencional. Para a faixa de carga mais pesada, acima de 13.6 MW, o controle *fuzzy* manteve a tensão 149V mais elevada que a tensão média realizada pelo *Controle de Tensão Convencional* (CTC). Na tabela V se encontram registrados os principais resultados de simulação obtidos para Andradina (Transformador 1).

Tabela V. Principais resultados de simulação para Andradina (Transformador 1).

Faixas de Carga Pesada (MW)	Tensão Média (V) (CTC)	Ganho Médio (V) (SF)
Entre 10.9 e 12.1	14114	52
Entre 12.1 e 13.6	14084	102
Acima de 13.6	14045	149
<b>Tensão média<sup>1</sup></b>	<b>14138</b>	<b>14164</b>
<b>Nº Comutações</b>	<b>15</b>	<b>25</b>

<sup>1</sup> Tensão média para 7 dias de simulação.

A partir da tabela V, pode-se comprovar que para todas as faixas de carga pesada a estratégia adaptativa teve ganho em tensão média quando comparadas à estratégia convencional. As tensões médias para os 7 dias de simulação também foram mais elevadas para a estratégia proposta.

O aumento no número de comutações de tap é devido ao fato de que agora não mais existe a zona morta para os relés adaptativos. Assim, há a exploração contínua dessa região visando melhorar o perfil de tensão. A seguir, nas tabelas VI e VII, encontram-se registrados os principais resultados obtidos para as demais subestações.

Tabela VI. Principais resultados de simulação para Cordeirópolis (Transformador 2).

Faixas de Carga Pesada (MW)	Tensão Média (V) (CTC)	Ganho Médio (V) (SF)
Entre 14.3 e 15.0	14038	154
Entre 15.0 e 15.9	14038	157
Acima de 15.9	14003	158
<b>Tensão média<sup>1</sup></b>	<b>14089</b>	<b>14159</b>
<b>Nº Comutações</b>	<b>27</b>	<b>49</b>

Tabela VII. Principais Resultados de Simulação para Mogi Guaçu 2 (Transformador 1).

Faixas de Carga Pesada (MW)	Tensão Média (V) (CTC)	Ganho Médio (V) (SF)
Entre 2.93 e 4.71	14036	141
Entre 4.71 e 6.75	14017	142
Acima de 6.75	13981	142
<b>Tensão média<sup>1</sup></b>	<b>14045</b>	<b>14171</b>
<b>Nº Comutações</b>	<b>14</b>	<b>19</b>

## V. ANÁLISE DE RESULTADOS

Em todas as subestações simuladas houve melhoras na tensão média quando se empregou a estratégia *fuzzy*. A subestação Cordeirópolis (tabela VI), de acordo com a própria concessionária de energia que a administra, possui um comportamento de carga de difícil controle de tensão. Para tal subestação, observa-se uma melhora significativa de tensão média em carga pesada quando da utilização da estratégia adaptativa.



Para a subestação Mogi Guaçu (tabela VII) é possível se comprovar a eficiência, principalmente do sistema *fuzzy*, em elevar a tensão média em carga pesada, buscando uma racionalização do uso de comutações de tap. Excelentes resultados foram obtidos sem aumento excessivo de comutações.

De uma maneira geral, verifica-se um melhor desempenho do controle inteligente, tanto em elevar a tensão média em carga pesada como em racionalizar o número de comutações de tap. Em suma, o sistema proposto se mostrou extremamente eficiente no controle da tensão, atuando-se apenas no barramento secundário do transformador principal da subestação.

Este fato reforça a idéia de que este tipo de controle pode ser realizado por meio de sistemas inteligentes. Além disso, a estratégia *fuzzy* pode ser implementada em hardware com relativa facilidade. Isto porque uma vez modelado o sistema *fuzzy*, basta-se utilizar a superfície *fuzzy* de relacionamento entre entradas/saída (figura 5).

O armazenamento das mesmas em memória torna desnecessária a implementação de todo o processo de inferência *fuzzy* em hardware, o que poderia inviabilizar a implementação da estratégia *fuzzy* adaptativa para atuação em tempo-real.

## VI. CONCLUSÕES

Ultimamente se tem verificado junto ao cenário atual do setor elétrico brasileiro uma constante busca pela melhoria dos serviços prestados pelas empresas distribuidoras de energia elétrica aos seus consumidores. De fato, tal busca implica na melhoria tanto da qualidade do fornecimento de energia elétrica como da qualidade do produto a ser disponibilizado aos consumidores. De maneira ampla, pode-se caracterizar todo este empenho tendo como objetivos a melhoria na confiabilidade e robustez da operação dos sistemas de distribuição de energia elétrica.

Este trabalho apresentou inúmeros desafios, principalmente em relação às normalizações necessárias para se deixar a estratégia *fuzzy* genérica. A normalização por meio da potência ativa média se mostrou um excelente parâmetro de regulação para todas as subestações testadas.

O sistema de controle de tensão proposto apresentou também ótimos resultados quando aplicados na regulação de tensão de três subestações testadas. É importante frisar que tais subestações representam os mais diversificados comportamentos de cargas presentes no setor elétrico brasileiro. Por meio dos resultados obtidos, evidenciou-se a adaptabilidade da estratégia proposta frente a esses diferentes comportamentos de carga.

Pelos resultados, comprova-se então que para elevar a tensão média são necessárias mais comutações, principalmente em cargas pesadas, sendo que a economia de comutações ocorre quando o sistema se encontra em carga leve. Por intermédio das curvas reais de demanda utilizadas nas simulações, o sistema *fuzzy* desenvolvido se mostrou eficiente em manter a tensão média mais elevada.

Assim, torna-se de grande valia destacar o desempenho da estratégia inteligente frente aos objetivos delineados no começo deste trabalho. A validação da estratégia inteligente, 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.

Finalmente, a partir dos resultados das simulações realizadas, a estratégia *fuzzy* foi então implementada em hardware digital, sendo este um dos produtos de inovação tecnológica advindo deste projeto de P&D. Os protótipos desenvolvidos têm sido exaustivamente testados na regulação da tensão de dois transformadores da subestação Mogi Guaçu 2 (ELEKTRO), cujos resultados têm sido bem promissores e condizentes com aqueles obtidos nas simulações.

## VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] *Resolução Nº 505/2001* – Estabelece de forma atualizada e consolidada, as disposições relativas à conformidade dos níveis de tensão de energia elétrica em regime permanente. ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <http://www.aneel.com.br>. Acessado em: 26 de julho de 2006.
- [2] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso, H. W. Beaty, *Electrical Power Systems Quality*, 2<sup>nd</sup> ed., New York: McGraw Hill, 2003. 528 p.
- [3] T. A. Short, *Electric Power Distribution Handbook*, New York: CRC Press, 2003. 784 p.
- [4] J. H. Choi, J. C. Kim, "The online voltage control of ULTC transformer for distribution voltage regulation", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 23, pp. 91-98, 2001.
- [5] H. L. Willis, *Characteristics of Distribution Loads, Electrical Transmission and Distribution Reference Book*, Raleigh, NC, ABB Power T&D Company, 1997.
- [6] Z. Hu, X. Wang, H. Chen, G. A. Taylor, " Volt/VAR control in distribution systems using a time-interval based approach," in *Proc. 2003 IEE Generation, Transmission and Distribution*, pp. 548-554.
- [7] Y. Liu, P. Zhang, X. Qiu, "Optimal volt/var control in distribution systems", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 24, n. 4, pp. 271-276, 2002.
- [8] Y. Y. Hsu, F. C. Lu, "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.
- [9] R. H. Liang, Y. S. Wang, "Fuzzy-based reactive power and voltage control in a distribution system", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 18, n. 2, pp. 610-618, 2003.
- [10] M. Dixon, "Innovative Volt/VAR management provides payback", in *Proc. 2001 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, pp. 461-468.
- [11] C. C. Lee, "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.
- [12] W. Pedrycz, F. Gomide, *An Introduction to Fuzzy Sets: Analysis and Design*, Cambridge: The MIT Press, 1998. 465p.
- [13] T. J. Ross, *Fuzzy Logic with Engineering Applications*, 2nd ed., New York: John Wiley & Sons, 2004, 650p.