
REGULAÇÃO AUTOMÁTICA DE TENSÃO EM TRANSFORMADORES DE SUBESTAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO USANDO IMPLEMENTAÇÃO FUZZY

Danilo H. Spatti*

Ivan N. Silva*

Wesley F. Usida*

Rogério A. Flauzino*

*Universidade de São Paulo,
Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia Elétrica
CP 359, CEP 13566.590, São Carlos, SP

RESUMO

Este trabalho apresenta um controlador fuzzy para realizar o ajuste automático de tensão em transformadores de subestação de distribuição de energia elétrica. Tal controle atuará em tempo-real nos transformadores dotados de comutadores de tap sob carga. O sistema inteligente foi empregado para tornar o relé regulador de tensão adaptativo. Ainda como foco do estudo, pretende-se atuar apenas na subestação de distribuição, realizando medições no barramento secundário e implementando ações de controle também neste barramento. A capacidade dos sistemas fuzzy em tratar incertezas, assim como sua habilidade em interpretar informações qualitativas, permitiu a formulação de uma estratégia de controle de tensão que atende a todas as regulamentações dos órgãos fiscalizadores brasileiros e, também, os anseios das concessionárias de distribuição frente aos aspectos relacionados com a qualidade de energia, pois os resultados obtidos foram bem satisfatórios.

PALAVRAS-CHAVE: Comutador de tap, sistema de distribuição, sistemas fuzzy, relé regulador de tensão.

ABSTRACT

Voltage Regulation in Power Distribution Substation Transformer Using Fuzzy Implementation

A fuzzy controller is introduced in this paper in order to make the voltage adjustment in power distribution substation transformer. The real-time controller in each case would act on power transformers equipped with under-load tap changers. Learning systems are employed to turn the voltage-control relays into adaptive devices. The scope of the present study has been limited to the power distribution substation, and both the voltage measurements and control actions are carried out on the secondary bus. The capacity of fuzzy systems to handle approximate data, together with their unique ability to interpret qualitative information, make it possible to design voltage control strategies that satisfy both the requirements of the Brazilian regulatory bodies and the real concerns of the electric power distribution companies in relation to the aspects involved with power quality, since the test results were highly satisfactory.

KEYWORDS: Tap changer, distribution system, fuzzy systems, voltage regulator relay.

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica é um produto indispensável para a manutenção das atividades da sociedade. A constante busca por uma melhor qualidade no fornecimento dos

Artigo submetido em 13/04/2010 (Id.: 01130)

Revisado em 20/08/2010, 24/11/2010

Aceito sob recomendação do Editor Associado Prof. Antonio Carlos Zambroni de Souza

níveis de tensão apenas reforça este fato. A aplicação crescente de técnicas de sistemas inteligentes, agregadas às técnicas convencionais, tem gerado resultados bem 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 inteligentes, notadamente aqueles baseados nos controladores fuzzy, possui elevado potencial de aplicação em sistemas dedicados ao controle de tensão, pois as suas características mais atrativas consistem da elevada habilidade em tratar problemas não-lineares e em manipular as eventuais incertezas associadas aos mesmos.

Como exploradoras do sistema elétrico brasileiro, as concessionárias de energia estão sujeitas às regulamentações 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 505/2001 (ANEEL, 2001) define quais os níveis mais adequados que a empresa distribuidora de energia deve fornecer aos seus consumidores. Recentemente, todos os aspectos regulatórios voltados para a distribuição de energia foram reunidos e debatidos em audiências públicas promovidas pela ANEEL, e por representantes do setor elétrico, com o intuito de consolidar os diversos aspectos envolvendo qualidade de energia, tanto em relação ao produto como ao serviço (Usida *et alii*, 2009).

Como resultado de tais debates, um conjunto de diretrizes, denominado “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST)”, foi instituído, o qual se caracteriza como o documento mais moderno e completo sobre os níveis de tensão em regime permanente aplicáveis ao setor elétrico brasileiro (ANEEL, 2009). O PRODIST concentrou informações contidas em diversas resoluções da ANEEL, sendo que a Resolução 505/2001 continua em vigor.

No aspecto de regulação de energia é preciso levar em consideração tais documentos, pois neles estão contidas todas as informações pertinentes aos níveis de tensão operativos e não operativos para o regime permanente. A Tabela 1 sintetiza a classificação das faixas de tensão adotadas no sistema elétrico brasileiro, para níveis de tensão entre 1 kV e 69 kV, no ponto de entrega ou conexão (ANEEL, 2001).

A partir da análise da Tabela 1 verifica-se que tensões compreendidas entre 0.93 e 1.05 p.u., em relação a uma tensão nominal de 1 p.u., se encontram dentro da faixa de tensão denominada *Adequada*, a qual é a faixa operativa dos

Tabela 1: Classificação das faixas de tensão em regime permanente.

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 $V > 1.05$

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 também danificar os equipamentos dos consumidores. Se o tempo de fornecimento nesta faixa for superior a 1 minuto, pode-se então caracterizar uma sobretensão nos consumidores (Dugan *et alii*, 2003). 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 (Dugan, 2003).

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* (ANEEL, 2001).

Desta forma, pode-se enquadrar em níveis operativos, valores de tensão compreendidos apenas pela faixa *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.

De fato, as análises de tempo são realizadas em um período de 7 dias, com leituras realizadas a cada 10 minutos. A ANEEL exige que as concessionárias de energia mantenham uma base de dados de 1 ano no passado, contendo as mesmas informações de tensão, corrente, potência ativa, etc. para fins de análise de qualidade de energia e pesquisa. Tais informações são armazenadas em seus valores médios, calculados a cada 10 minutos. A base de dados de regulação disponibilizada pelas concessionárias, portanto, é constituída por variáveis médias adquiridas em intervalos discretos de 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. como para inferiores a 0.9 p.u., cujo índice foi estabelecido em 0.5%

(ANEEL, 2001).

Levando-se em consideração todos os aspectos anteriores envolvidos com a conformidade dos níveis de tensões, bem como com os tempos de transgressão, este trabalho tem como objetivo propor uma estratégia de controle de tensão que contemple os seguintes aspectos:

1. Atuar de forma automática apenas no transformador principal da subestação de distribuição.
2. Flexibilizar as operações do comutador de tap do transformador principal, sobretudo, em situações onde a carga não é elevada, o que implica na diminuição de comutações desnecessárias.
3. Melhorar o perfil de tensão no barramento secundário da subestação de distribuição, especialmente para condições de carga pesada.

Para tanto, uma aproximação inicial para a modelagem de um alimentador de distribuição pode ser efetuada de acordo com as recomendações contempladas na Tabela 2 (Willis, 1997).

Tabela 2: Aproximações sugeridas para modelagem de alimentadores de distribuição.

Tipo do Alimentador	Potência Constante (%)	Impedância Constante (%)
Residencial e Comercial ⁽¹⁾	67	33
Residencial e Comercial ⁽²⁾	40	60
Urbano	50	50
Industrial	100	0
Países em Desenvolvimento	25	75

(1) Pico do verão (2) Pico do inverno

Existem, no entanto, situações particulares em que o comportamento da carga precisa ser mais bem investigado a fim de constituir um modelo que a represente de maneira adequada. Em tais situações, as sugestões conditas na Tabela 2 são então inapropriadas. Um exemplo é a situação de uma indústria cerâmica, que poderia ser enquadrada como uma carga industrial com comportamento de 100% em Potência Constante. Porém, neste caso, o comportamento de Impedância Constante é o que melhor se enquadra, tendo-se em vista a operação de fornos elétricos neste tipo de indústria.

Outro caso seria aquele de um alimentador rural, que geralmente é modelado como se tendo um comportamento típico de carga com Potência Constante, isto devido à presença de motores utilizados na irrigação. Porém, certos

alimentadores rurais utilizados para este estudo possuem uma extensão tão grande (aproximadamente 600 km), ao ponto de serem melhores representados com comportamento de carga de Impedância Constante.

Complementarmente, a engenharia da concessionária de energia que administra as subestações de distribuição aqui utilizadas para as simulações adotam também que, em situações onde a carga é pesada, o comportamento desta é predominantemente de Impedância Constante. Este tipo de parametrização é então empregado em relés reguladores de tensão a fim de compensar a queda de tensão na linha em alimentadores que possuem, conjuntamente, cargas urbanas, rurais e industriais, os quais apresentam ainda picos frequentes de carga pesada durante o dia.

Este tipo de ação tem por objetivo deixar o perfil de tensão o mais elevado possível, dentro dos níveis operativos, para que o consumidor mais distante da subestação possa ser suprido em uma tensão regulada, mesmo diante de uma situação de carga pesada.

Em uma modelagem à Potência Constante, as potências reativas e ativas se mantêm fixas mesmo que a tensão varie, o que obriga à carga a solicitar mais corrente do sistema caso a tensão diminua (Short, 2003). Este tipo de modelagem é mais utilizado em sistemas com predominância de motores, cuja queda de tensão se acentua quando tensões mais baixas são fornecidas. Metodologias mais sofisticadas e abrangentes vêm sendo também propostas na literatura com o intuito de melhorar tais modelos, especialmente dos motores de indução em sistemas de grande porte, como pode ser observado em Ferreira *et alii* (2004) e Ferreira (2008).

Além dos objetivos já citados, este trabalho visa também a regulação de tensão com base em informações já disponíveis pelas concessionárias de energia. Determinadas informações a respeito da carga são de difícil obtenção e, mesmo que disponíveis para um grupo de alimentadores, muitas vezes não estão disponíveis para todos. Em casos de transformadores de potência com múltiplos alimentadores conectados, as informações mais comumente disponibilizadas são aquelas referentes às tensões, correntes e potências do ponto de vista do barramento secundário da subestação, fazendo-se com que modelos mais simplificados de simulação tenham que ser utilizados a fim de que todos os alimentadores possam ter seu comportamento contemplado nos processos de ajustes do sistema de controle.

No sistema elétrico brasileiro, quando se trabalha com tensões mais elevadas durante a situação de carga pesada, há uma melhoria da performance de todos os tipos de modelagens. Por outro lado, as correntes tendem a aumentar e, conseqüentemente, também as perdas técnicas. Uma elevação nas perdas técnicas em torno de 1% é

considerada aceitável frente aos ganhos no perfil de tensão apresentados pela estratégia fuzzy aqui proposta, quando se assumem faixas operativas descritas na Tabela 1, e que trazem benefícios tanto para os consumidores como para as concessionárias de distribuição frente aos aspectos relacionados à qualidade de energia.

Assim sendo, a característica não previsível da carga em um sistema de distribuição torna o controle de tensão extremamente complexo, sendo que dividi-lo em dois subproblemas, um com os controles da subestação e o outro com o controle dos alimentadores, pode implicar em simplificações eficazes. Este é o caso da proposta apresentada por Liu *et alii* (1998), que utiliza programação dinâmica para resolver o problema do lado da subestação, ao passo que usa sistemas fuzzy para o lado dos alimentadores.

Outra maneira de resolver o problema do controle de tensão é o emprego de técnicas híbridas, combinando dois ou mais sistemas inteligentes. Esta é a proposta apresentada por Hsu & Lu (1998), que utiliza uma rede neural e a técnica de programação dinâmica fuzzy para realizar um despacho programado para as próximas 24 horas do dia seguinte.

Já Liang & Wang (2003) investigaram o controle de tensão e de potência reativa a fim de encontrar um despacho ótimo para o comutador de tap do transformador, bem como para o estado dos capacitores instalados ao longo dos alimentadores e também no barramento secundário da subestação, observando-se para tanto algumas horas no futuro. As considerações para a aplicação desta metodologia são também definidas em termos qualitativos. Assim, utilizaram-se sistemas fuzzy, juntamente com um método de *simulated annealing*, com o intuito de refinar as respostas produzidas.

Em Dixon (2001) é apresentada uma forma interessante de coordenação entre os dispositivos de controle de tensão em um sistema de distribuição. Nesta proposta utiliza-se o comportamento da potência reativa para coordenar, de forma automática, as ações do LTC (*Load Tap Changer*), de capacitores e de reguladores de tensão instalados ao longo do alimentador.

Outras técnicas bem similares são ainda formuladas em Liang & Cheng (2001), Augugliaro *et alii* (2004), Milosevic & Begovic (2004), Baran & El-Markabi (2007), Miranda *et alii* (2007), Park *et alii* (2007) e Carvalho *et alii* (2008), as quais também apresentam resultados interessantes e promissores.

Entretanto, todas as propostas citadas anteriormente, tanto as que utilizam ferramentas convencionais como aquelas que usam sistemas inteligentes, buscam manter a tensão a mais próxima possível da referência, a qual é parametrizada como

sendo um valor fixo. Além disso, as mesmas não elevam a tensão no barramento secundário da subestação em situações de carga pesada e, também, não evitam comutações de tap desnecessárias quando a carga é considerada leve.

Estes dois aspectos motivaram a busca por uma ferramenta inteligente que, atuando-se apenas na subestação de distribuição, pudesse agora deixar a tensão de referência dinâmica (não mais fixa), flexibilizando-se para tanto a ação dos comutadores de tap dos transformadores de potência.

Desta forma, as principais vantagens da estratégia fuzzy de controle de tensão proposta neste trabalho são as seguintes: i) adaptação automática à variação de carga na subestação; ii) elevação automática da tensão em condições de carga pesada; iii) racionalização das operações do comutador de tap em situações de carga leve; iv) saídas são produzidas de forma rápida, propiciando-se a sua aplicação em tempo-real; e v) facilidade de implementação em hardware.

Em relação ao comutador de tap, que é um dispositivo eletromecânico e, portanto, sujeito a desgastes de operação, as concessionárias normalmente adotam planos de manutenção orientados tanto ao número de comutações como também ao tempo de uso. Para os equipamentos utilizados neste trabalho, a concessionária (Elektro) considera que um ciclo de inspeção e manutenção do comutador de tap deva ser efetuado a cada 100 mil operações ou a cada 6 anos, sendo que é adotado aquele que ocorrer primeiro. Conseqüentemente, um dos objetivos da estratégia inteligente é utilizar de forma flexível as comutações de tap, a fim de manter o ciclo de 100 mil operações dentro do período de 6 anos. Os relés convencionais, independentemente da condição da carga, realizam comutações apenas quando a tensão transgride os limites operativos, o que na maioria das vezes acarreta em realizar a manutenção do comutador de tap sempre pelo período de 6 anos.

Assim sendo, um dos objetivos da estratégia inteligente desenvolvida é também utilizar de forma racionalizada o comutador de tap, com a finalidade de respeitar o ciclo de manutenção. Para tanto, as comutações extras que são necessárias para elevar a tensão em carga pesada serão compensadas com a diminuição das comutações (desnecessárias) durante aquelas situações de carga leve.

2 ASPECTOS RELACIONADOS AO SISTEMA PROPOSTO

Em um mercado cada vez mais exigente quanto à qualidade da energia elétrica, tendo-se ainda regras mais restritas para a definição dos parâmetros e dos limites de fornecimento aceitáveis, há uma necessidade crescente de ferramentas

capazes de se adequar a esta realidade e permitir uma regulação de tensão apropriada (Oleskovicz *et alii*, 2006).

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, por meio da comutação de tap do transformador. Esses principais detalhes e aspectos relacionados com as subestações de distribuição e seus elementos podem ser examinados em Kagan *et alii* (2005).

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-se sobre o comutador de tap sob carga (*LTC*) de forma a elevar ou abaixar a tensão, conforme seja necessário.

Os relés convencionais, responsáveis pela regulação de tensão, não são capazes de atuar corretamente sob algumas condições de comportamento do sistema, tais como variações atípicas de carga, pois não levam em conta o comportamento histórico de operação do sistema. Nestes casos, a carga do sistema pode fornecer informações relevantes para a correta regulação de tensão, assim como contribuir para melhorar a eficiência das comutações de tap.

O controlador proposto neste trabalho consiste de se utilizar lógica fuzzy para sugerir mudanças na tensão de referência de um relé regulador de tensão convencional. Para tanto, o parâmetro “tensão de referência” do relé regulador de tensão passa a ser dinâmico, sendo atualizado a todo o momento, e não mais parametrizado como um valor fixo. No entanto, a decisão de comutar ou não o tap é ainda realizada pelo relé regulador de tensão. Nesse caso, o sistema fuzzy é empregado como um módulo inteligente auxiliar ao relé convencional.

As decisões de operação para o sistema desenvolvido dependem do monitoramento das variáveis de entrada, ou seja, *potência ativa* e *desvio* de tensão. Um controlador fuzzy foi confeccionado para representar a base de conhecimento do relé regulador de tensão, levando-se em consideração o monitoramento dessas duas variáveis citadas. A Figura 1 ilustra o diagrama simplificado de funcionamento do controle proposto.

A partir da examinação da referida figura, observa-se que o relé irá monitorar o *desvio* percentual da tensão e a *carga* (*potência ativa*). A saída do controle fuzzy é um sinal de *estímulo* (incremento ou decremento) sobre a tensão de 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.

Tomou-se aqui a decisão de monitorar a potência ativa, ao

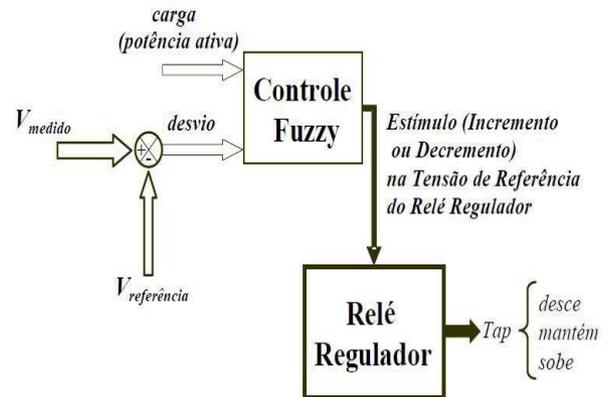


Figura 1: Diagrama simplificado de funcionamento do sistema proposto.

invés da potência reativa, após a realização de inúmeros testes. Em muitos sistemas elétricos, especialmente aqueles de transmissão, verifica-se um acoplamento da tensão com a potência reativa; porém, nos sistemas de distribuição utilizados como pilotos deste trabalho, esta variável não se mostrou interessante em termos de regulação. Isto se deve ao fato de que nos sistemas pilotos a compensação reativa se dá ao longo do alimentador, o que promove regulação entre o ponto de inserção do dispositivo até a carga à sua frente. Desta forma, a parcela de potência reativa monitorada no barramento secundário da subestação passa a não ser significativa para os propósitos de regulação delineados neste trabalho.

A tensão $V_{referencia}$ utilizada para o cálculo do *desvio* é um valor fixo, não havendo realimentação entre este valor e a tensão de referência atual do relé regulador de tensão.

Assim, este módulo inteligente irá incrementar ou decrementar a tensão de referência do relé regulador de tensão, de acordo com os limites de tensão *Adequada* especificados na Tabela 1, levando-se também em consideração os objetivos do trabalho, ou seja, elevar o perfil de tensão em carga pesada e diminuir o número de comutações de tap em carga leve.

Novamente, busca-se a flexibilização da utilização do tap, elevando-se a tensão em situações de carga *Média/Pesada*, por meio da elevação da tensão de referência, e tendo-se diminuição no número de comutações em carga *Mínima/leve* pela não alteração da tensão de referência. Ainda, por meio do sistema fuzzy, é também possível evitar comutações prematuras pela não alteração desta tensão de referência.

Os parâmetros de entrada, conforme mostrados na Figura 1, são processados pelo módulo inteligente de forma que os resultados das saídas possam ser inferidos pelo mesmo.

As entradas foram também definidas como sendo a *carga*, representada pela *potência ativa* normalizada para valores entre 0.5 e 1.5, e o *desvio* de tensão em porcentagem.

A normalização da primeira entrada (*potência ativa*) foi feita em relação a um valor médio mediante análises baseadas em dados históricos. Um valor inicial de potência ativa média deve ser utilizado até que uma quantidade suficiente de amostras tenha sido armazenada, as quais serão utilizadas nos cálculos automáticos de potência média histórica. Neste caso, utilizaram-se sempre os dados históricos registrados nos últimos 7 dias de operação.

Os termos das funções de pertinência para a *potência ativa* são apresentados na Figura 2. Novamente, 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 se levando sempre em consideração os limites estabelecidos na Tabela 1.

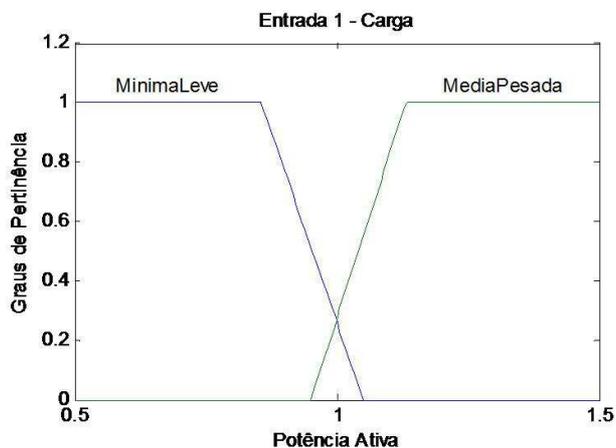


Figura 2: Entrada 1 – Parâmetro *carga* do sistema fuzzy.

A segunda entrada (*desvio* de tensão) é calculada usando a expressão dada por:

$$desvio = \left(\frac{V_{medido} - V_{referencia}}{V_{referencia}} \right) \cdot 100 \quad (1)$$

onde V_{medido} é a magnitude da tensão de fase e $V_{referencia}$ é a tensão de referência do sistema.

Tal *desvio* foi representado 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 a fim de elevar a tensão em situações de carga *Média/Pesada*, assim como diminuir as comutações em carga *Mínima/Leve*.

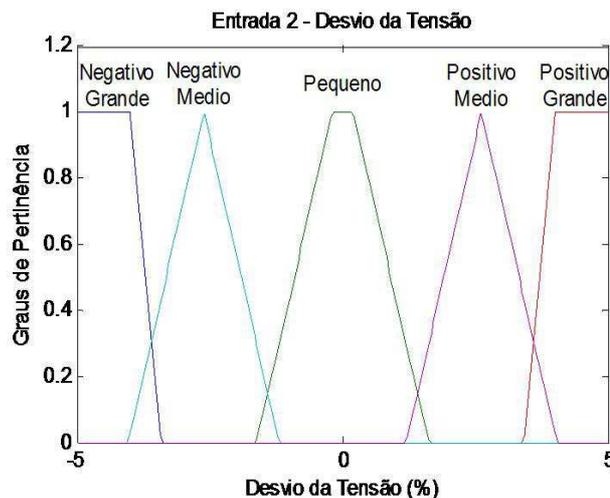


Figura 3: Entrada 2 – Parâmetro *desvio* de tensão do sistema fuzzy.

A *Largura de Faixa* de atuação do controle fuzzy, conforme ilustrada na Figura 3, é definida por meio dos pontos de cruzamento das funções de pertinência da entrada *desvio* de tensão, onde o ponto comum entre *Pequeno* e *PositivoMedio* indica o limite superior da faixa, enquanto que o ponto comum entre *NegativoMedio* e *Pequeno* indica o limite inferior da faixa.

O parâmetro lingüístico de saída do controlador, ou seja, o *estímulo* (incremento ou decremento) 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-se então ajustar (incrementar ou 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 em regras fuzzy do tipo *Se-Então*, as quais são apresentadas a seguir:

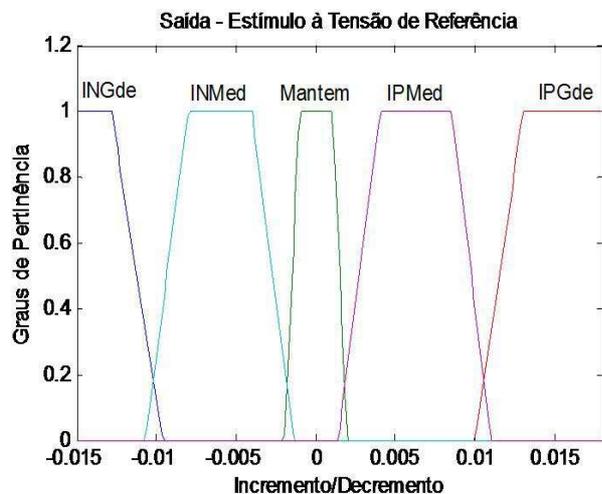


Figura 4: Saída - Parâmetro estímulo de tensão ao $V_{referência}$ do sistema fuzzy.

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
3. Se carga é Mínima/Leve e desvio é Pequeno então estímulo é Mantém
4. Se carga é Mínima/Leve e desvio é Positivo Médio então estímulo é Mantém
5. Se carga é Mínima/Leve e desvio é Positivo Grande então estímulo é INGde
6. Se carga é Média/Pesada e desvio é Negativo Grande então estímulo é IPGde
7. Se carga é Média/Pesada e desvio é Negativo Médio então estímulo é IPGde
8. Se carga é Média/Pesada e desvio é Pequeno então estímulo é IPMed
9. Se carga é Média/Pesada e desvio é Positivo Médio então estímulo é INMed
10. Se carga é Média/Pesada e desvio é Positivo Grande então estímulo é INMed

As regras de 2 a 4 são responsáveis pela redução de comutações em carga Mínima/Leve, as quais não alteram a tensão de referência. Já as regras de 6 e 7 indicam que os

estímulos de incrementos positivos, ou seja, para elevar a tensão, em carga pesada, serão sempre grandes; ao passo que os estímulos de decrementos (regras de 9 e 10) são sempre médios, mantendo-se então a tensão mais elevada e dentro da *Largura de Faixa* operativa. As demais regras são utilizadas para manter a tensão de acordo com os níveis estabelecidos na Tabela 1, evitando-se também comutações prematuras. A superfície fuzzy representando o relacionamento entre as entradas (*carga* e *desvio*) e a respectiva saída (*estímulo*) pode ser visualizada por meio da Figura 5.

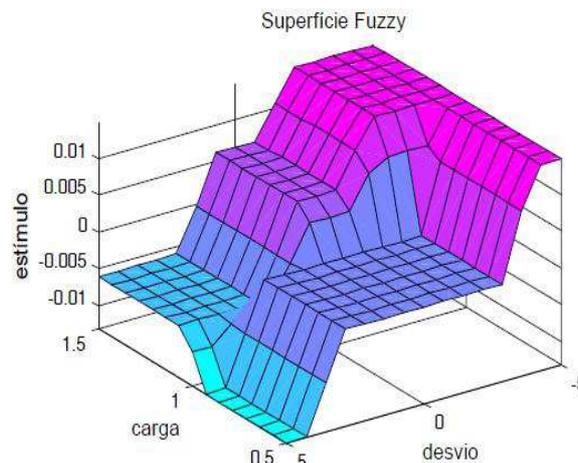


Figura 5: Superfície fuzzy de relacionamento entre as entradas (*carga* e *desvio*) e saída (*estímulo*).

O processo de inferência adotado no sistema proposto foi o *max-min*, tendo-se como método de *defuzzificação* de saída o centro de área. Uma descrição detalhada destes aspectos envolvidos com a teoria fuzzy pode ser contemplada em Pedrycz & Gomide (2007) e Ross (2004)

3 ASPECTOS DOS PROCEDIMENTOS DE SIMULAÇÃO UTILIZANDO DADOS REAIS

Para investigar o comportamento da abordagem proposta neste artigo, o software *Matlab/Simulink* foi usado para implementar a abordagem convencional e a estratégia fuzzy. Utilizando-se de dados reais, foram realizadas inúmeras análises de fluxo de carga, envolvendo-se dados de potência ativa e reativa, a fim de se determinar a tensão no barramento secundário de subestações pilotos, as quais são administradas pela concessionária Elektro.

Auxiliar ao sistema de simulação, um modelo de fluxo

de carga simplificado foi implementado com o objetivo de estimar, por meio de um método iterativo eficiente, a tensão nas subestações levando-se em conta cada valor de potência ativa e reativa, as quais foram fornecidas por meio de curvas reais. Os valores estimados de tensão são então apresentados às simulações do relé fuzzy e convencional, que realizam suas operações matemáticas para decidir sobre a comutação ou não do tap. Na Figura 6 encontra-se o diagrama deste fluxo de carga simplificado.



Figura 6: 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-se então a fornecer dados dinâmicos de tensão. Os passos algorítmicos deste modelo simplificado são os seguintes:

1. Coletar a tensão primária do barramento (V_p), posição atual do tap (Tap), admitância do sistema (fonte + transformador) em relação ao tap atual ($Y_{fonte}^{(Tap)}$), potência ativa (P) e reativa (Q) a partir dos dados históricos;
2. Calcular a potência aparente base do sistema (S_b) usando-se P e Q , e determinar a sua impedância base (Z_b) por meio de S_b e V_p ;
3. Calcular a impedância da carga (Z_{carga}) usando P , Q , S_b e Z_b , isto é, $Z_{carga}(k) = |V_{bar}(k)|^2 / (P - jQ)$;
4. Com os parâmetros elétricos calculados anteriormente, incluindo Z_{carga} , obter a tensão (V_{bar}) no barramento secundário da subestação por meio da seguinte expressão:

$$V_{bar}(k+1) = V_p \cdot Y_{fonte}^{(Tap)} / (Y_{fonte}^{(Tap)} + 1/Z_{carga}(k));$$

5. Repetir os passos 3 e 4 até V_{bar} convergir.

Como se objetiva apenas atuar na subestação, a modelagem completa das subestações, incluindo-se 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 nos barramentos secundários das subestações, foi também possível realizar simulações bem rápidas a partir deste modelo simplificado de fluxo de cargas.

As subestações utilizadas para simulações foram Andradina (Transformador 1 e 2), Cordeirópolis (Transformador 1 e 2), Mogi Guaçu 2 (Transformador 1 e 2), Ubatuba 1 (Transformador 2), Ubatuba 2 (Transformador 2) e Votuporanga 1 (Transformador 1 e 2). Tais subestações foram escolhidas em virtude de suas curvas de carga representar diferentes perfis de consumidores, as quais compreendem um período total de 7 dias, com medições de potência ativa e reativa aquisitadas em intervalos de 10 minutos.

Para uma melhor caracterização das simulações da estratégia de controle, torna-se necessário utilizar um intervalo de tempo menor, pois as amostras com discretização em 10 minutos, fornecidas pela companhia, são inapropriadas para os procedimentos de ajuste do sistema fuzzy.

Dependendo da subestação, o tempo de operação da comutação de tap pode ser maior ou menor que 1 minuto. Assim, uma reamostragem feita com intervalo de 10 segundos entre as medições foi realizada, por intermédio do método numérico de interpolação linear, transformando-se as informações originais com intervalo de medição de 10 minutos em dados discretizados para intervalo de 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 (descretização de 10 minutos), advindo da amostragem real, é então acrescentado 60 pontos (descretização de 10 segundos) com comportamento linear.

Como conseqüência deste procedimento, espera-se um número de comutações menor que aqueles registrados pelos dispositivos da concessionária, tanto para a simulação convencional quanto para a inteligente, uma vez que a reamostragem irá substituir o comportamento desconhecido (para os 10 minutos entre cada ponto original) por pontos espaçados linearmente e com intervalos de 10 segundos.

Desta forma, apesar dos números de comutações poderem estar distantes de valores de comutações reais, a simulação

convencional e fuzzy se encontram na mesma base de tempo e podem então ser comparadas. Na Tabela 3 se encontram registrados os valores de potência média associados a cada subestação, bem como os dados dos transformadores.

Como a operação de comutação de tap pode ser maior ou menor que 1 minuto, um número massivo de simulações foi realizado inicialmente com o propósito de se determinar o melhor passo de simulação frente ao relé regulador convencional e ao fuzzy. Foram testados passos de 1, 10 e 30 segundos, além de passos de 1 e 10 minutos.

Após tais testes, o passo de 10 segundos foi aquele adotado, pois intervalos maiores poderiam suprimir importantes eventos elétricos. Adotou-se também este intervalo de simulação tendo-se em vista que os resultados foram equivalentes aos obtidos com o passo de 1 segundo. Porém, a simulação usando passos de 10 segundos é mais rápida que aquela de 1 segundo.

É importante salientar que as inúmeras curvas históricas reamostradas em intervalos de 10 segundos foram utilizadas para realizar ajustes finos nos parâmetros do sistema fuzzy, como por exemplo, a determinação das fronteiras das funções de pertinência. Após estes ajustes por intermédio de dados conhecidos, o sistema fuzzy pode ser então utilizado no controle de tensão sob quaisquer condições de carga, já que absorveu todo o conhecimento necessário para a sua generalização de soluções.

Para cada perfil de carga considerado, a resposta do sistema fuzzy será fundamentada na observação histórica de variáveis elétricas dos últimos 7 dias, as quais são utilizadas no cálculo da potência média (potência ativa), que é assumida como uma de suas entradas, conforme diagrama da Figura 1.

A potência ativa média associada a cada subestação, juntamente com outras informações sobre os transformadores, é também apresentada na Tabela 3.

($T1, T2$) Transformador 1 e 2 // (PC) Potência Constante // (IC) Impedância Constante

A partir da Tabela 3, constata-se que foram contempladas e simuladas diversas situações distintas de comportamento carga. A subestação de Andradina alimenta cargas com predominância rural (comportamento de potência constante); porém, seu alimentador principal é extenso e possui aproximadamente 600 km de comprimento total (comportamento de impedância constante). A subestação Cordeirópolis possui uma carga altamente resistiva devido à atividade industrial de cerâmicas que utilizam fornos elétricos (comportamento de impedância constante). As cargas de Mogi Guaçu são de comportamento misto (rural e

Tabela 3: Informações dos transformadores das subestações simuladas.

Subestação	Potência (MVA)	Potência Ativa Média (MW)	Tipo da Carga	No. de Alimentador	No. de Tap	ΔV_{Max} (%)
Andradina (T1)	15/18.75	9.893	(IC)/(PC)	4	33	± 17.637
Andradina (T2)	15/20	7.399	(IC)/(PC)	4	33	± 20.833
Cordeirópolis (T1)	15/18.75	12.262	(IC)	3	33	± 17.637
Cordeirópolis (T2)	15/18.75	12.956	(IC)	3	33	± 17.577
Mogi Guaçu 2 (T1)	15/18.75	2.660	(IC)/(PC)	2	33	± 17.589
Mogi Guaçu 2 (T2)	15/20	4.648	(IC)/(PC)	2	33	± 20.833
Ubatuba 1 (T2)	25/33.3	6.237	(IC)	4	25	± 15.345
Ubatuba 2 (T2)	15/18.75	1.781	(IC)	3	33	± 17.601

urbano). As subestações de Ubatuba se encontram no litoral, estando sujeitas às sazonalidades.

A variação máxima da tensão permitida (ΔV_{Max}) para os transformadores se refere a um valor de 13.8 kV. A tensão de referência adotada para as simulações foi de 14.1 kV, com desvio de 1.25% (Largura de Faixa // Figura 7) e temporização de comutação de 90 segundos. A tensão de referência e o desvio foram ajustados de acordo com as informações da própria concessionária que administra as subestações.

Tanto as regras fuzzy quanto as funções de pertinência são as mesmas para todos os transformadores simulados, o que torna a estratégia inteligente de controle da tensão bem genérica, compacta e propícia para implementação em hardware. Assim, considerando um transformador em particular, a variável *carga* precisa ser apenas normalizada em relação ao universo de discurso associado com as suas funções de pertinência (Figura 2), que é definido no intervalo [0.5, 1.5]. A entrada *desvio* precisa também ser normalizada, pois sua representação é em valores percentuais.

4 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO UTILIZANDO DADOS REAIS

A partir da Figura 7, pode-se observar o perfil de tensão obtido com as simulações computacionais da subestação Andradina (Transformador 1) tanto para a estratégia convencional como para a inteligente. A tensão média (V_m) observada para o período de simulação é também apresentada.

Na simulação da estratégia fuzzy inteligente, denominada “Controle Automático da Referência” (CAR), a tensão média

foi 16 V mais elevada de que aquela obtida na estratégia convencional, denominada aqui de “Controle Convencional de Tensão” (CCT). As comutações de tap obtidas foram 15 para o controle CCT e 25 para o controle CAR.

O aumento no número de comutações de tap para a estratégia CAR já era esperado, como discutido previamente. Entretanto, a melhora no perfil de tensão foi significativa para situações de carga pesada, como destacado na Figura 7, para a subestação Andradina (Transformador 1). Ainda nesta figura, é possível observar que a tensão foi mantida acima da referência em todos os períodos de carga pesada quando se utilizou a estratégia CAR, além de sua rápida resposta em baixar ou elevar a tensão, protegendo os consumidores frente a picos de sobretensões e subtensões, respectivamente.

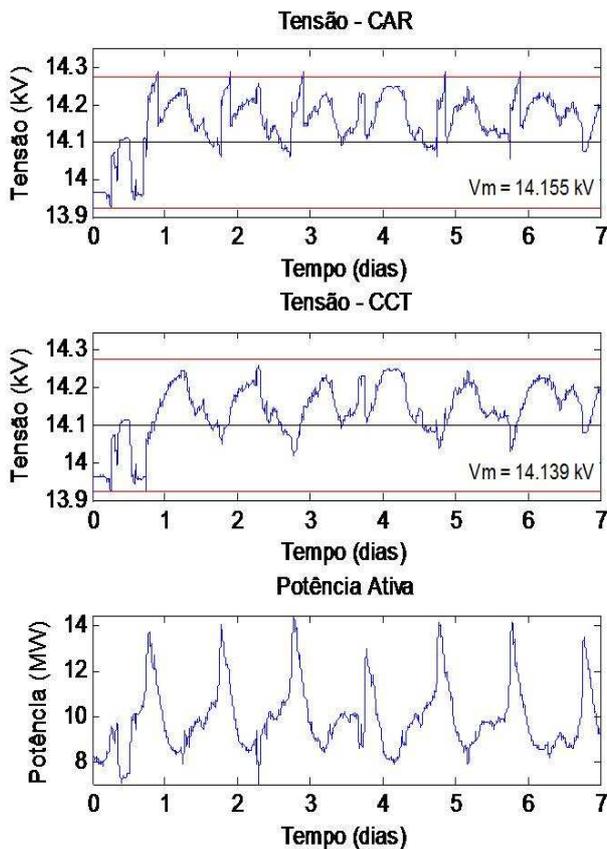


Figura 7: Perfis de tensão para Andradina (T1).

Os reais benefícios da estratégia CAR podem ser mais bem apreciados na Figura 8, em que as tensões médias para cada faixa de carga pesada são comparadas.

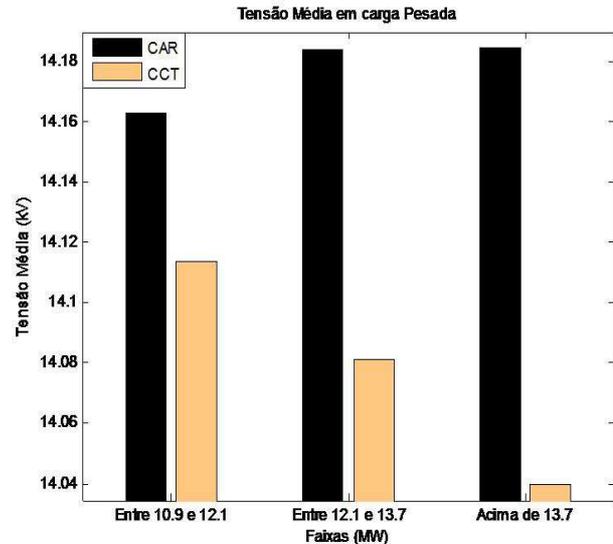


Figura 8: Tensão média em carga pesada para Andradina (T1).

Para todas as faixas de carga pesada, a tensão média obtida em simulações com a estratégia CAR foi sempre maior que aquela proporcionada pela CCT. De acordo ainda com a Fig. 8, em relação à carga mais pesada, acima de 13.7 MW, a simulação CAR obteve 140 V a mais na tensão média se comparada à CCT.

Os demais resultados obtidos com simulações para a subestação de Andradina (T1) podem ser contemplados na Tabela 4.

Tabela 4: Resultados de simulação para subestação Andradina (T1).

Faixa de Carga Pesada (MW)	Tensão Média CCT (V)	Ganho Médio CAR (V)
10.9 à 12.1	14114	28
12.1 à 13.6	14084	97
> 13.6	14045	140
Tensão Média ¹	14138	14160
Número de Comutações	15	25

Pode ser observado na Tabela 4 que, em todos os níveis de carga pesada, a estratégia CAR exibiu ganhos em tensão média em relação ao CCT. O seu incremento em comutações se justifica justamente pela ausência de uma banda morta para a estratégia inteligente, já que há uma exploração contínua desta região com o objetivo de melhorar o perfil de tensão. Nas tabelas a seguir são apresentados os demais resultados de simulação para as outras subestações avaliadas.

¹Média da tensão para 7 dias de simulação.

Tabela 5: Resultados de simulação para subestação Andradina (T2).

Faixa de Carga Pesada (MW)	Tensão Média CCT (V)	Ganho Médio CAR (V)
8.14 a 8.76	14057	121
8.76 a 9.48	13998	153
> 9.48	13964	149
Tensão Média ¹	14073	14142
Número de Comutações	20	37

Tabela 6: Resultados de simulação para subestação Cordeirópolis (T1).

Faixa de Carga Pesada (MW)	Tensão Média CCT (V)	Ganho Médio CAR (V)
13.5 a 13.7	14125	16
13.7 a 14.0	14120	24
> 14.0	14093	79
Tensão Média ¹	14123	14159
Número de Comutações	15	17

Tabela 7: Resultados simulação para subestação Cordeirópolis (T2).

Faixa de Carga Pesada (MW)	Tensão Média CCT (V)	Ganho Médio CAR (V)
14.3 a 15.0	14038	154
15.0 a 15.9	14038	156
> 15.9	14003	158
Tensão Média ¹	14089	14145
Número de Comutações	21	51

Tabela 8: Resultados simulação para subestação Mogi Guaçu 2 (T1).

Faixa de Carga Pesada (MW)	Tensão Média CCT (V)	Ganho Médio CAR (V)
2.93 a 4.71	14036	141
4.71 a 6.75	14017	142
> 6.75	13981	142
Tensão Média ¹	14045	14160
Número de Comutações	14	21

Tabela 9: Resultados de simulação para subestação Mogi Guaçu 2 (T2).

Faixa de Carga Pesada (MW)	Tensão Média CCT (V)	Ganho Médio CAR (V)
5.11 a 6.24	14070	132
6.24 a 7.54	14053	180
> 7.54	14032	185
Tensão Média ¹	14077	14138
Número de Comutações	18	36

Tabela 10: Resultados de simulação para subestação Ubatuba 1 (T2).

Faixa de Carga Pesada (MW)	Tensão Média CCT (V)	Ganho Médio CAR (V)
6.86 a 8.17	14098	10
8.17 a 9.67	14079	70
> 9.67	14055	161
Tensão Média ¹	14096	14109
Número de Comutações	14	22

Tabela 11: Resultados de simulação para subestação Ubatuba 2 (T2).

Faixa de Carga Pesada (MW)	Tensão Média CCT (V)	Ganho Médio CAR (V)
1.96 a 3.08	14043	140
3.08 a 4.37	14038	140
> 4.37	14033	140
Tensão Média ¹	14044	14170
Número de Comutações	13	14

Em todas as subestações simuladas foram observadas melhorias nos perfis de tensão quando utiliza a estratégia CAR. Cordeirópolis (Tabelas 6 e 7) possui, segundo a concessionária, um comportamento de carga que torna o controle de tensão por meios convencionais extremamente complexo. No entanto, a tensão média sob carga pesada foi elevada, especialmente no Transformador 2, quando simulada com a estratégia inteligente.

No caso do Transformador 1 de Mogi Guaçu 2 (Tabela 8), a estratégia CAR mostrou-se também eficiente em elevar a tensão média sob carga pesada, além de promover flexibilização nas comutações de tap, onde o perfil foi melhorado significativamente com poucas comutações a mais. O mesmo pode ser dito para as subestações de Ubatuba (Tabelas 10 e 11), que possui um forte comportamento sazonal, pois está localizada em uma região turística do litoral.

As Tabelas 5 e 7 mostram situações onde a tensão média foi elevada de maneira eficiente, mediante um aumento significativo no número de comutações de tap. De fato, a estratégia CAR necessita de um número maior de operações de tap a fim de aumentar a tensão média, principalmente naquelas condições de carga pesada.

Entretanto, o número de comutações registrado experimentalmente (conforme a seção seguinte) foi compatível com os objetivos de manutenção, ou seja, realização de no máximo 100 mil operações em 6 anos. Portanto, a estratégia CAR respeita os mesmos critérios de manutenção da estratégia convencional, a qual direciona os dispositivos de comutação para manutenção a cada 6 anos. Portanto, apesar de a estratégia CAR utilizar mais comutações de tap, os intervalos de manutenção e também os seus custos, tanto neste sistema inteligente quanto para o convencional, são os mesmos.

A variação de comutações em transformadores de uma mesma subestação se deve à heterogeneidade das cargas, e também, à qualidade dos dados utilizados para as simulações, os quais em muitas vezes não estavam compreendidos em um mesmo intervalo sazonal para os dois transformadores.

Outro aspecto de controle a ser observado é que para o desenvolvimento desta proposta não foram considerados aspectos de paralelismo de transformadores. Para o desenvolvimento do protótipo, tomou-se a decisão de se empregar mecanismos de controle de transformadores em paralelo já disponibilizados nos relés reguladores de tensão, pois tais funcionalidades já se encontram bem consolidadas.

De maneira geral, é possível destacar a eficiência do CAR em melhorar a tensão sob carga pesada em todas

as subestações simuladas, mesmo atuando-se apenas no barramento secundário.

As regras 2, 3 e 4 do CAR funcionam de maneira similar ao CCT, cujo propósito é manter os limites operativos de tensão. Por outro lado, todas as demais regras estão mais ativas durante aquelas situações de carga em que é mais interessante estimular a referência a fim de melhorar o perfil de tensão.

Complementarmente, após o processo de validação do controlador, a sua implementação em hardware se torna possível devido ao formato compacto do sistema fuzzy final, o qual pode ser sistematizado pela superfície de relacionamento apresentada na Figura 5. O processo de inferência fuzzy pode ser todo discretizado de maneira direta, e com pouco custo computacional, quando se armazena toda aquela superfície de relacionamento em uma memória, tornando-se assim extremamente rápido os cálculos para a implementação em tempo real da estratégia.

5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS DA IMPLEMENTAÇÃO EM HARDWARE

Os resultados de simulação apresentados na seção anterior justificam a implementação em hardware da estratégia CAR em subestações de distribuição, por meio da embarcação da superfície fuzzy (Figura 5) em um relé regulador de tensão. Para tal propósito, escolheu-se a subestação Mogi Guaçu 2 para receber o protótipo, conectando-se o relé com a estratégia CAR ao comutador de tap sob carga do transformador, conforme ilustrado na Figura 9.



Figura 9: Implementação em hardware da estratégia CAR.

O protótipo foi conectado para comandar as operações de tap no Transformador 1, trifásico em conexão delta-fechado, que alimenta 5240 clientes, sendo 18494 kVA de cargas urbanas e 4657 kVA de cargas rurais.

Como mostrado na Figura 10, a estratégia CAR implementada em hardware manteve a tensão média no Transformador 1 em aproximadamente 165 V maior que aquela obtida pelo controle CCT, para um período de operação de 7 dias.

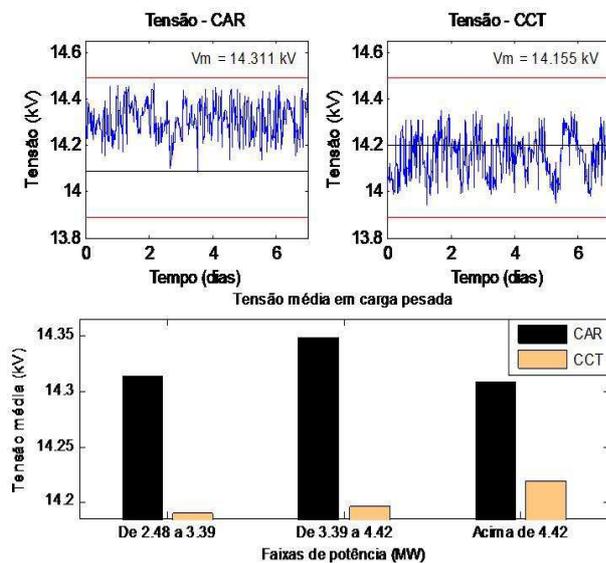


Figura 10: Resultados experimentais de perfil de tensão para Mogi Guaçu 2 (Transformador 1).

Para todos os níveis de carga pesada, a tensão média promovida pela estratégia CAR foi mais elevada, sendo 89 V acima daquela média obtida pela estratégia CCT, em situações de demanda acima de 4.42MW.

Para confirmar a robustez da estratégia CAR em sua aplicação prática, outro protótipo foi instalado no Transformador 2 de Mogi Guaçu 2 que é também trifásico, porém, em delta-aberto. Este transformador alimenta 8506 clientes, sendo 30349 kVA de cargas urbanas e 8534 kVA de cargas rurais.

Como mostrado na Figura 11, a tensão média para uma operação de 7 dias foi mantida 14 V mais elevada pela estratégia CAR, sendo que para os níveis de carga mais pesada obteve-se 113V de ganho médio em relação ao CCT.

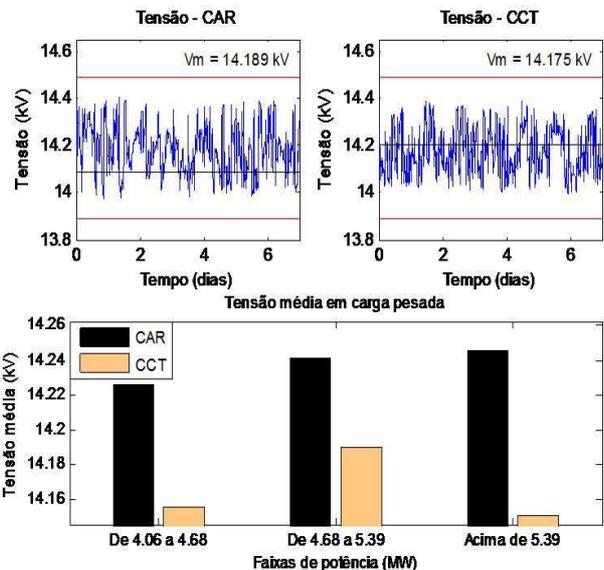


Figura 11: Resultados experimentais de perfil de tensão para Mogi Guaçu 2 (Transformador 2).

Portanto, é possível afirmar que, com os resultados experimentais obtidos, a estratégia CAR implementada em hardware teve desempenho prático confirmado frente às simulações realizadas anteriormente, tanto no que diz respeito à melhoria do perfil de tensão em carga pesada quanto para manter os limites operativos do sistema, satisfazendo-se então as regulamentações da ANEEL.

A estimativa de comutações de tap para os dois transformadores controlados pelo sistema fuzzy indica que o limite de 100 mil comutações em 6 anos não será transgredido. De acordo com a concessionária, durante os últimos 12 meses de operação da estratégia CAR, o Transformador 1 apresentou comutações mensais em torno de 105 operações. Para o transformador 2, observa-se 413 comutações mensais para o mesmo período. Com tais estatísticas é possível afirmar que em ambos os transformadores, o comutador de tap não irá operar mais que 100 mil vezes em 6 anos, permanecendo-se dentro dos limites de manutenção impostos.

6 CONCLUSÃO

Ultimamente, tem-se verificado junto ao cenário atual do setor elétrico brasileiro uma constante busca pela melhoria dos serviços prestados pelas companhias de distribuição de energia elétrica junto 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 robustez e na operação dos sistemas de distribuição de energia elétrica.

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

O controle CAR apresentou também resultados bem positivos quando aplicado na regulação de tensão em campo, validando-se então todas aquelas simulações realizadas. 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) elevação automática do perfil de tensão em condições de carga pesada; iii) racionalização do número de comutações de tap em condições de carga mínima/leve; iv) resultados de saída são produzidos de forma extremamente rápida, possibilitando aplicações em tempo-real; e v) facilidade de implementação em hardware.

Além disso, os processamentos executados pela estratégia CAR são baseados apenas em valores medidos das variáveis de entrada, sendo que eventuais imprecisões associadas aos dispositivos de aquisição de dados são também inerentemente tratadas pelas funções de pertinência. Adicionalmente, tem-se também a portabilidade intrínseca do sistema desenvolvido, a qual permite a sua aplicação direta em quaisquer tipos de transformador, independentemente das cargas acopladas aos mesmos.

A exploração contínua da faixa, racionalizando-se as comutações de tap em carga leve e buscando-se melhorar o perfil de tensão em carga pesada, apresenta inúmeros benefícios. Com níveis de tensão mais elevados em carga pesada, o consumidor tem então a garantia que seus equipamentos não serão submetidos a tensões abaixo da nominal ao fim do alimentador.

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

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro fornecido pela FAPESP (Processo 2007/03389-5), assim como à Elektro pelos dados fornecidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANEEL (2001). Resolução ANEEL nº 505/2001 Conformidade dos níveis de tensão. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/biblioteca/pesquisadigit.cfm>. Acessado em 20 out. 2009.
- ANEEL (2009). Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/82.htm>. Acessado em 20 out. 2009.
- Augugliaro, A., Dusonchet, L., Favuzza, S., Sanseverino, E.R. (2004). Voltage regulation and power losses minimization in automated distribution networks by an evolutionary multiobjective approach. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, no. 3, pp. 1516-1527.
- Baran, M.E., El-Markabi, I.M. (2007). A multiagent-based dispatching scheme for distributed generators for voltage support on distribution feeders. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, no. 1, pp. 52-59.
- Carvalho, P.M.S., Correia, P.F., Ferreira, L.A.F. (2008). Distributed reactive power generation control for voltage rise mitigation in distribution networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 23, no. 2, pp. 766-772.
- Dixon, M. (2001). Innovative Volt/VAr management provides payback. *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, pp. 461-468.
- Dugan, R.C., McGranaghan, M.F., Santoso, S., Beaty, H.W. (2003). *Electrical Power Systems Quality*, 2nd edition, McGraw Hill, New York.
- Ferreira, L.C.A., Henriques, R.M., Passos Filho, J.A., Martins, N., Falcão, D.M. (2004). Influência da representação de motores de indução e de dispositivos de controle automáticos e discretos em estudos de segurança de tensão. *Proceedings of the VII Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning (SEPOPE)*, 6 p.
- Ferreira, L.C.A. (2008). *Análise a Longo-Termo da Estabilidade de Tensão Utilizando Métodos Estáticos e Um Sistema Especialista Fuzzy para a Representação*

- de Ações de Controle*. Tese de Doutorado (Ciências em Engenharia Elétrica), Instituto de Sistemas Elétricos e Energia, Universidade Federal de Itajubá.
- 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, no. 4, pp. 1265-1271.
- Kagan, N., Oliveira, C.C.B., Robba, E.J. (2005). *Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica*. Edgard Blucher, São Paulo.
- 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, no. 2, pp. 404-435.
- Liang, R.H., Cheng, C.K. (2001). Dispatch of main transformer ULTC and capacitors in a distribution system. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 16, no. 4, pp. 625-630.
- 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, no. 2, pp. 610-618.
- Liu, Y., Zhang, P., 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, no. 4, pp. 1265-1271.
- Milosevic, B., Begovic, M. (2004). Capacitor placement for conservative voltage reduction on distribution feeders. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no. 3, pp. 1360-1367.
- Miranda, V., Moreira, A., Pereira, J. (2007). An improved fuzzy inference system for voltage/var control. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, no. 4, pp. 2013-2020.
- Oleskovicz, M., Coury, D.V., Carneiro, A.A.F.M., Arruda, E.F., Delmont Filho, O., Souza, S.A. (2006). Estudo comparativo de ferramentas modernas de análise aplicadas à qualidade da energia elétrica. *Controle & Automação*, vol. 17, no. 3, pp. 331-341.
- Park, Y.J., Nam, S.R., Park, J.K. (2007). Control of a ULTC considering the dispatch schedule of capacitors in a distribution system. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, no. 2, pp. 755-761.
- Pedrycz, W., Gomide, F. (2007). *Fuzzy Systems Engineering*. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey.
- Ross, T.J. (2004). *Fuzzy Logic with Engineering Applications*. John Wiley & Sons, 2nd edition, Hoboken, New Jersey.
- Short, T.A. (2003). *Electric Power Distribution Handbook*. CRC Press, New York.
- Usida, W.F., Oleskovicz, M., Rodrigues, L.C.P., Coury, D.V. (2009). Análise qualitativa no monitoramento automático dos eventos de tensão de curta duração. *Controle & Automação*, vol. 20, no. 3, pp. 323-334.
- Willis, H.L. (1997). *Characteristics of Distribution Loads, Electrical Transmission and Distribution Reference Book*. ABB Power T&D Company, Raleigh, NC.