

AJUSTE DE TAP DE TRANSFORMADORES PARA CONTROLE DE TENSÃO DE SUBESTAÇÕES DE ENERGIA ELÉTRICA USANDO CONTROLADOR FUZZY

DIEGO DA ROSA, L

Univali – Universidade do Vale do Itajaí – Campus de São José
Rod. SC 407 – Km 04, Bairro Sertão do Imaruim – São José – SC
CEP: 88122-000, tel. 48 3281 1500
E-mails: trevhor@gmail.com, laucsen@ieb.ufsc.br

HENRIQUE SIMAS

Univali – Universidade do Vale do Itajaí
Rod. SC 407 – Km 04, Bairro Sertão do Imaruim – São José – SC
CEP: 88122-000, tel. 48 3281 1500
E-mail: hsimas@univali.br

RAIMUNDO TEIVE, C. G.

Univali – Universidade do Vale do Itajaí
Rod. SC 407 – Km 04, Bairro Sertão do Imaruim – São José – SC
CEP: 88122-000, tel. 48 3281 1500
E-mails: rteive@univali.br

Abstract— This work proposes a fuzzy controller to automatize the taps adjustment process of the electrical transmission substation transformer by using an *on-line taps changer* (OLTC) equipment, with the objective to control the substation output voltage. Variables such as: voltage limits, reactors and capacitors status, are considered on this adjustment process. The fuzzy logic theory is utilized to solve this problem, due mainly to its capacity to emulate the human reasoning, in special, the substation operator “*modus operandi*”, which through his expertise, is always looking for the minimization of the adjustment number, and the consequent conservation of the derivation changer and the electrical transformer situation. The developed system is validated with real data from a transmission substation, comparing the results to the operator manual adjustments, obtaining promising results.

Keywords— Power System, Fuzzy Control, Substation Automation, Intelligent Control

Resumo— É proposto neste trabalho um controlador *fuzzy* para automatização do processo de ajuste dos *taps* dos transformadores de subestações de transmissão de energia elétrica, executado por um equipamento *OLTC*, com vistas ao controle de tensão de saída desta subestação. Variáveis tais como: limites de tensão para determinados horários do dia, carregamento do transformador, carga fornecida pela subestação, além dos *status* dos reatores de barra e banco de capacitores, são considerados neste processo de ajuste. A lógica *fuzzy* é utilizada para resolver este problema, devido principalmente a sua capacidade de emular o raciocínio humano, em particular, o *modus operandi* do operador da subestação, o qual através da sua experiência, sempre busca a minimização do número de ajustes e a consequente conservação do comutador de derivação e do próprio transformador. O sistema desenvolvido é validado com dados reais de uma subestação de transmissão, comparando os resultados obtidos com o ajuste manual do operador, obtendo-se resultados promissores.

Palavras-chave— Sistema de Potência, Controle Fuzzy, Automação de Subestação, Controle Inteligente

1 Introdução

As empresas transmissoras de energia elétrica exercem um papel muito importante no setor elétrico brasileiro, especialmente em função da predominância hidrelétrica de matriz eletro-energética nacional, o que implica na necessidade de transporte de grandes blocos de energia a grandes distâncias, necessitando assim de altos níveis de tensão.

Nas subestações próximas às cidades há necessidade da redução dos níveis de tensão, sendo o controle desta tensão uma tarefa rotineira das empresas transmissoras de energia, usualmente realizado pelos operadores destas subestações.

O controle de tensão no barramento de saída da subestação é uma tarefa importante e com certo grau de complexidade, particularmente nas subestações que não estão automatizadas, onde os operadores têm papel fundamental para o desempenho eficiente deste serviço.

Os operadores que trabalham nestas subestações têm a responsabilidade de monitorar os níveis de tensão de diversos circuitos das subestações vizinhas, em tempo real, e operar diversos transformadores, localizados em cada uma destas subestações.

Os operadores podem sofrer grande pressão e *stress*, especialmente em situações de contingência na rede, onde decisões operativas devem ser tomadas, em um curto espaço de tempo, de acordo com a aná-

lise de uma grande quantidade de informações e dados que chegam de forma simultânea. Sob estas circunstâncias o erro humano é eminente.

Para manter o nível tensão da saída de uma subestação de energia (SE) em patamares apropriados, os operadores devem considerar diversos aspectos, tais como: nível de geração de potência reativa, ligação de compensadores síncronos e banco de capacitores, uso de reatores de barra e ajuste de *taps* dos transformadores, onde o ajuste automático de *tap* pode ser executado através dos equipamentos chamados de OLTCs (*on-load tap changer*).

O OLTC é um dispositivo utilizado para mudanças de derivações de um enrolamento (*tap*), adequado para operação com o transformador energizado, em vazio ou em carga (Trindade, 2004).

A variação do *tap* permite elevar ou reduzir a tensão transformada, através da variação da relação do transformador. Assim, quando essa tensão do circuito estiver fora dos padrões aceitáveis, busca-se com o comutador de derivação ou OLTC, que a tensão fique dentro dos limites. Entretanto, outras variáveis influem neste ajuste, tais como: limites de tensão, horário do dia, carregamento do transformador, carga fornecida pela subestação, *status* do reator de barra e banco de capacitores (ligado ou desligado); aumentando assim a complexidade do problema.

O ajuste eficiente dos *taps* é importante não somente para o controle de tensão, mas também para a própria conservação do estado do OLTC. Levantamento feito pelo CIGRE (CIGRE 1983), com base em informações obtidas de concessionárias de energia de diversos países, indicou que 40% das falhas ocorridas em transformadores de SEs estavam relacionadas a comutadores de derivação, principalmente àqueles operados automaticamente.

O ajuste dos *taps* dos transformadores de uma SE, é feito usualmente pelo operador, de acordo com as variações diárias do consumo de energia, sendo a sua automatização importante para liberar o operador para outras tarefas na SE, além de ir ao encontro do processo vigente de automação de subestações do sistema de transmissão elétrico.

Desta forma, como contribuição ao processo de automação de SEs, neste trabalho é proposto um controlador baseado em lógica *fuzzy* para controle da tensão de 3 transformadores 230/138 da SE de Blumenau, pertencentes à empresa Eletrosul Centrais Elétricas S.A., tendo como variáveis de controle os *taps* destes transformadores, ligação de banco de capacitores, reatores e compensadores síncronos, em função de variações diárias da curva de carga da SE.

A lógica *fuzzy* foi escolhida neste trabalho principalmente pela sua capacidade em reproduzir o raciocínio humano, particularmente o *modus operandi* do operador da SE, o qual sempre busca a operação eficiente do OLTCs e a minimização do número de ajustes.

2 Automatização de Subestações

Atualmente, a grande maioria das SEs utilizam o tradicional sistema SCADA (*System Control and Data Acquisition Software*), o qual possibilita a aquisição de dados e controle de alguns dispositivos através das RTUs (unidades terminais remotas). Contudo, este sistema se comunica apenas com um nível hierarquicamente superior, não tendo capacidade de processamento, controle e operação locais.

Para incrementar o nível de automação local de uma SE, diversas abordagens têm sido propostas, envolvendo desde a utilização de controladores clássicos (PID e CLP), até a implantação de sistemas inteligentes, baseados em técnicas da inteligência artificial.

A automação das SEs tem sido viabilizada especialmente pelo processo de digitalização destas SEs, operacionalizada com advento dos relés digitais, os quais têm propiciado a modernização dos sistemas de supervisão, controle e proteção das SEs. Exemplos desta revolução podem ser observados em (Souza, 2005), onde a implantação de sistemas de controle automático tem possibilitado que funcionalidades tais como: transferência de linhas, restabelecimento de SE, retirada e inserção de capacitores e transferência de carga de transformadores, sejam realizadas em tempos menores que 2 minutos. A necessidade de aliar as vantagens do sistema SCADA com controladores locais, com vistas à automação das SEs pode ser vista em (Teixeira, 2002).

Sistemas inteligentes também têm sido propostos para introduzir algum nível de automação às SEs, como é o caso do sistema *neuro-fuzzy* proposto em (Martins, 2003).

Com o surgimento do tele-controle, diversas subestações tornaram-se controladas por apenas uma subestação, acarretando uma carga ainda maior de trabalho para os operadores remanescentes.

Os computadores que são implantados nas subestações com os sistemas digitais, geralmente estão equipados com um sistema computacional específico para trabalhar com gerenciamento de energia elétrica.

A maioria destes ambientes tem sistemas operacionais Linux e são programados na linguagem de programação C. No caso das empresas da rede Eletrobrás, é usado o sistema SAGE (Sistema Aberto de Energia Elétrica), que é baseado em Linux e programado em *ANSI C*.

Neste trabalho, é apresentada uma proposta para automatização do processo de operação de equipamentos da SE, através do monitoramento e controle *on-line*. A solução consiste num sistema computacional inteligente, desenvolvido em linguagem C, baseado em lógica *fuzzy*, capaz de atuar sobre os elementos de uma SE, relacionados ao processo de ajuste de *tap* dos transformadores, com vista ao controle de tensão da subestação.

3 Lógica Fuzzy

A lógica *fuzzy* foi desenvolvida por Lotfi Zadeh em 1965 (Klir, 1995). A lógica *fuzzy* tem a capacidade de inferir conclusões e gerar respostas baseadas em informações vagas, ambíguas e qualitativamente incompletas e imprecisas, ou seja, uma nova abordagem nos termos de incerteza.

Outra vantagem é que o sistema *fuzzy* é de fácil compreensão e de fácil aplicação, com conceitos matemáticos não muito complexos (Shaw, 1999).

A lógica *fuzzy* introduziu uma mudança de paradigma em relação à modelagem de incerteza, considerando a abordagem probabilística existente na época. As quatro principais características que diferenciam esta técnica são (Klir, 1995):

- Quando dados *fuzzy* são processados, suas incertezas intrínsecas são também processadas, tornando seus resultados mais significativos;
- Quanto maior a complexidade do problema, mais destacada tende a ser a vantagem da utilização da abordagem *fuzzy*;
- Tem capacidade de capturar e tratar conhecimento expresso em sentenças representadas por linguagem natural;
- Tem capacidade de emular o raciocínio de senso comum humano e outros aspectos cognitivos.

Diferentemente da lógica tradicional, como a lógica booleana, a lógica *fuzzy* é capaz também de tratar valores com grau de pertinência parciais, em vez de apenas nula ou total, fato que a torna próxima da lógica do raciocínio humano, pois os seres humanos não enxergam o mundo com apenas zeros e uns.

A lógica *fuzzy* consiste em um conjunto de funções, que juntas possibilitam a sua realização. Dentre essas ferramentas inclui-se funções que calculam o *min fuzzy*, *max fuzzy*, cálculo de vetor probabilidade e inferência *fuzzy*. (Klir, 1995)

Em sistemas de potência, diversas são as aplicações que envolvem o uso da lógica *fuzzy*, destacando-se o problema de controle adaptativo de compensador estático em sistemas multi-máquinas (Mohagheghi, 2005), implementação de lógica *fuzzy* para ajuste de controladores PID (Sumar, 2005) e sistema *PI-fuzzy* para controle do regulador de tensão de um micro-gerador elétrico (Campos, 2004).

4 Controle Fuzzy

Para que um controlador possa ter a capacidade de representar a percepção e o raciocínio humano, no caso particular da operação do sistema de controle de tensão com ajuste de *tap*, tarefa que às vezes depende de informações vagas e nebulosas, este controlador deve ser implementado com a lógica *fuzzy*,

Atualmente, nas SEs que não estão automatizadas, o procedimento para controle de tensão através do ajuste do *tap* do transformador é comandado pelo

operador, o qual executa sua ação baseado na análise das condições da SE e variáveis de controle

O operador considera na sua tomada de decisão a diferença entre a tensão atual (V_{atual}) e o valor de referência (V_{ref}) para determinado horário do dia (H), o carregamento do transformador (W) e carga consumida a partir desta subestação, status dos reatores (R) (ligados ou desligados) e status do banco de capacitores (Bc) (ligado ou desligado).

O controle *fuzzy*, neste caso, substituiria o operador e começaria a agir por conta própria, de acordo com a Figura 1.

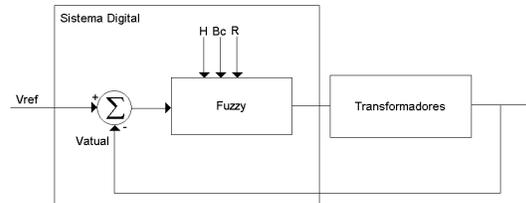


Figura 1. Diagrama de blocos do sistema proposto.

Devido à digitalização, todas as variáveis que o operador utiliza para tomar suas ações, estão disponíveis dentro do sistema digital, possibilitando as suas capturas pelo sistema supervisor.

Assim, o sistema de controle *fuzzy* proposto, a partir do monitoramento das variáveis necessárias e tendo a filosofia de controle baseada no raciocínio do operador, deverá tomar ações semelhantes ao operador, pois o conhecimento e a experiência do operador, embutidos nos procedimentos usuais de operação, são suficientes, para o funcionamento adequado do sistema. Neste caso, os operadores ficarão liberados para se dedicarem a outras funções.

Além disto, o uso do controlador digital tenderá a evitar o erro humano, especialmente em situações envolvendo um grande número de informações fornecidas pelo sistema, onde geralmente o ser humano tem dificuldade de lidar.

5 Desenvolvimento

5.1 Lógica Fuzzy

Inicialmente, as funções *fuzzy* implementadas foram validadas através de simulações envolvendo um problema clássico de controle, que é o sistema de primeira ordem - motor DC simplificado (Ogata, 2003). Nesta avaliação o controlador *fuzzy* substituiu um controlador PI padrão.

Utilizando um ajuste de ganhos adequado, o desempenho no controle de velocidade realizado por um controlador PI foi obtido. O controle *fuzzy* foi ajustado de tal forma que o seu desempenho equivalesse ao encontrado para o controle PI.

A Figura 2 apresenta o resultado comparativo entre a estratégia de controle PI e *fuzzy*.

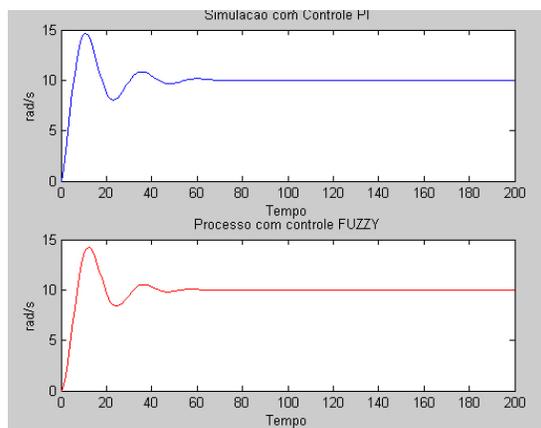


Figura 2. Comparação Controlador PI e Fuzzy

Considerando que para a maioria dos sistemas de supervisão de controle digital de SEs são implementados para Linux, um conjunto de ferramentas *fuzzy* foi construído em linguagem *ANSI C*. As bibliotecas *fuzzy* em C estão disponibilizadas para *download* como ferramenta *Open Source* em <https://sourceforge.net/projects/cttseelf>.

5.2 Fonte de Conhecimento para o Sistema

A subestação escolhida, em parceria com a Eletrósul, para a implementação do controlador *fuzzy* foi a Subestação Controladora de Blumenau (SCB).

Neste sentido, foi enviado para os operadores da SCB, um questionário contendo perguntas relacionadas aos seus procedimentos de operação, no que tange ao controle de tensão da SE. As respostas dos operadores foram usadas para a programação do sistema e da lógica de controle do controlador *fuzzy*.

5.3 Modelagem

O processo de modelagem do sistema envolveu principalmente a modelagem do transformador com *tap* da SCB e das duas outras subestações controladas pela SCB, que são as subestações de Ilhota e Itajaí. A modelagem considerou os três transformadores conectados, conforme representado na Figura 3.

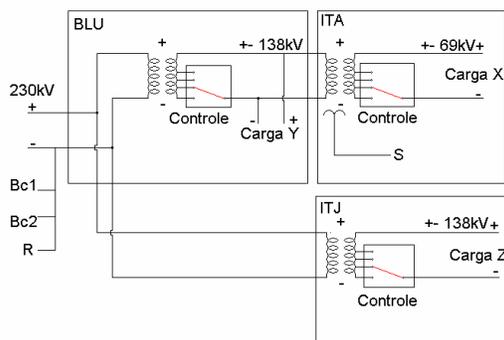


Figura 3. Sistema de interconexão da Controladora de Blumenau.

Na figura 3, BLU, ITJ, ITA representam as SEs de Blumenau, Itajaí e Ilhota, respectivamente. As cargas X, Y e Z representam a carga das SEs correspondentes, em determinado momento do dia. O componente S representa um compensador síncrono instalado no sistema em Ilhota, R um reator em Blumenau e Bc1 e Bc2 dois bancos de capacitores instalados também em Blumenau.

Como pode ser observada na Figura 3, a SCB é alimentada em 230 kV, assim como a SE de Itajaí. A subestação de Ilhota, por sua vez, é alimentada em 138 kV. A tensão de saída das SEs de Itajaí e Ilhota é de 138 kV e 69 kV, respectivamente.

5.4 O controlador

O sistema proposto aplica-se no controle de SEs sob circunstâncias normais de operação. Em situações de emergência, que envolvem, por exemplo, a necessidade de um controle restaurativo, ou mesmo a recomposição do sistema como um todo, o controlador se desliga automaticamente, devendo soar um alarme de emergência, passando o controle para o operador.

5.5 Lógica de Controle do Sistema

O controle executado pelos operadores, o qual precisa ser substituído pela Lógica *fuzzy*, é explicado a seguir.

Os operadores têm a função de manter a tensão das barras sempre dentro de um intervalo desejado, buscando não executar ajustes de *taps* desnecessários.

O valor da tolerância para a tensão é definido por um grupo de pesquisa, ou dependendo de diversos atributos do sistema, devidamente calculado por uma equipe. Essa equipe estuda este problema e envia para a operação uma tabela com o nível de tensão para o horário, sendo que esse nível de tensão contém o ideal, o mínimo possível e o máximo possível para aquele horário.

Com esta tabela em mãos, os operadores executam comando de aumentar ou diminuir *tap* nos transformadores com a intenção de manter o nível de tensão dentro dos valores da tabela.

O problema é que a variação da tensão não é contínua e nem linear. Em certos momentos, a tensão pode sair da faixa fornecida na tabela, porém em poucos segundos ela pode voltar para a faixa. Nestes casos, o operador espera um tempo para perceber se realmente a tensão vai continuar saindo da faixa. Caso ela continue fora da faixa, o mesmo executa o comando, caso ela volte, o comando é poupado.

No caso da SCB, existem dois conjuntos de transformadores em série, o de Blumenau (230kV/138kV) e Ilhota (138kV/69kV). Quando a tensão cai na SCB, a tensão também vai cair em Ilhota. Então, o comando é apenas enviado para a SCB, pois quando a tensão subir nesta subestação, ela automaticamente subirá em Ilhota.

O COT (Centro de Operação da Transmissão) e o ONS (Operador Nacional do Sistema) controlam na SCB três equipamentos para o controle de tensão: dois bancos de capacitores, um reator na SCB e um compensador síncrono em Ilhota. Estes equipamentos quando entram em operação, causam um efeito semelhante à adição ou liberação de carga no sistema.

O reator faz com que a tensão de todo o sistema caia, o banco de capacitores faz com que a tensão da barra de 230kV em Blumenau suba em torno de 4,5kV e o ajuste síncrono faz com que a tensão da barra de 69kV em Ilhota fique mais próxima da ideal.

5.6 Lógica de Controle Fuzzy

Inicialmente, o controlador será visto por três módulos, um para cada barra, sendo que, caso necessário, estes módulos se comunicarão entre si.

Cada módulo destes, utiliza principalmente, duas variáveis: o valor de tensão num determinado instante de tempo e o erro de tensão (diferença entre o valor atual de tensão e o valor anterior da tensão). Desta maneira, é possível monitorar o valor atual de tensão e com a derivada saber se a variação está sendo brusca ou suave, possibilitando a ação instantânea do controlador.

Com este sistema, quando os bancos de capacitores, reatores e compensadores síncronos entrarem em atividades, causando uma variação brusca no sistema, o controlador *fuzzy* saberá como agir instantaneamente para tentar minimizar o impacto causado no valor de tensão do sistema.

A ligação entre a SE de Blumenau e Ilhota é fundamental para o bom funcionamento do ajuste de tap da SCB. O controlador precisa estar programado para avaliar o caso de uma queda de tensão em Ilhota ser ou não causada por uma queda em Blumenau.

Quando a queda ou elevação de tensão em Ilhota for causada por SBC, significa que as ações de controle deverão ser tomadas nos Transformadores de SBC. Desta forma, a entrada de erro de Ilhota sempre será a diferença entre o erro de Ilhota e o erro de SBC, pois a diferença dos dois é exatamente o erro de apenas o transformador de Ilhota.

Cada um destes módulos precisa de duas entradas e uma saída. Como a saída é “Aumentar Tap”, “Manter Tap” e “Reduzir Tap”, a saída destes módulos serão três funções “*fuzzy tom*” (Klir, 1995), ou seja, assumem valores fixos “+1”, “0” e “-1” respectivamente. Uma função, quando ativada, representará a ação de aumentar o *tap*, outra função para reduzir o *tap* e uma terceira para representar nenhuma ação.

As entradas de tensão são modeladas por sete funções de pertinência triangulares, representando o estado da tensão em determinados horários do dia, onde o período de maior alteração ocorre normalmente entre 18 e 22 horas.

A entrada do erro da tensão, por sua vez, é modelada por cinco funções de pertinência trapezoidais e triangulares, representando a variação da tensão. A

Figura 4 mostra as entradas do módulo de controle de Blumenau. Em vermelho está a entrada da tensão e em rosa a variação de tensão, que é o momento atual da tensão comparado com a interação anterior. Para os módulos de controle de Itajaí e Ilhota, as funções são as mesmas, muda-se apenas a região do universo de discurso que as funções se localizam.

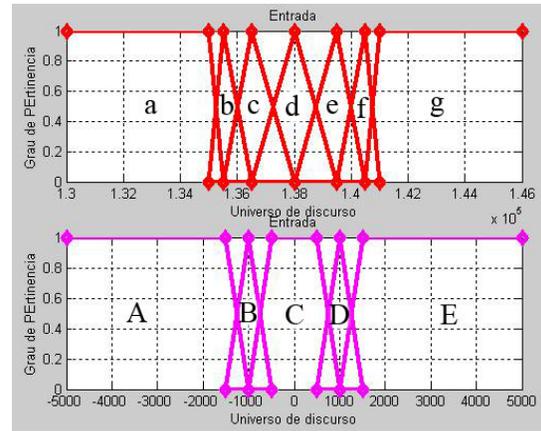


Figura 4. Comparação Controlador PI e Fuzzy

As regras *fuzzy* dos módulos de controle estão demonstradas na tabela 1 a seguir.

Tabela 1. Regras de inferência fuzzy.

	A	B	C	D	E
a	3	3	3	3	3
b	3	3	3	2	2
c	3	3	2	2	2
d	2	2	2	2	2
e	2	2	2	1	1
f	2	2	1	1	1
g	1	1	1	1	1

Na Tabela 1, as letras minúsculas são relativas às funções de pertinência da entrada de tensão, de acordo com a Figura 4. As colunas representam as funções de pertinência da entrada de variação de tensão com as letras maiúsculas. Os valores numéricos representados na tabela são referentes à saída, sendo 1 igual a um comando de diminuir *tap*, 2 igual a não tomar ação e 3 igual a comando de aumentar o *tap*.

6 Simulações

Várias simulações foram realizadas com diversas situações de operação práticas, sempre comparando os resultados do Controlador *Fuzzy* com o controle normalmente executado pelos operadores das SEs da Eletrosul.

A Figura 5 apresenta uma simulação realizada utilizando o controle *fuzzy* no sistema proposto no decorrer de um dia. O intervalo representado por linhas vermelhas é justamente o intervalo de tensão que o operador/controlador deve respeitar no decorrer

do dia e em azul é o valor de tensão no decorrer deste tempo.

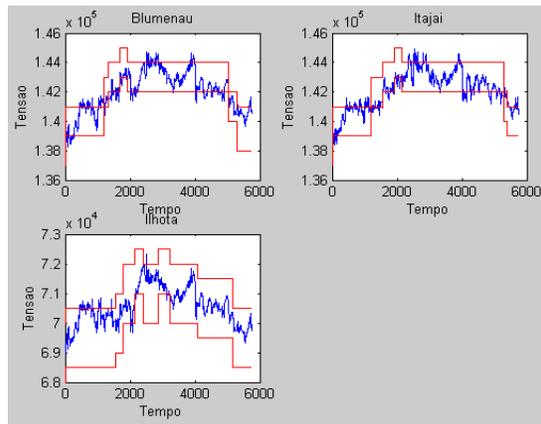


Figura 5. Simulação do sistema com controle *fuzzy*

É possível observar na Figura 5 que o controle é feito para que a tensão permaneça sempre dentro do intervalo proposto. Entretanto, como o controle é *fuzzy*, há momentos que ele dá uma pequena saída do intervalo ideal e não toma uma ação imediata. Isso é realizado para o caso da tensão voltar para os limites rapidamente, de forma que o controlador não tome nenhuma ação desnecessária, procedimento este também realizada pelo operador.

Um fato preocupante para as empresas de transmissão em geral, e Eletrosul em particular, é que muitas ações de mudança de *tap* podem com o tempo desgastar os comutadores de derivação. Assim, sempre busca-se como procedimento padrão, minimizar as operações de ajuste de *tap*. Neste sentido, observa-se na Tabela 2 que o controlador *fuzzy* produziu menos ajustes do que os obtidos pela ação do operador em situações de emergência.

Tabela 2. Comparação dos Resultados do controle *Fuzzy* com o controle dos Operadores.

Número de Taps	Controlador <i>Fuzzy</i>	Operadores
Blumenau	25	30
Itajaí	19	35
Ilhota	18	20

Os dados da Tabela 2, coluna Operadores, são fornecidos pela Eletrosul. Este valor representa uma média de ações executada pelo operador diariamente na SCB, levando em conta momentos de emergência, onde o Controlador *Fuzzy* não tomaria ações. A coluna “Controlador *Fuzzy*” da Tabela 1 representa ações tomadas diariamente pelo “Controlador *Fuzzy*” simulado.

7 Conclusão

A automação de subestações, especialmente em nível de transmissão de energia elétrica, é algo que tem se expandido, viabilizado principalmente pelo

processo de digitalização destas subestações e uso de relés digitais.

Uma das tarefas que pode ser automatizada dentro de uma subestações está ligada ao controle de tensão, em especial, o ajuste dos *taps* dos transformadores através de OLTCs. Com objetivo de evitar ajustes desnecessários para preservar a integridade do comutador de derivação e do próprio transformador, buscou-se emular o raciocínio do operador via implementação de um controlador *fuzzy*.

Como resultado deste trabalho, foi possível comprovar a eficácia da lógica *fuzzy* na implementação de um sistema inteligente, com a capacidade de executar ações de controle semelhantes às ações de um operador de SEs.

Os testes executados demonstram que o controlador foi capaz de resolver problemas da lógica *fuzzy*, além de executar suas ações de acordo com os procedimentos do operador.

O projeto realizado possibilita a aplicação do sistema computacional a qualquer SE, bastando apenas preparar o ambiente de simulação para a SE desejada, ajustando os parâmetros do controlador *fuzzy*.

Agradecimentos

Agradecimentos especiais aos funcionários da Eletrosul Centrais Elétricas S.A, que dispuseram de seu precioso tempo para fornecer apoio ao desenvolvimento deste projeto.

Referências Bibliográficas

- Trindade, M. B.; Martins, H. J. A.; Cadilhe, A.; Chaves, J. A. M. (2004). Identificação de defeitos de OLTCs por emissão acústica. **Anais do T&D IEEE/PES**. São Paulo.
- CIGRE SC 12 WG 12.05 (1983). International survey on Failures in Large Transformers in Service. **ELECTRA**. n. 88. pp 21-42.
- Souza, P. H.; Banon, P. R. (2005). Automação e digitalização de subestações na ELEKTRO. **Anais do VI SIMPASE**. Belo Horizonte – MG.
- Teixeira, R. C.; Brandão Jr, A. F. (2002). An Integrated Control and Supervisory System for Substation Automation. **Anais do T&D IEEE/PES**. São Paulo.
- Martins, A. J. A. L. et alli. (2003). Monitoramento e controle on-line de equipamentos e subestações. **Anais do XVII SNP-TEE**. Uberlândia – MG.
- Klir, G. J.; Yuan, B. (1995). **Fuzzy sets and fuzzy logic – theory and applications**. Prentice Hall. USA. 574p
- Shaw, I. S.; Simões, M. G. (1999). **Controle e Modelagem Fuzzy**. São Paulo: Edgard Blücher. FAPESP. 165p.
- Mohagheghi, S.; Venayagamoorthy, G. K.; Harley, R. G. (2005). An Adaptive Mandani fuzzy logic based controller for a static compensator in a multimachine power system. **Anais do ISAP**.
- Sumar, R. R. et alli. (2005). Fuzzy tuning and applications of a PID controller using universal model. **Anais do VII SBAI**. São Luís – Ma.
- Campos, B. M. et alli. (2004). Digital PI fuzzy control strategies applied to na electric micro-generator system. **Anais do T&D IEEE/PES**. São Paulo.
- Ogata, K. (2003). **Engenharia de Controle Moderno**, 4ª Ed. Prentice-Hall.