

# ANÁLISE DE DESEMPENHO DE CONTROLADORES FUZZY APLICADOS AO CONTROLE SECUNDÁRIO DO SISTEMA DE GERAÇÃO DO AMAPÁ

C. E. U. Costa, UFPA; R. N. Machado CEFET-PA; J. A. L. Barreiros, UFPA; U. H. Bezerra, UFPA;  
ceueno@uol.com.br nonatamac@ig.com.br barreiro@ufpa.br bira@ufpa.br

A. M. D. Ferreira, CEFET; W. B. Júnior, UFPA; C. Tavares-da-Costa, UFPA; J. P. B. Vieira, UFPA;  
andre@amazon.com.br walbarra@ufpa.br cartav@ufpa.br jpaulovieira@bol.com.br

B. Rodrigues, ELETRONORTE; N. Bramatti, ELETRONORTE e P. W. B. Duarte, ELETRONORTE  
rodrigues@eln.gov.br bramatti@eln.gov.br wenilton@eln.gov.br

**Resumo-** Este trabalho apresenta a comparação entre os desempenhos de um controlador fuzzy Supervisório PID, um controlador fuzzy e um controlador PID a parâmetros fixos para o controle carga-freqüência do sistema elétrico de potência da Eletronorte no Estado do Amapá. No controlador fuzzy supervisório PID, regras fuzzy são utilizadas para determinar os parâmetros ( $k_p$ ,  $k_i$  e  $k_d$ ) do PID, no controlador fuzzy as regras fuzzy são utilizadas para gerar um sinal de controle em função do sinal de desvio de freqüência e da derivada do desvio de freqüência do sistema analisado. Um programa de simulação para sistemas elétricos de potência multimáquinas foi desenvolvido em C++ orientado à objetos para representar o sistema de potência real. Modelos do sistema real são utilizados no simulador e os desempenhos dos controladores fuzzy são comparados com um controlador PID a parâmetros fixos e mostrados no presente artigo.

*Palavras-chave*—Controle carga-freqüência, Lógica Fuzzy, Controle Fuzzy, Controle PID, Sistemas de Potência.

## I. INTRODUÇÃO

Os controladores do tipo PID, com parâmetros fixos, ainda são os mais utilizados nos sistemas elétricos de potência para a realização de ações de controle nas malhas de controle de freqüência e de tensão, devido a sua simplicidade de implementação. Esses controladores são geralmente projetados para um determinado ponto de operação e normalmente apresentam bom desempenho em condições operacionais semelhantes àquela do projeto. Porém, quando ocorrem mudanças maiores no ponto de operação do sistema, o controlador pode não mais apresentar um desempenho satisfatório diante da nova condição operacional (Talaq e Al-Base, 1999). Dessa forma, para manter um bom desempenho numa ampla faixa de operação é necessário que, diante de uma mudança no ponto de operação, o controlador possa ter seus parâmetros automaticamente ajustados para o novo estado

do sistema adaptando-se às alterações que ocorrem no sistema.

A lógica fuzzy vem sendo utilizada no desenvolvimento de controladores devido a sua característica da ação de controle fuzzy poder ser descrita de modo qualitativo, ou seja, uma ação que muitas vezes é realizada por um operador experiente do sistema torna-se difícil de se transformar em uma equação matemática, mas pode ser facilmente implementada por uma expressão qualitativa na lógica fuzzy.

A teoria de sistemas fuzzy, devido proporcionar a possibilidade de supervisão inteligente, baseada apenas em informações qualitativas sobre a operação do sistema, surge como uma interessante alternativa a ser investigada no controle carga-freqüência de sistemas de potência. A razão disso é que, com o emprego de um esquema de supervisão fuzzy, é possível até mesmo prescindir de identificadores recursivos operando on-line, como ocorre na maioria dos controladores adaptativos do tipo auto-ajustável.

Com base nas características acima citadas dos sistemas Fuzzy, neste artigo compara-se a utilização de um esquema de controle discreto fuzzy e um controlador PID com supervisão fuzzy para o controle suplementar carga-freqüência do sistema de geração do Amapá, da ELETRONORTE, visando a avaliação de alternativas para a implantação no sistema real de uma malha de controle secundário digital para o controle conjunto das unidades geradoras, objetivando corrigir automaticamente os desvios de freqüência. Os resultados mostrados neste trabalho referem-se aos estudos feitos através de simulação dinâmica do sistema, utilizando um programa multimáquinas desenvolvido em C++, formando o Simulador Dinâmico do Sistema Elétrico do Amapá. Nestes estudos, os geradores do sistema foram representados por modelos não-lineares de 5ª ordem e as cargas como impedâncias constantes. Para a obtenção de resultados mais próximos da realidade, os modelos utilizados para os reguladores de tensão e velocidade do sistema são bastante detalhados, seguindo-se os dados fornecidos pela empresa.

Para efeito de análise, o desempenho dos controladores baseados em lógica fuzzy são comparados com o desempenho de um controlador PID a parâmetros fixos, bem ajustado (Angst et al, 2001). Resultados de simulação mostram o

---

Este trabalho conta com o apoio financeiro da ELETRONORTE via o programa P&D da ANEEL referente ao ciclo 2000-2001, e apresenta resultados da execução do projeto de pesquisa "Controle Coordenado das Usinas Térmicas e Hidráulicas do Sistema de Geração do Amapá", desenvolvido pelo NESC/UFPA – Núcleo de Energia, Sistemas e Comunicação do Departamento de Engenharia e Computação da Universidade Federal do Pará em parceria com a Regional do Amapá da ELETRONORTE.

desempenhos desses controladores para diferentes pontos de operação.

## II. O AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

Para efeito de estudo dinâmico foi desenvolvido em C++ um simulador denominado de Simulador Dinâmico do Sistema Elétrico do Amapá, formado por um conjunto de ferramentas computacionais contendo as rotinas de integração numérica, de montagem e alteração das matrizes representativas da rede elétrica, de fluxo de carga para cálculo das condições iniciais, e rotinas auxiliares para entrada de dados e apresentação de resultados. Na figura 1 é apresentada uma tela com as informações de autoria do simulador desenvolvido para a Centrais Elétricas do Norte do Brasil – ELETRONORTE.



Figura 1. Tela de apresentação do simulador.

O ambiente de simulação desenvolvido incorpora os modelos reais dos componentes do sistema de geração e transmissão do Amapá, bem como podem ser incorporados, via estudos iniciais de fluxo de carga, vários cenários de operação em regime permanente, a serem utilizados nos estudos de controle automático da geração e de estabilidade transitória. Na figura 2 é apresentado um exemplo de resultados obtidos com o estudo de fluxo de carga necessário para estabelecer as condições iniciais para a realização dos estudos dinâmicos e transitórios.

Como o simulador trabalha com modelos de ordem elevada (5ª ordem) para a representação das máquinas síncronas e incorpora modelos detalhados para o reguladores de tensão, ele também é apropriado para a realização de estudos transitórios devido à ocorrência de grandes perturbações, como curto-circuito e outros.

Figura 2. Exemplo de resultados de estudo de fluxo de carga para o sistema elétrico do Amapá.

Na figura 3 apresenta-se uma tela que ilustra a interface para a entrada de parâmetros do sistema gerador, a qual é customizada para o sistema de geração do Amapá. Neste sistema tem-se a UHE - Coaracy Nunes, e a UTE – Santana com unidades de geração à diesel (unidades Wartsilla) e à gás (unidades LM2500). Pela interface apresentada na figura 3, o usuário do simulador poderá selecionar o sistema gerador para alteração de parâmetros, tendo assim acesso aos parâmetros das máquinas síncronas, dos reguladores de velocidade e de tensão.

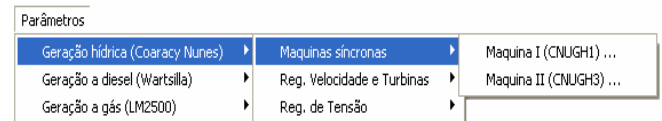


Figura 3. Entrada de parâmetros para o sistema gerador.

Os eventos de falta que podem ser simulados no simulador dinâmico correspondem a curtos-circuitos trifásicos; variações de carga nas subestações; inserção e retirada de elementos da rede como linhas, transformadores, bancos de capacitores e reatores; perdas total e parcial de unidades geradoras; e variações nas referências de carga das máquinas. A tela apresentada na figura 4, ilustra a janela de diálogo para a escolha do evento, sendo neste caso um curto-circuito

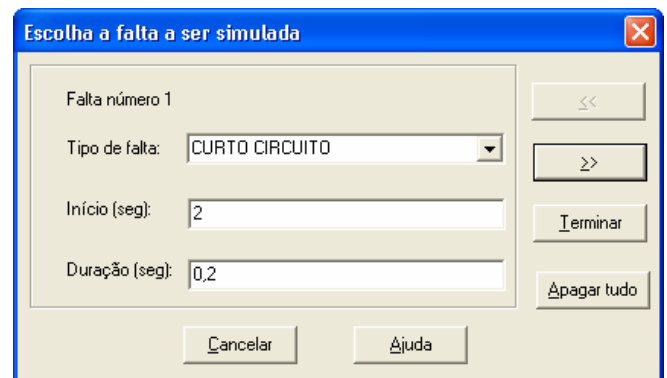


Figura 4. Tela para a definição do tipo de evento de falta a ser simulado.

### III. REGULAÇÃO SECUNDÁRIA

O objetivo da regulação secundária é zerar o erro de regime de frequência que permanece no sistema após a ação da regulação primária em função de uma perturbação no sistema. Neste trabalho foram implementadas duas técnicas fuzzy para realizar esse controle, que são descritas a seguir.

#### A. Controlador Fuzzy

O primeiro esquema de controle fuzzy implementado é mostrado na figura 5.

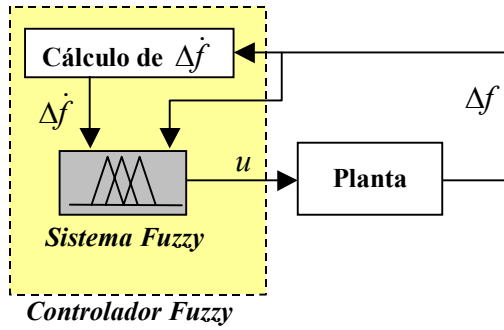
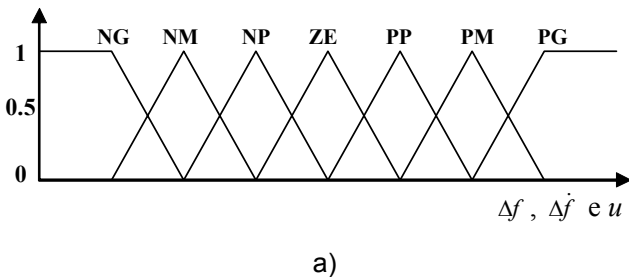


Figura 5. Esquema do controlador fuzzy implementado.

Como pode-se observar, o sistema fuzzy recebe como sinal de entrada o desvio de frequência ( $\Delta f$ ) e a derivada calculada do desvio da frequência ( $\Delta \dot{f}$ ). A saída do sistema fuzzy é o sinal de controle que atuará no regulador de velocidade.

Para esse controlador fuzzy, deseja-se que o sistema apresente algumas características como tempo de subida adequado, mínimo sobressinal e erro de regime nulo, ou seja, o controlador fuzzy deve ter o comportamento típico de um bom controlador PID, mas que não apresenta parâmetros fixos e, portanto, apresenta melhor capacidade de se adaptar às alterações e não-linearidades da planta controlada.

O sistema fuzzy é representado pelas seguintes variáveis linguísticas: NG, NM, NP, ZE, PP, PM e PG, que significam, respectivamente, negativo grande, negativo médio, negativo pequeno, zero, positivo pequeno, positivo médio e positivo grande. As funções de pertinências utilizadas, para as entradas e saídas, são mostradas na figura 6, a seguir, assim como a base de regras empregadas (Zak, 2003).



a)

	$\Delta \dot{f}$						
	NG	NM	NP	ZE	PP	PM	PG
NG	NG	NG	NG	NG	NM	NP	ZE
NM	NG	NG	NM	NM	NP	ZE	PP
NP	NG	NM	NP	NP	ZE	PP	PM
ZE	NM	NM	NP	ZE	PP	PM	PM
PP	NM	NP	ZE	PP	PP	PM	PG
PM	NP	ZE	PP	PM	PM	PG	PG
PG	ZE	PP	PM	PM	PG	PG	PG

b)

Figura 6. a) Funções de pertinência b) base de regras para o controlador fuzzy.

#### B. Controlador PID Supervisório Fuzzy

O segundo esquema de controle implementado foi um controlador PID cujos parâmetros  $k_p$ ,  $k_i$  e  $k_d$  são ajustados a cada instante de amostragem por três sistemas fuzzy que geram os novos valores dos parâmetros  $k_p$ ,  $k_i$  e  $k_d$  do controlador. Esse ajuste é feito de acordo com os novos valores do desvio da frequência e da derivada do desvio da frequência. Este modelo de controlador é uma modificação do controlador proposto por (Zhao *et al.* 1993).

Na referência citada anteriormente, foi proposto um controlador supervisor do tipo gain-scheduling no qual são gerados três sistemas fuzzy que determinam os valores de

parâmetros denominados de  $K_p'$ ,  $K_d'$  e  $\alpha$ . As variáveis fuzzy  $K_p'$  e  $K_d'$ , normalizadas entre 0 e 1, são utilizadas para se obter os ganhos proporcional ( $K_p$ ) e derivativo ( $K_d$ ), respectivamente, do controlador PID. Por outro lado, o ganho integral ( $K_i$ ) é obtido em função dos ganhos  $K_p$  e  $K_d$  e da variável fuzzy  $\alpha$ . Portanto, seu valor é dependente das possíveis variações que possam ocorrer nos ganhos proporcional e derivativo. Esta característica dificulta o ajuste dos

limites das funções de pertinência ( $\Delta f$  e  $\Delta \dot{f}$ ).

Neste trabalho, também se utilizou três sistemas fuzzy, mas cujas regras determinam, de forma direta e independente, os parâmetros do controlador PID, de acordo com os valores do desvio e da derivada do desvio de frequência, a cada instante de amostragem.

Esta relação de independência entre os parâmetros do controlador PID supervisor permite uma maior liberdade para o ajuste das funções de pertinência de cada sistema fuzzy, sem que o ajuste de uma interfira no ajuste da outra.

O esquema para o controlador PID Supervisor Fuzzy é mostrado na figura 7.

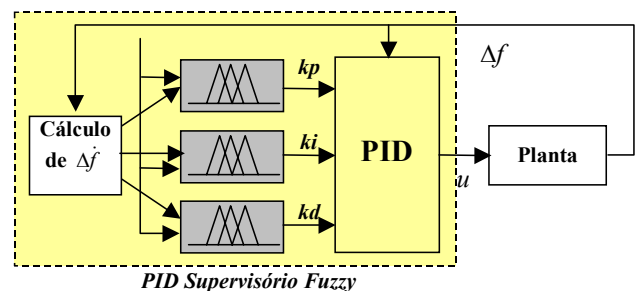


Figura 7. Esquema de controle para o controlador PID Supervisor Fuzzy.

#### IV. RESULTADOS DE SIMULAÇÕES

Os controladores fuzzy apresentados foram implementados no simulador multimáquinas desenvolvido, utilizando-se dados reais do sistema hidrotérmico do Estado do Amapá, que é constituído de 3 unidades hidráulicas sendo 2 delas de 20 MW e a terceira de 30 MW; 4 unidades diesel de 16 MW (motores Wärtsilä), e 3 unidades a gás de 19 MW (máquinas LM2500) (Angs et al, 2001). As unidades térmicas estão instaladas em Santana, formando a UTE Santana, enquanto que as unidades hidráulicas estão na UHE Coaracy Nunes. As duas usinas são interligadas por uma linha de transmissão de 110 km em 138 kV.

Neste trabalho, foi utilizado um modelo equivalente de 4 máquinas representando o sistema de geração do Amapá, sendo duas máquinas para representar a usina hidrelétrica (UHE-CN 01 e UHE-CN 02), uma máquina equivalente para motores Wärtsilä (UTE - SANTANA WARTISILA) e outra para as unidades a gás (UTE - SANTANA LM2500), que corresponde a uma configuração de operação para a rede elétrica fornecida pela empresa.

Os gráficos a seguir mostram o desempenho dos controladores fuzzy quando o sistema sofre algumas perturbações de carga. Os resultados são comparados com o desempenho de um controlador PID fixo com os valores dos parâmetros baseados nos ajustes propostos por (Angst et al, 2001).

##### A. Caso base 01:

Com o controle secundário em uma das máquinas hídricas e perturbação de carga com aumento de 20% da carga na barra de maior carregamento do sistema. Vale ressaltar que as máquinas hídricas possuem os mesmos modelos

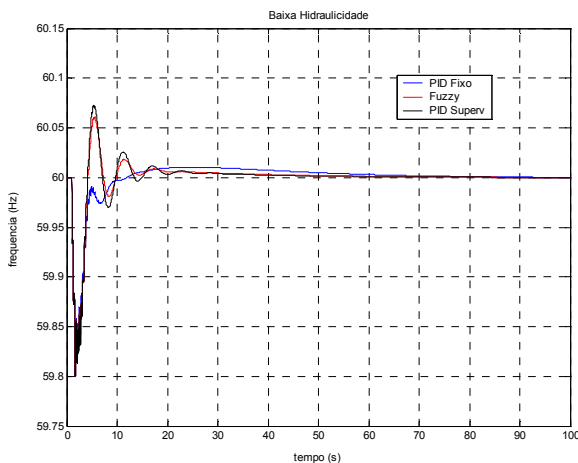


Figura 8. Caso base 01: Variação de frequência para aumento de 20% da carga.

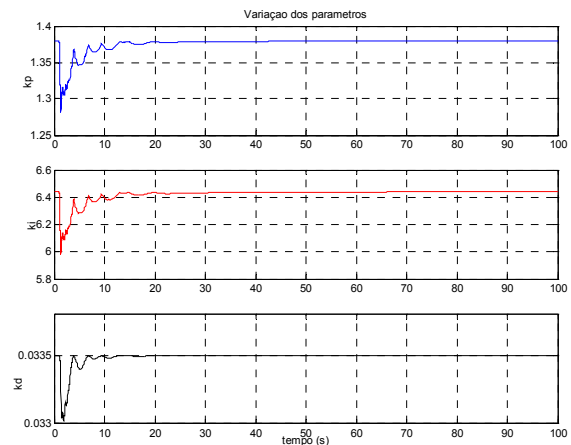


Figura 9. Caso base 01: Variação dos parâmetros do PID supervisor.

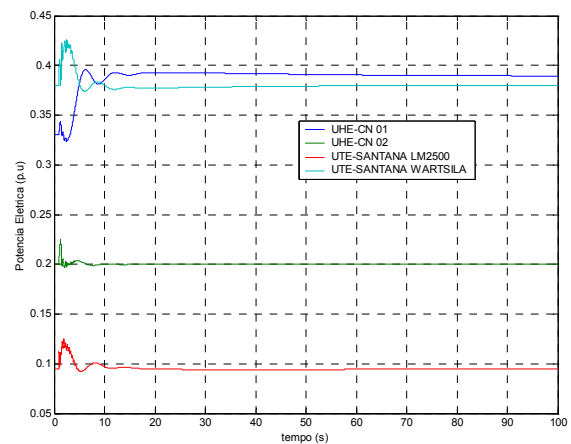


Figura 10. Caso base 01: Variação da potência elétrica gerada.

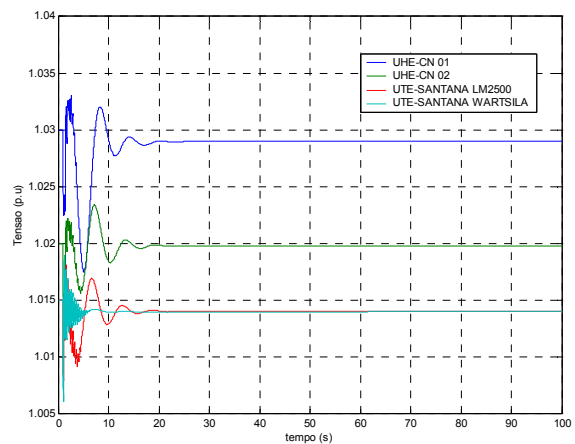


Figura 11. Caso base 01: Tensão das barras de geração.

##### B. Caso base02:

Com o controle secundário na máquina a gás LM2500, sob perturbação de carga com aumento de 20% da carga na barra de maior carregamento do sistema.

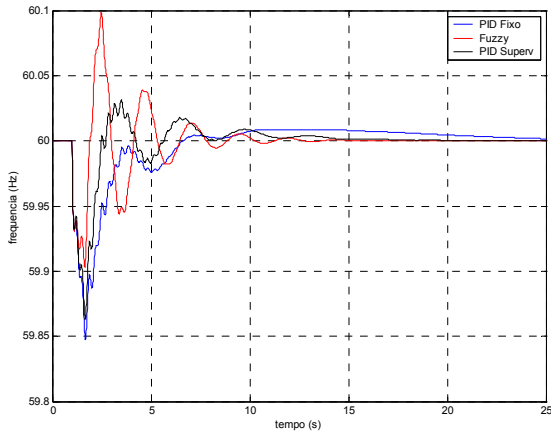


Figura 12. Caso base 02: Variação de frequência para aumento de carga de 20% .

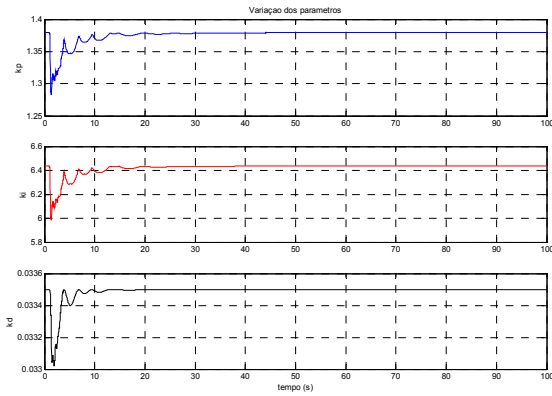


Figura 13. Caso base 02: Variação dos parâmetros do PID supervisorio.

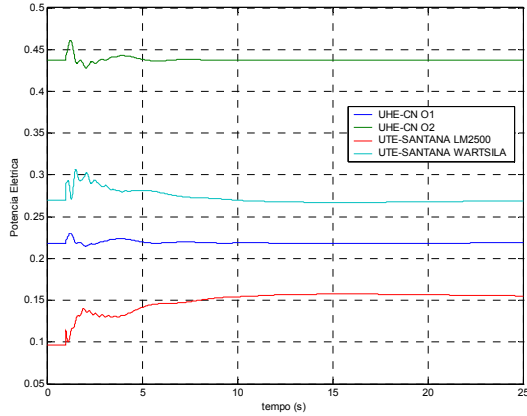


Figura 14. Caso base 02: Variação da potência elétrica gerada.

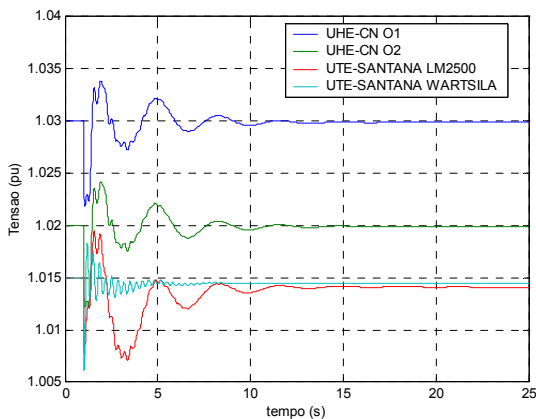


Figura 15. Caso base 02: Variação da tensão elétrica nas barras de geração.

C. Caso base 03:

Com o controle secundário na máquina a diesel Wartsila e sob perturbação de carga com aumento de 20% da carga na barra de maior carregamento do sistema.

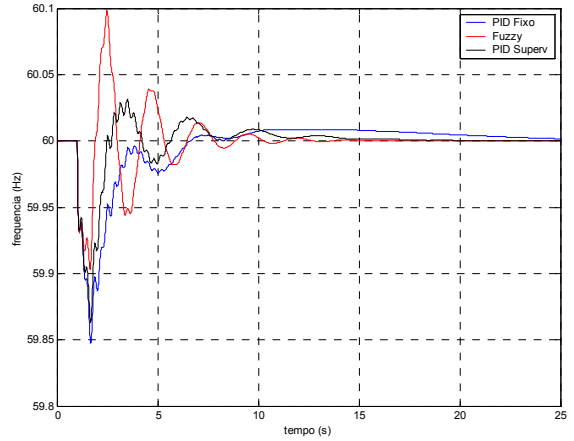


Figura 16. Caso base 03: Frequência para aumento na carga de 20%.

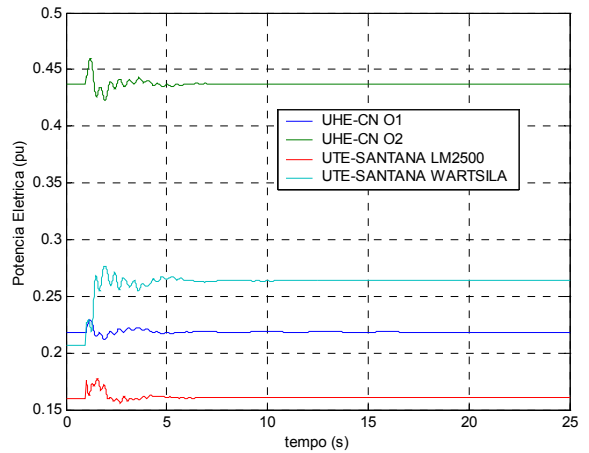


Figura 17. Caso base 03: Variação da potência elétrica gerada.

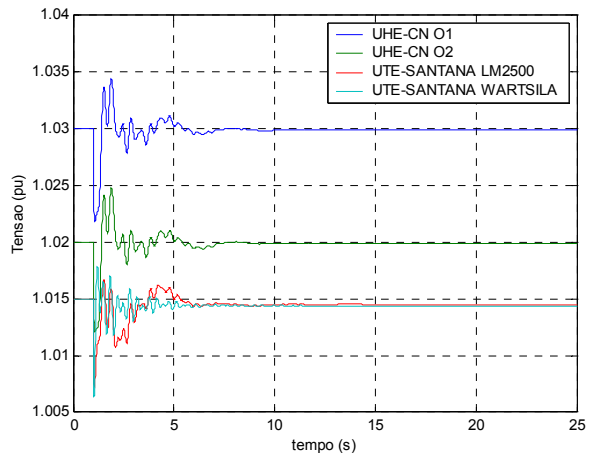


Figura 18. Caso base 03: Variação da tensão nas barras de geração.

## V. ANALISE DOS RESULTADOS

Neste trabalho foram implementados dois controladores fuzzy sendo o desempenho dos mesmos comparados com o desempenho de um controlador PID a parâmetros fixos. Como pode ser observado nas curvas de frequência, os controladores fuzzy apresentam respostas mais rápidas que o controlador a parâmetros fixo, e também tempos menores de acomodação do erro de regime. Sendo que entre os controladores baseados em regras fuzzy o controlador supervisorio apresenta um resultado melhor pois as excursões da frequência durante o transitório são de amplitudes menores e possuem um tempo de acomodação praticamente igual ao do controlador fuzzy e bem mais rápido que o do controlador fixo.

Observa-se também pelos resultados apresentados que quando as máquinas da UTE Santana estão responsáveis pela regulação secundária, obtém-se respostas mais rápidas e tempos de acomodação do erro de regime menores, do que quando esse controle é feito pela UHE Coaracy Nunes. Neste caso também os controladores fuzzy têm, no geral, melhor desempenho que o PID fixo.

Uma situação interessante é observada quando as máquinas Wartisila estão operando com regulação secundária de frequência. Neste caso, além de apresentarem correções rápidas do erro de frequência, também diminuem sensivelmente o tempo necessário para corrigir as variações de tensão no sistema, como pode ser visto pelos resultados apresentados na figura 18.

Analisando as curvas da potência elétrica gerada, pode-se observar que a máquina em que o controle secundário foi implementado fica na responsabilidade de assumir a variação de carga ocorrida no sistema enquanto que as demais máquinas apresentam uma pequena variação para logo em seguida retornarem ao valor inicial no regime permanente.

As figuras 9 e 13 mostram as variações dos parâmetros  $k_p$ ,  $k_i$  e  $k_d$  do controlador supervisorio fuzzy, evidenciando que as variações ocorrem dentro de uma faixa pequena em relação ao valor de regime, o que demonstra a factibilidade de implementação real.

O melhor desempenho esperado para os controladores fuzzy em comparação com o controlador PID fixo, pode ser explicado devido a característica do controlador PID fixo ser projetado para um determinado ponto de operação, sendo que para essa situação esse controlador apresenta uma ótima resposta, porém quando ocorrem alterações no sistema que o levam para outro ponto de operação, o controlador fixo pode não apresentar um bom desempenho e um controlador cujos ajustes dos parâmetros é feito com base nas variações do sistema, como é o caso do controlador supervisorio fuzzy, passa a apresentar um desempenho melhor em função dessa característica.

Simulações mais exaustivas, varrendo um grande número de cenários de operação para o sistema do Amapá ainda devem ser realizadas para a obtenção de conclusões mais consolidadas com relação ao desempenho dessas estratégias de controle, porém os resultados aqui apresentados são animadores e estimulam a busca de novas experimentações.

## VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C. Angst, F. Damasceno, e H. M. N. Brito, "Controle de frequência e potência ativa em sistemas hidrotérmicos isolados" – IX ERLAC., 2001
- [2] J. Talaq, e F. Al-Basre . Adaptive Fuzzy Gain Scheduling for Load Frequency Control. IEEE Transactions on Power Systems, 14(1): 145-150, 1999.
- [3] Z. Zhao, M. Tomizuka, e S. Isaka, "Fuzzy Gain Scheduling of PID Controllers", IEEE Transactions on Systems Man. and Cybernetics, 23(5):1392-1398, 1993.
- [4] C. E. Fosha, e O. I. Elgerd, "Optimum Megawatt-Frequency Control of Multiarea Electric Energy Systems", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 89:556-563, 1970.
- [5] K. J. Aström, e B. Wittenmark, "Computer-Controlled Systems: Theory and Design" 3ª Ed. Ed. Prentice-Hall., 1998
- [6] X. Vieira Filho, "Operação de Sistemas de Potência com Controle Automático de Geração", Ed. Campus. Rio de Janeiro, 1984
- [7] S. H. Zak., Systems and Control, Oxford University Press, New York, 2003.
- [8] Mathworks - Simulink: 'Dynamic System Simulation for MATLAB' - The MathWorks Inc., 1998.