

# ESTRATÉGIAS DE CONTROLE PID DIGITAL E FUZZY APLICADAS A UM SISTEMA MICRO-GERADOR DE ENERGIA ELÉTRICA

**Bárbara Medeiros Campos, Carlos Tavares da Costa Jr., Walter Barra Jr., Katia Cilene Ferreira da Silva, José Augusto Lima Barreiros.**

UFPA – CT – DEEC – LACOS. Av. Augusto Corrêa, nº 01, CEP: 66.075-900. Belém, Pará, Brasil.  
belabmc@hotmail.com, cartav@ufpa.br, walbarra@ufpa.br, k\_tiacilene@yahoo.com.br, barreiro@ufpa.br

**Resumo.** *Este artigo investiga estratégias de identificação e controle digital aplicadas à regulação de tensão de um sistema micro-gerador de 10 KVA. A técnica de identificação paramétrica é utilizada para a obtenção de um modelo representativo do sistema. De posse de um modelo adequado do sistema, são projetados controladores digitais do tipo Proporcional Integral Derivativo baseado no método do lugar geométrico das raízes, e, com base nos parâmetros deste controlador é projetado um similar utilizando lógica fuzzy. Estes controladores são comparados quanto ao seu desempenho na função de reguladores automáticos de tensão, mantendo a tensão terminal do gerador síncrono em seu valor nominal de operação, para variações da referência e da carga aplicada ao sistema.*

**Palavras-chave:** *Controle Digital, Controlador PID Fuzzy, Identificação paramétrica, Gerador síncrono, Regulador Automático de Tensão (RAT).*

## 1. Introdução

O Regulador Automático de Tensão (RAT) tem a função de manter a tensão terminal do gerador dentro de seus limites para qualquer variação na potência reativa demandada.

Nos sistemas de excitação, o RAT é um controlador que compara a tensão de saída do gerador com o seu valor nominal, executando as ações corretivas na direção desejada, através da variação apropriada da tensão do enrolamento de campo do gerador.

Quando o problema de controle é o de regular a saída do processo em torno de um ponto de operação, é comum considerar o erro, a integral e a derivada do erro como entrada do controlador, mesmo quando se emprega um controlador baseado em regras como na lógica fuzzy.

Controladores PID fuzzy são bastante simples e capazes de proporcionar resultados pelo menos tão bons quanto os dos controladores PID bem sintonizados, sendo suas variáveis de entrada e ação de controle dadas em termos lingüísticos (representados por conjuntos fuzzy). Todavia, em um controlador PID fuzzy é difícil relacionar o efeito de cada fator de ganho no tempo de subida, sobre-sinal máximo e tempo de acomodação, pois este controlador é frequentemente não-linear e possui mais parâmetros a serem ajustados que um controlador PI convencional.

Os controladores PID convencionais podem ser sintonizados de várias formas, incluindo ajuste por tentativa e erro, método de Ziegler-Nichols, posicionamento de pólos, lugar geométrico das raízes, etc., Astrom e Hagglund (1995).

Não há, ainda, uma equivalência total entre os métodos de sintonia de controladores PID e uma estratégia para controladores PID fuzzy. Na tentativa de cobrir esta lacuna, há uma estratégia que consiste em: sintonizar um controlador PID, substituí-lo por um controlador fuzzy linear, tornar o mesmo não-linear e fazer um ajuste “fino”, se necessário, Jantzen, (1998).

No entanto, para se projetar e ajustar corretamente um controlador, é útil conhecer o modelo dinâmico da planta a ser controlada, que descreve a relação entre as variações de controle e as variações da saída.

Assim, este artigo tem por objetivos a obtenção de um modelo para um sistema micro-gerador síncrono e, a partir deste modelo, realizar o projeto e a implementação de controladores digital PID e fuzzy PID que desempenhem o papel de um RAT, proporcionando ao sistema uma resposta rápida, com bom amortecimento, para variações na referência e perturbações de carga.

## 2. O SISTEMA MICRO-GERADOR DE ENERGIA ELÉTRICA

O sistema micro-gerador é composto por um motor CC, um gerador síncrono e reguladores de tensão e velocidade originalmente analógicos (Oliveira, 2003).

Os reguladores de tensão e de velocidade têm, respectivamente, o objetivo de manter o valor RMS da tensão terminal do gerador síncrono e a velocidade de rotação (frequência) do motor CC dentro dos seus valores nominais de operação (220 V RMS em cada fase e 60 Hz, respectivamente).

O controle da tensão terminal é realizado através do controle da tensão de campo do gerador e o controle de velocidade é feito através da aplicação de uma tensão contínua na armadura do motor CC. A Fig. (1) mostra o diagrama de blocos do sistema micro-gerador, bem como as duas malhas de realimentação que controlam a tensão terminal e a frequência da máquina.

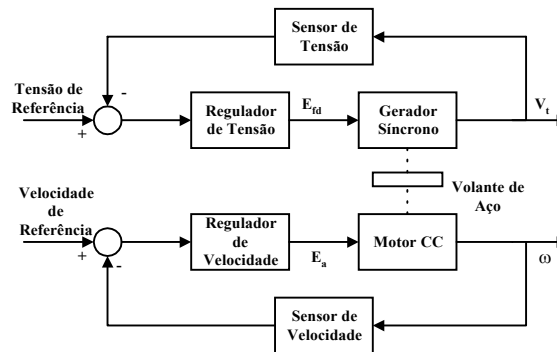


Figura 1. Diagrama de blocos do sistema micro-gerador.

### 2.1. Gerador Síncrono e Motor CC

O gerador síncrono é uma máquina de 10 kVA, 1200 RPM, 60 Hz e 6 pólos, que está diretamente acoplado ao eixo do motor CC de 9 kW e 1200 RPM, o qual simula uma máquina primária de um sistema real de geração de energia elétrica. Entre os dois, é colocado um volante de aço, que simula a inércia dos grandes geradores. A Fig. (2) mostra a fotografia do conjunto motor CC – gerador síncrono.



Figura 2. Fotografia do conjunto motor CC – gerador síncrono.

## 2.2. Regulador de Tensão

O regulador de tensão é composto por uma ponte retificadora monofásica mista, um circuito de comando dos tiristores da ponte, um sensor da tensão terminal, um microcomputador e uma placa de aquisição analógica/digital-digital/analógica (A/D-D/A), que foram inseridos para implementação de controle digital. A Fig. (3) mostra o diagrama de blocos para a implementação do regulador de tensão.

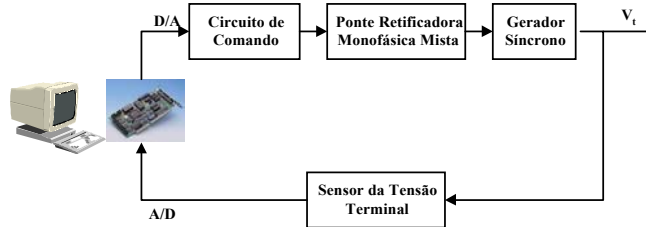


Figura 3. Diagrama de blocos para implementação do regulador de tensão.

## 3. IDENTIFICAÇÃO PARAMÉTRICA DO SISTEMA MICRO-GERADOR

Embora as leis da ciência, como a física e outras, sejam capazes de descrever bem qualitativamente o funcionamento das plantas de controle, muitas vezes elas não são adequadas para uma descrição quantitativa satisfatória da dinâmica da planta que se deseja controlar. Nestas circunstâncias, deve-se utilizar o processo de construção de modelos através de dados experimentais, chamado de identificação de sistemas. Neste processo, busca-se desenvolver modelos da dinâmica da planta que sejam adequados para o projeto de um controlador que faça com que a nova dinâmica da planta seja estável e tenha bom desempenho.

O primeiro passo no processo de identificação é a seleção do intervalo de amostragem.

### 3.1. Escolha do Intervalo de Amostragem

O teorema de Shannon diz que um sinal que não contém componentes de frequência acima de  $1/2T_s$  pode ser determinado unicamente a partir de amostras de tal sinal separadas por  $T_s$ . Na prática, entretanto, a frequência de amostragem é normalmente escolhida entre 5 e 10 vezes maior do que a maior frequência de interesse contida nos dados.

Assim, em Oliveira (2003) é descrita a realização de um teste de resposta em frequência na malha de regulação de tensão do sistema micro-gerador aqui utilizado, obtendo-se uma largura de banda de 4,5 Hz. Selecionou-se, então, uma frequência de amostragem de 50 Hz ( $T_s = 20\text{ ms}$ ), para dar uma margem de segurança à amostragem do experimento de identificação. Com o intervalo de amostragem selecionado, pode-se, então, projetar o sinal de excitação que será aplicado ao sistema.

### 3.2. Escolha do Sinal de Excitação

O sinal de excitação é em geral uma sequência binária pseudo-aleatória (SBPA) de nível adequado gerada pelo computador (ver Fig. (4)).

Os sinais SBPA são gerados por meio de registradores de deslocamento com realimentação de um bit resultante da operação “ou-exclusivo” entre os conteúdos binários de dois dos registradores. Escolhe-se as frequências máxima e mínima do sinal de excitação SBPA de modo a conter toda a banda passante da planta do sistema, Horowitz and Hill (1987).

A amplitude do sinal SBPA é selecionada medindo-se o nível de ruído do sensor da tensão terminal do gerador síncrono, que foi de 100 mV. Então, selecionou-se uma amplitude de 200 mV, permitindo a obtenção de um modelo linear e com razoável relação sinal/ruído na saída.

Uma vez selecionado o intervalo de amostragem e projetada a SBPA a ser aplicada, o próximo passo é a execução do teste de identificação.

### 3.3. Execução do Teste de Identificação

Esta etapa é onde os dados necessários ao processo de identificação são obtidos e consiste da aplicação da SBPA ao sistema e a aquisição da saída correspondente. Para isso, foi desenvolvido, em *linguagem pascal orientada a objetos*, um programa que gera uma SBPA e captura a resposta do sistema, Campos (2003).

Durante a execução do teste, a frequência e o valor RMS da tensão terminal do gerador síncrono foram ajustados manualmente de modo que operasse em seu valor nominal, 60 Hz e 220V RMS, o que equivale, no sensor de tensão terminal, a uma tensão de aproximadamente 4 V. A tensão de controle necessária para atingir este valor é somada à SBPA, de forma que a planta seja identificada em torno do ponto de operação de 220 V RMS. A Fig. (4) ilustra os dados obtidos quando aplicada o sinal SBPA ao sistema.

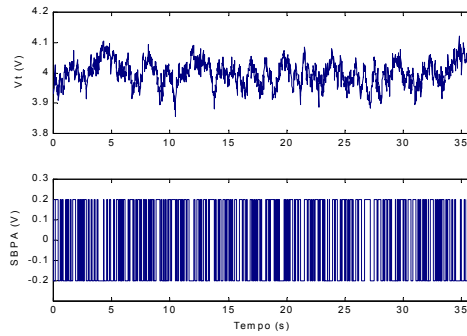


Figura 4. Saída (tensão terminal) e entrada (SBPA) do sistema.

### 3.4. Escolha da representação matemática

Neste trabalho, utiliza-se um modelo do tipo ARX (Auto-Regressivo com Entradas Exógenas), cuja estrutura é dada pela seguinte equação:

$$y(k) = \frac{B(q)}{A(q)} u(k) + \frac{1}{A(q)} e(k) \quad (1)$$

com  $A(q^{-1}) = 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_{n_a} q^{-n_a}$ ,  $B(q^{-1}) = b_1 q^{-1} + \dots + b_{n_b} q^{-n_b}$  e sendo que  $u(k)$ ,  $y(k)$ ,  $e(k)$  representam os sinais de entrada, saída e ruído branco discreto, respectivamente.

### 3.5. Estimação de Parâmetros

Essa etapa começa com a escolha do algoritmo a ser utilizado. Neste caso, foi selecionado o método dos mínimos quadrados (MQ), o qual é muito utilizado em identificação para obtenção de parâmetros de sistemas dinâmicos, Aguirre (2000).

Seja a estrutura do tipo ARX cuja expressão em equação de diferenças é dada por:

$$y(k) = -a_1 y(k-1) - \dots - a_{n_a} y(k-n_a) + b_1 u(k-1) + \dots + b_{n_b} u(k-n_b) \quad (2)$$

onde  $n_a$  e  $n_b$  são, respectivamente, o número de coeficientes do denominador e do numerador da função de transferência discreta a ser identificada.

Para um dado sistema, aplica-se uma determinada entrada, obtendo-se  $N$  observações, com  $\{u(1), u(2), \dots, u(N)\}$  sendo as amostras das entradas, e  $\{y(1), y(2), \dots, y(N)\}$  as das saídas.

O vetor de parâmetros,  $\hat{\theta}$ , que se deseja estimar é dado por:

$$\hat{\theta} = [a_1 \dots a_n \ b_1 \dots b_n]^T \quad (3)$$

e o vetor das regressões por:

$$x(k+1) = [-y(k) \dots -y(k-n+1) \ u(k) \dots u(k-n+1)] \quad (4)$$

Em termos matriciais, para as observações obtidas tem-se a seguinte expressão:

$$Y = X\hat{\theta} + e \quad (5)$$

onde

$$\begin{aligned} e &= [e(k) \ e(k+1) \dots e(k+N)]^T \\ y &= [y(k) \ y(k+1) \dots y(k+N)]^T \end{aligned} \quad (6)$$

e a matriz  $X$  é dada por:

$$X = [x(k) \dots x(N)]^T \quad (7)$$

A estimativa dos parâmetros pelo método dos mínimos quadrados é dada por (Aguirre, 2000):

$$\hat{\theta} = [X^T X]^{-1} X^T Y \quad (8)$$

desde que  $X^T X$  seja uma matriz não singular. Para isso, a entrada deve ser um sinal persistente, que deve excitar toda a dinâmica de interesse da planta.

### 3.6. Escolha da estrutura e determinação do modelo

Para a aplicação considerada, sabe-se que é uma planta com dominância dada pela constante de tempo transitória de eixo direto, e uma constante de tempo mais rápida subtransitória. Deste modo, optou-se por uma estrutura simples, com dois pólos e um zero e quatro coeficientes, determinados usando MQ, resultou no modelo expresso pela seguinte equação:

$$H(z^{-1}) = \frac{-0,0231z^{-1} - 0,0352z^{-2}}{1 - 0,3746z^{-1} - 0,4643z^{-2}} \quad (9)$$

### 3.7. Validação do modelo identificado

Nesta etapa, o objetivo é tentar determinar se um dado modelo é válido ou não. Várias ferramentas podem ser utilizadas na verificação da qualidade de um modelo, tais como simulações do modelo e comparações com saídas reais, a análise de resíduos e outras, Aguirre (2000).

A Fig. (5) mostra a comparação das respostas do sistema real e do modelo identificado de 2ª ordem, para novas aplicações de sinais SBPA.

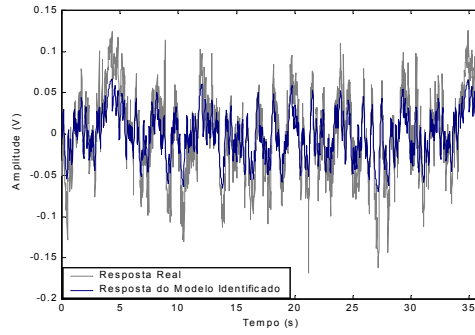


Figura 5. Comparação da resposta temporal do sistema real e do modelo estimado ARX de 2ª ordem.

Nota-se que o modelo ARX de segunda ordem identificado reproduz satisfatoriamente os dados observados ao longo do tempo, sendo considerado adequado para os propósitos deste trabalho.

#### 4. ESTRATÉGIAS DE CONTROLE PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO

Depois de selecionado o modelo que representa a dinâmica da malha de regulação de tensão do sistema micro-gerador, pode-se então projetar os controladores PID digital e fuzzy, uma vez que se dispõe de informações a respeito da função de transferência do sistema, como seus pólos e zero.

##### 4.1. Projeto do Controlador PID Utilizando o Lugar Geométrico das Raízes (LGR)

Considere o sistema de controle digital mostrado na Fig. (6), onde a função de transferência  $H(z)$  da planta é o modelo ARX de 2ª ordem já identificado, e a função de transferência  $H_C(z)$  é a função de transferência do controlador PID no domínio discreto, que é dada pela seguinte equação:

$$H_C(z) = H_{PID}(z) = K_p + K_i \cdot \frac{T_s}{(1 - z^{-1})} + K_d \cdot \frac{(1 - z^{-1})}{T_s} \quad (10)$$

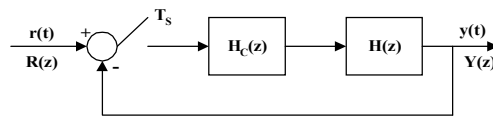


Figura 6. Sistema de controle digital.

A idéia básica consiste em projetar o controlador PID, usando as regras de LGR, de forma que ao se introduzir o pólo e o zero do controlador o novo LGR do sistema passe pelos pólos de malha fechada especificados, os quais foram selecionados com um fator de amortecimento  $\xi = 0,7$  e frequência natural  $\omega_n = 13,5 \text{ rad/s}$ .

A função de transferência do controlador PID digital pode ser modificada, de maneira que seja colocada na forma de pólos e zeros, ou seja:

$$H_{PID}(z) = K \frac{(z - z_1) \cdot (z - z_2)}{z \cdot (z - 1)} \quad (11)$$

Para facilitar os cálculos, selecionou-se um dos zeros do controlador igual a  $-0,5194$ , ou seja,  $z_1 = -0,5194$ . Este zero foi selecionado de forma que houvesse um cancelamento com o pólo  $z = -0,5194$  da função de transferência da planta.

A localização dos pólos de malha fechada desejada pode ser determinada pelas expressões:

$$s = \xi\omega_n + j\omega_n\sqrt{1-\xi^2} \quad (12)$$

$$z = e^{sTs} \quad (13)$$

Logo, os pólos de malha fechada no plano  $z$  estão localizados em  $z = 0,8124 \pm j0,1586$ .

O ângulo do segundo zero ( $z_2$ ) do controlador ao pólo de malha fechada situado no plano superior é:

$$\alpha = 84,1523^\circ \quad (14)$$

Então o outro zero do controlador deve estar localizado em  $z = 0,8151$ , ou seja,  $z_2 = 0,8151$ .

A constante de ganho  $K$  é determinada da condição de módulo para o lugar geométrico das raízes, logo:

$$K = -4,2263 \quad (15)$$

Uma vez determinados  $K$ ,  $z_1$  e  $z_2$ , determinam-se  $K_p = -4,8278$ ,  $K_d = 0,0358$  e  $K_i = -59,3750$ .

#### 4.2. Controlador PID Fuzzy

O controlador PID fuzzy, ilustrado na Fig. (7), é obtido usando o erro e a derivada do erro como entradas para a base de regras. A configuração é de um controlador Proporcional Derivativo (PD) mais um controlador integral convencional.

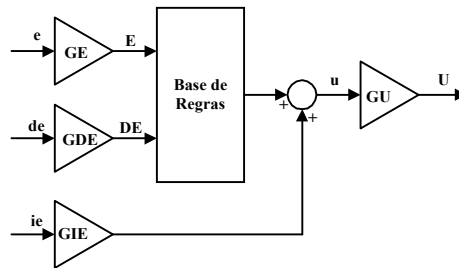


Figura 7. Controlador PID fuzzy.

A saída do controlador é representada por  $(u(k))$  e o ganho na saída é  $GU$ . O ganho das entradas erro  $(e(k))$  é  $GE$ , da variação do erro  $(de(k))$  é  $GDE$  e da integral do erro  $(ie(k))$  é  $GIE$ .

Neste controlador a integral do erro é calculada da seguinte forma:

$$ie(z) = \frac{T_s}{1-z^{-1}} \cdot e(z) \quad (16)$$

O controlador é, assim, uma função das três entradas:

$$U(z) = [f(GE \cdot e(z), GDE \cdot de(z)) + GIE \cdot ie(z)] \cdot GU \quad (17)$$

A aproximação linear para a Eq. (17) é a seguinte:

$$U(z) = \left[ (GU \cdot GE) + \left( GU \cdot GDE \cdot \frac{1-z^{-1}}{T_s} \right) + \left( GU \cdot GIE \frac{T_s}{1-z^{-1}} \right) \right] \cdot e(z) \quad (18)$$

Comparando-se a equação (18) com a equação (10), os ganhos estão relacionados da seguinte forma:

$$\begin{aligned} GU \cdot GE &= K_p \\ GU \cdot GDE &= K_d \\ GU \cdot GIE &= K_i \end{aligned} \quad (19)$$

Para as variáveis de entrada e saída do controlador fuzzy são utilizadas 7 funções de pertinência triangulares, distribuídas uniformemente no intervalo  $[-1,1]$ , conforme ilustrado na figura 8.

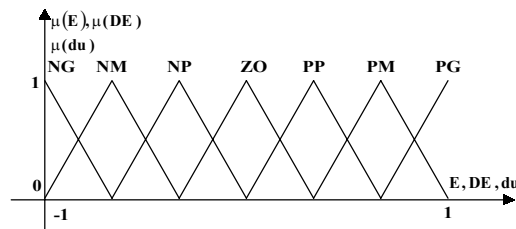


Figura 8. Funções de pertinência utilizadas para o controlador PI fuzzy.

Uma vez que o controlador PID digital está sintonizado, deve-se então transferir os seus parâmetros de forma a sintonizar o controlador PID fuzzy. Seleccionando-se o ganho  $GE = 0,25$ , obtém-se  $GU = -19,3112$ ,  $GDE = -0,0019$  e  $GIE = 3,0746$ .

A base de regras utilizadas para o controlador PID fuzzy, é composta de 49 regras, apresentadas, sob forma tabular, na Tab. (1).

Tabela 1. Base de regras para os controladores PI fuzzy.

E/DE	NG	NM	NP	ZO	PP	PM	PG
NG	NG	NG	NG	NG	NM	NP	ZO
NM	NG	NG	NG	NM	NP	ZO	PP
NP	NG	NG	NM	NP	ZO	PP	PM
ZO	NG	NM	NP	ZO	PP	PM	PG
PP	NM	NP	ZO	PP	PM	PG	PG
PM	NP	ZO	PP	PM	PG	PG	PG
PG	ZO	PP	PM	PG	PG	PG	PG

O método de defuzzificação utilizado é a média ponderada dos centros. E para o conectivo "e" é utilizada a função mínimo.

## 6. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os controladores projetados são implementados através de programas computacionais, desenvolvidos em *linguagem pascal orientada a objetos*, utilizando uma placa de aquisição A/D-D/A para a captura do sinal de saída e o envio do sinal de controle, Campos (2003).

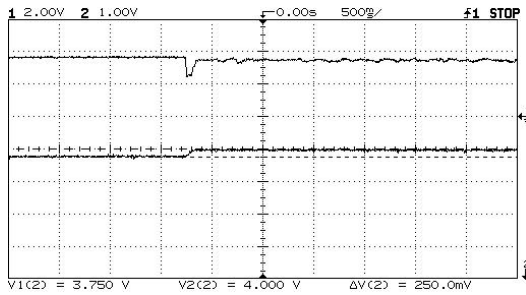


Dois testes são realizados para validar os controladores projetados: teste de rastreamento de referência e aplicação de cargas nos terminais do gerador síncrono.

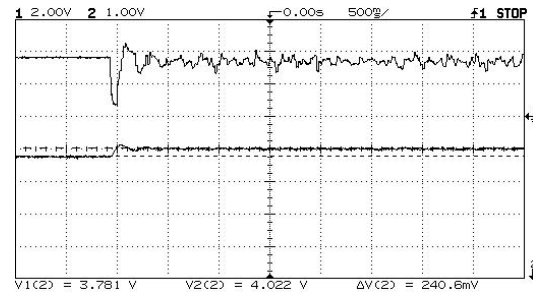
### 6.1. Teste de Rastreamento de Referência

Este teste consiste na aplicação de uma referência degrau de 4 V (220 V RMS) no regulador automático de tensão, o qual deve fazer com que a tensão terminal atinja o valor de referência desejado.

As Fig.(9) (a) e (b) mostram as respostas do sistema com o regulador de tensão PID digital e PID fuzzy, respectivamente.



(a)



(b)

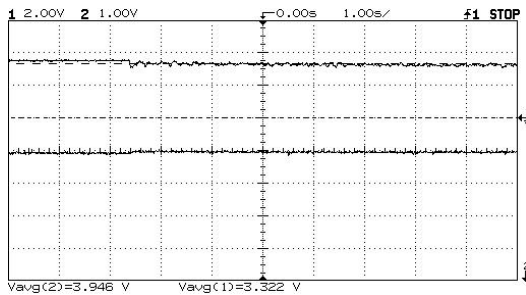
Figura 9. Respostas do sistema a uma referência degrau de 4 V para o regulador de tensão: (a) PID digital e (b) PID fuzzy.

Nota-se que os dois reguladores variam seus sinais para manter a nova tensão desejada. O regulador PID fuzzy, neste teste, apresentou resposta ligeiramente mais rápida e com menor sobressinal, porém necessitou de um maior esforço do sinal de controle.

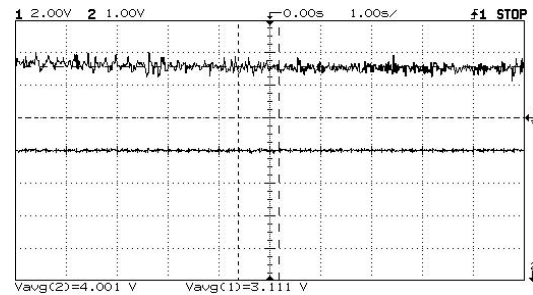
### 6.2. Aplicação de Carga aos Terminais do Gerador Síncrono

Este teste consiste na aplicação de uma carga trifásica de 2400 W, composta de lâmpadas incandescentes, aos terminais do gerador síncrono.

As Fig.(10) (a) e (b) ilustram, respectivamente, as respostas do sistema com o regulador de tensão PID digital e PID fuzzy, respectivamente.



(a)



(b)

Figura 10. Tensão terminal com o regulador de tensão: (a) PID digital e (b) PID fuzzy para carga de 2400 W.

Em ambas as figuras, nota-se que o sinal de controle varia levemente para lidar com a variação de carga aplicada e que a tensão terminal mantém-se, praticamente sem apresentar qualquer variação.

## 7. CONCLUSÃO

Em ambos os testes, variação na referência e na carga, o desempenho apresentado pelos dois controladores foi muito bom. O controlador PID fuzzy foi projetado para uma faixa de atuação tipicamente linear e sintonizado de acordo com o projeto anterior do PID digital convencional. Ele apresenta um grau de liberdade a mais e, por ter intrínseca capacidade não-linear, pode ser ajustado adicionalmente para situações em que isto seja necessário. Os resultados apresentados são ainda iniciais, enfatizando-se a estrutura laboratorial já desenvolvida que permitirá novos desenvolvimentos e investigações adicionais.

## 8. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio recebido da ANEEL/ELETRONORTE, através do projeto nº 4500013836, e ao PROCAD/CAPES nº 0132/01-2 mantido entre a UFPA e a UFSC.

## 9. REFERÊNCIAS

- Aguirre, L.A., 2000, “Introdução à Identificação de Sistemas: Técnicas Lineares e Não-Lineares Aplicadas a Sistemas Reais”, Editora UFMG, Belo Horizonte.
- Aström, K.J. and Hägglund, T., 1995, “PID Controllers”, 2<sup>nd</sup> Edition, Instruments Society of America.
- Campos, B. M., 2004, “Controles Digital e Fuzzy do Regulador de Tensão de um Sistema Micro- Gerador de Energia Elétrica”, Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Pará.
- Horowitz, P. and Hill, W., 1987, “The Art of Electronics”, Cambridge University Press.
- Jantzen, J., 1998, “Tuning of Fuzzy PID Controllers”, Technical University of Denmark, Lyngby.
- Oliveira, A.M.S. (2003). Identificação e Controle Digital de um Protótipo de Sistemas de Potência. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Pará.

## 10. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho

## PID DIGITAL AND FUZZY CONTROL STRATEGIES APPLIED TO AN ELECTRIC ENERGY MICRO-GENERATOR SYSTEM

**Bárbara Medeiros Campos, Carlos Tavares da Costa Jr., Walter Barra Jr., Katia Cilene Ferreira da Silva, José Augusto Lima Barreiros.**

UFPA – CT – DEEC – LACOS. Av. Augusto Corrêa, nº 01, CEP: 66.075-900. Belém, Pará, Brasil.  
belabmc@hotmail.com, cartav@ufpa.br, walbarra@ufpa.br, k\_tiacilene@yahoo.com.br, barreiro@ufpa.br

**Abstract.** *This paper investigates strategies for identification and digital control applied to the voltage regulation of a 10 KVA micro-generator system. A parametric identification technique is used for obtaining a model representative of the system. With an appropriate model, PID controllers are designed, based on both a pole placement strategy using Root Locus and on fuzzy logic with parameters derived from the previous design. The controllers are compared in their function as Automatic Voltage Regulators (AVR), maintaining the output voltage of the synchronous generator in its nominal value of operation, in spite of reference and load variations.*

**Keywords.** *Digital Control, Fuzzy Logic PID Controller, Parametric Identification, Synchronous generator, Automatic Voltage Regulator (AVR).*