

Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics

Projeto de Controlador Difuso para Turbo Gerador a Vapor

Flávio André Azevedo de Campos¹

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, UFPA, Belém, PA

Carlos Tavares da Costa Júnior²

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, UFPA, Belém, PA

José Augusto Lima Barreiros³

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, UFPA, Belém, PA

Resumo. Segundo a literatura técnica pertinente, a lógica *fuzzy* (nebulosa) surgiu como necessidade de controlar sistemas que, no mundo real, são complexos demais para se obter boa modelagem matemática. Além disso, ao adentrarmos cada vez mais na era da informação, o conhecimento humano torna-se muito importante. Neste sentido, precisa-se de uma lógica de controle que imite o conhecimento humano de uma maneira sistemática e seja de fácil aplicação em sistemas reais. Pretende-se, neste artigo, fazer um projeto de controlador difuso (ou *fuzzy*) para garantir constância na frequência de saída de um gerador (60Hz), acionado por uma turbina a vapor.

Palavras-chave. Controlador difuso (*fuzzy*), lógica nebulosa, controle de sistema de potência, controle inteligente, turbo gerador.

1 Introdução

Pretende-se, neste artigo, fazer um projeto de controlador difuso para garantir constante a frequência de saída de um gerador (60Hz), acionado por uma turbina a vapor.

Para melhor compreensão, imagine-se o seguinte cenário: tem-se uma indústria em que uma das fontes de energia provém de um turbo gerador. Este turbo gerador alimenta duas bombas industriais de alta potência. As cargas podem ligar e desligar de forma inesperada e aleatória. Este turbo gerador alimenta somente estas cargas e

¹ flavio.andre.campos@gmail.com, flavio.azevedo@hydro.com

² cartav@ufpa.br

³ barreiro@ufpa.br

este sistema está isolado. Além disso, considerar-se-á essas cargas puramente resistivas.

Admitir-se-á uma fonte que fornece ilimitadamente vapor para um reservatório. Esse reservatório alimenta uma turbina a vapor através de uma eletroválvula de abertura regulável continuamente entre totalmente fechada e totalmente aberta, controlando o fluxo. A regulação da válvula é conseguida através de um sinal de controle que provém de um regulador de velocidade. Além disso, o sistema de vapor não apresenta reaquecimento.

O controlador difuso atuará modificando, de maneira *online* o valor de referência da frequência do sistema ora instalado.

2 Modelagem do Sistema

Esta parte do trabalho destina-se a encontrar equações que relacionem a frequência nos terminais do gerador com outras grandezas. De forma a permitir obter-se as entradas, saídas e variáveis de estado que permitam a construção de um “diagrama de blocos”.

Segundo Silva and Costa [8], podemos dizer que uma turbina a vapor consiste basicamente de aletas montadas sobre um eixo, com aerodinâmica projetada para converter energia térmica e de pressão do vapor superaquecido em energia mecânica. Ainda segundo Silva and Costa [8], podemos utilizar o modelo da figura 1 para representar um sistema isolado com turbina a vapor sem reaquecimento.

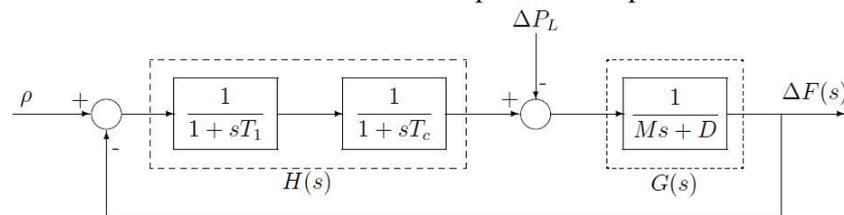


Figura 1: Diagrama de blocos proposto por Silva and Costa [8].

Onde:

- ρ é a referência para ΔF ;
- $H(s)$ é a função de transferência do regulador de velocidade e da turbina;
- $G(s)$ é a função de transferência do sistema de potência (gerador);
- ΔP_L é a variação de carga; e
- ΔF é a variação de frequência do sistema.

Assim, para estabelecimento do modelo do sistema, tomaremos como base as considerações encontradas em Silva and Costa [8], adaptando-as para o nosso sistema:

- Capacidade de geração nominal do turbo gerador: $P_r=27,5\text{MW}$;
- Carga nominal de cada bomba: $P_L=10\text{MW}$;
- Constante de inércia: $H=5\text{seg}$;
- Constante de tempo do regulador de velocidade $T_I=0,1$; e
- Constante de tempo da turbina $T_C=0,4$.

A característica de carga (D) pode ser calculada por:

$$D = \frac{P_L}{f} = \frac{10000}{60} = 166,67 MW/Hz \quad (1)$$

Usando a capacidade de geração nominal como base pu :

$$D_{pu} = \frac{D}{P_r} = \frac{166,67}{27500} = 6,06 * 10^{-3} pu MW/Hz \quad (2)$$

Para determinarmos M (seg), devemos fazer (Silva and Costa [8]):

$$M = \frac{2H}{f_B} \quad (3)$$

Onde f_B é um fator de correção de frequência, pois os turbo geradores apresentam 4 pólos. Logo:

$$f_B = \frac{2}{4} = \frac{1}{2} \quad (4)$$

Substituindo (4) em (3):

$$M = \frac{2.5}{\frac{1}{2}} = 20seg \quad (5)$$

A função de transferência do gerador pode, então ser escrita como:

$$\frac{\Delta F(s)}{\Delta P_m(s) - \Delta P_L(s)} = G(s) = \frac{1}{Ms+D} = \frac{1}{20s+6,06*10^{-3}} \quad (6)$$

A variação de carga deve ser expressa em pu , logo:

$$\Delta P_{Lpu} = \frac{10000}{27500} = 0,36364pu \quad (7)$$

Com todas as constantes do sistema determinadas, construiu-se o seguinte modelo para o Simulink (figura 2):

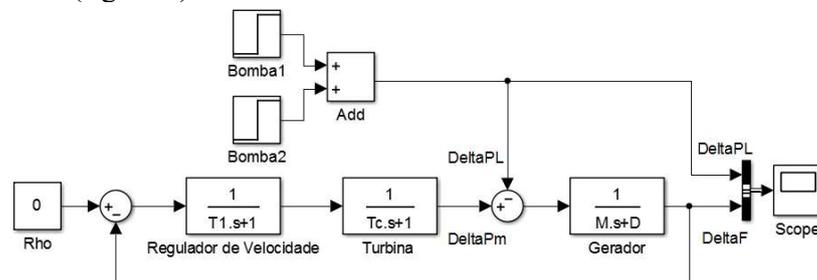
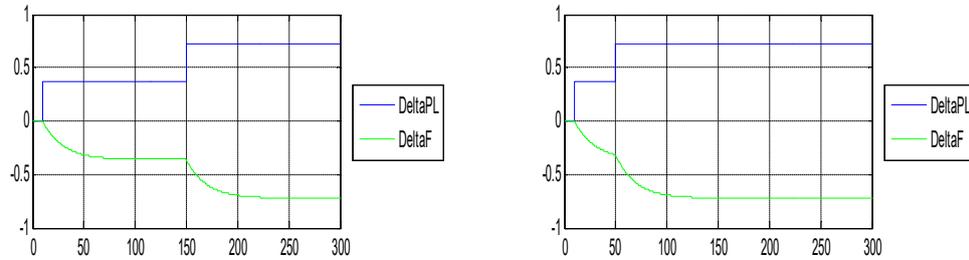


Figura 2: Modelo utilizado para as simulações em malha aberta.

Utilizando o modelo construído, podemos ver sua resposta à variação de carga quando sua referência permanece constante em duas situações:

- a) Quando a primeira bomba é acionada no instante 10 segundos e a segunda é acionada após o período transitório (150 segundos) (figura 3a), e
- b) Quando a primeira bomba é acionada no instante 10 segundos e a segunda é acionada durante o período transitório (50 segundos) (figura 3b).



Figuras 3a e 3b: Respostas ao acionamento das bombas com o sistema de malha aberta.

Analisando as figuras 3a e 3b, percebe-se que, após o regime transitório, a variação de frequência tende a ser inversamente proporcional à variação de carga. Além disso, como a regulação do sistema é unitária, tem-se a razão $\Delta F_{\infty} / \Delta P_{L\infty} = -1$ (Silva and Costa [8]).

3 Sistema Atual

Atualmente, o sistema possui um controlador *PI* que faz a leitura da variação de frequência (ΔF) e faz o ajuste na referência desta variação (ρ). O modelo pode ser visualizado na figura 4.

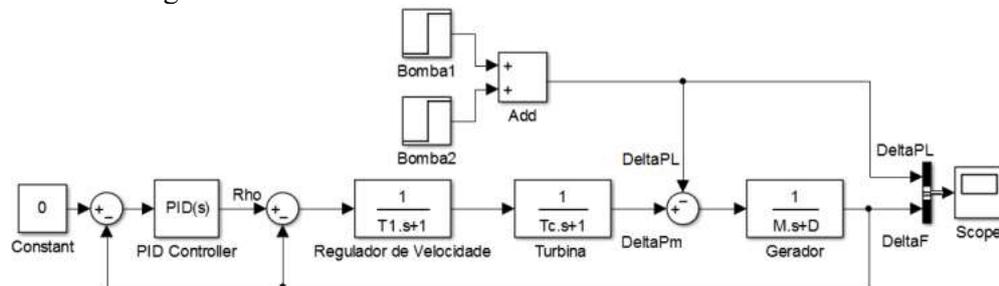


Figura 4: Sistema atual.

Tem-se um caso crítico para este controlador, pois se as duas cargas entrarem no mesmo instante (10 segundos), a variação de frequência terá uma queda momentânea de 10% da frequência nominal e, então, o sistema de proteção do turbo gerador atuará, retirando-o de operação (figura 5).

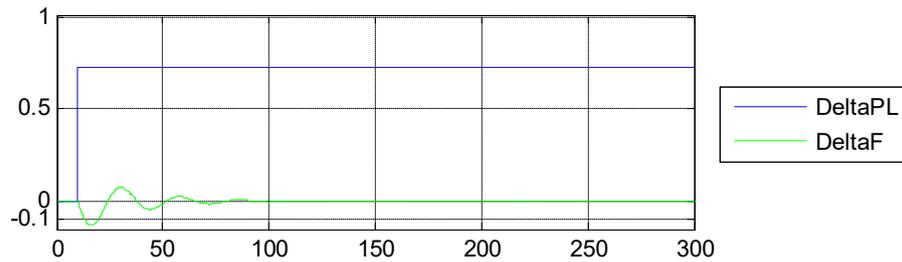


Figura 5: Resposta ao acionamento das bombas no mesmo instante (10 segundos).

4 Sistema Proposto

Propõe-se substituir o compensador *PI* atual por um compensador *PI fuzzy*. Para isto, devemos escolher as variáveis linguísticas, bem como as funções de pertinência e a base de regras para os conjuntos e o método de *defuzzificação*.

O objetivo do controlador *PI fuzzy* proposto é manter a variação de frequência do gerador constante e igual a 0, mesmo quando estiver operando próximo à plena carga.

As entradas do controlador serão o erro entre a referência de variação de frequência (ρ) e a variação de frequência medida nos terminais do turbo gerador (ΔF) e a derivada deste erro.

As variáveis linguísticas, tanto para a entrada, quanto para a saída, são definidas como mostra a tabela 1.

Tabela 1: Variáveis linguísticas de entrada e saída.

N	Z	P
Negativo	Zero	Positivo

Na construção do controlador difuso, analisou-se de que maneira as regras poderiam ser definidas, sendo que:

- Para erros negativos e derivadas do erro nulas **ou** negativas, deve-se ter um sinal de controle positivo;
- Para erros nulos e derivada do erro negativa, deve-se ter um sinal de controle positivo;
- Para erros nulos e derivada do erro positiva, deve-se ter um sinal de controle negativo;
- Para erros positivos e derivadas do erro nulas **ou** positivas, deve-se ter um sinal de controle negativo; e
- Para os demais casos, deve-se ter um sinal de controle nulo.

A base de regras pode ser vista na tabela 2.

Tabela 2: Base de regras.

ERRO	VARIACÃO DO ERRO		
	N	Z	P
N	P	P	Z
Z	P	Z	N
P	Z	N	N

A implicação das regras foi baseada no controlador Mamdani (Max-Min) (Shaw and Simões [7]) e o método de *defuzzificação* foi o centroide.

Segundo Jantzen [5], como os controladores PID que utilizam lógica *fuzzy* (nebulosa) possuem características de não-linearidade, estes devem ser ajustados (*tuned*) antes de serem utilizados para substituir controladores PID clássicos.

Ainda segundo Jantzen [5], o procedimento consiste em tomar um controlador PID já ajustado para a planta (pode-se utilizar diversas técnicas como vistas em Åström and Hägglund [1]), substituí-lo por um controlador difuso (*fuzzy*) linear, transformá-lo em um controlador difuso (*fuzzy*) não-linear e, finalmente, fazer o ajuste “fino” neste último.

Após este procedimento, construiu-se o sistema mostrado na figura 6 para simular sua resposta à variação de carga.

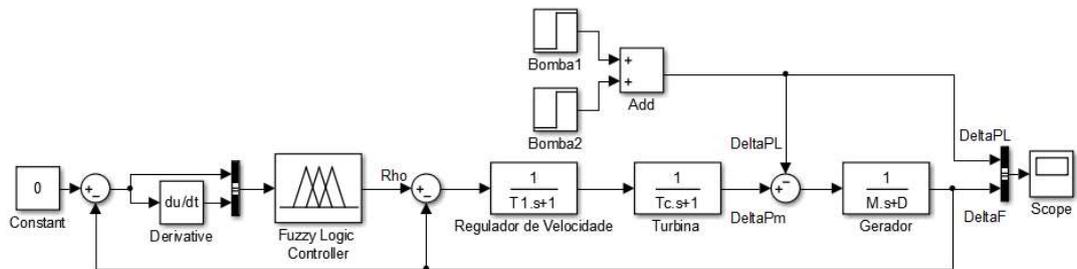


Figura 6: Sistema proposto.

Como última simulação, plotar-se-á as respostas dos dois controladores, o atual e o proposto, no caso crítico das duas cargas entrarem no mesmo instante (10 segundos), para fins de comparação (figura 7).

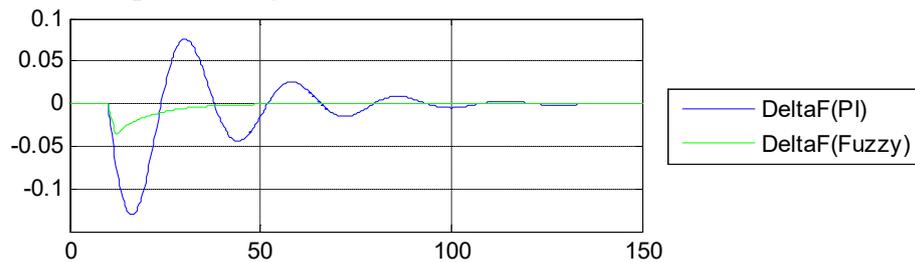


Figura 7: Resposta dos dois controladores, atual e proposto, ao acionamento das bombas no instante 10 segundos.

5 Conclusão

Neste trabalho, abordou-se a substituição de um controlador PI por um controlador PI difuso (*fuzzy*). Através das simulações, conseguiu-se ver claramente que o controlador difuso proposto apresenta uma resposta otimizada (menos oscilatória) para todos os casos simulados.

Não se pode, no entanto, desprezar a carga computacional solicitada pelo controlador difuso, além da necessidade de utilização de hardware específico para tal, como Controladores Lógicos Programáveis (CLP). Diferentemente acontece com os controladores PID, que podem ser aplicados com componentes analógicos básicos.

Referências Bibliográficas:

- [1] K. Åström and T. Hägglund, PID Controllers: Theory, Design and Tuning, ISA: The Instrumentation, Systems and Automation Society, (1995).
- [2] C. Costa Jr., J. Barreiros, L. Pierrat and J. Kueny, Estabilizadores de Sistemas de Potência com Ganhos Supervisionados por Lógica Nebulosa, IV Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, (1999).
- [3] C. Costa Jr., J. Barreiros, D. Brunpicard and W. Barra Jr., Tuning of an Adaptive Power System Stabilizer by a Fuzzy Logic Based Supervisor from a Local Model Network, IFAC Workshop on Digital Control – Past, Present and Future of PID Control, (2000).
- [4] C. Costa, R. Machado, J. Barreiros, U. Bezerra, A. Ferreira, C. Costa Jr., W. Barra Jr., B. Rodrigues, N. Bramatti and P. Duarte, Controlador PID Supervisório Fuzzy Aplicado ao Controle Carga-Frequência de um Sistema Real, 5th Latin-American Congress: Electricity Generation and Transmission, (2003).
- [5] J. Jantzen, Tuning of Fuzzy PID Controllers, Technical University of Denmark, Department of Automation, (1999).
- [6] W. Mielczarski (editor), Studies in Fuzziness and Soft Computing, Physica-Verlag, (2002).
- [7] I. Shaw and M. Simões, Controle e Modelagem Fuzzy, FAPESP, (2007).
- [8] A. Silva and A. S. Costa. Aspectos Dinâmicos do Controle de Sistemas de Potência, Notas de Aulas de Pós-Graduação, UFSC, (2000).
- [9] M. Trindade, B. Figueiredo, C. Reis Jr. and L. Oliveira, Desenvolvimento de um Controlador Inteligente Híbrido, IESAM, (2009).