



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará

Campus Belém

Diretoria de Ensino

Departamento de Ensino de Processos Industriais

Curso de Engenharia de Controle e Automação

Professor: André Maurício Damasceno Ferreira

Disciplina: Lógica e Controle Fuzzy

Reprodução do Artigo:

ZHAO, Z. Y.; TOMIZUKA, M. & ISAKA, S.

**Fuzzy Gain Scheduling of PID Controllers *in* IEEE Transactions on
Systems, Man and Cybernetics, v.23, n.5, pp. 1392-1398,
September/October, 1993.**

Luís Augusto Mesquita de Castro

Mauro Gomes da Silva

Belém – PA

2014

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará
Campus Belém

Professor: André Maurício Damasceno Ferreira
Graduação em Engenharia de Controle e Automação
Disciplina: Lógica e Controle Fuzzy

Turma: C310-9MH

Luís Augusto Mesquita de Castro

Matrícula: 2010310005

Mauro Gomes da Silva

Matrícula: 2010310021

Reprodução do Artigo:

ZHAO, Z. Y.; TOMIZUKA, M. & ISAKA, S.

**Fuzzy Gain Scheduling of PID Controllers *in* IEEE Transactions on
Systems, Man and Cybernetics, v.23, n.5 September/October, 1993.**

Trabalho desenvolvido para a disciplina
Lógica e Controle Fuzzy, do curso de
Engenharia de Controle e Automação,
sob orientação do professor André
Maurício Damasceno Ferreira como
parte integrante da nota correspondente
à 1ª Avaliação.

Belém – PA

2014

1. Resumo

Este trabalho reproduz com o auxílio da ferramenta computacional MATLAB a resposta ao degrau unitário de três sistemas dinâmicos distintos, quando esses são controlados via PID a parâmetros fixos (Kitamori, 1979; Ziegler & Nichols, 1942) e PID a parâmetros variáveis, onde os parâmetros do controlador são modificados conforme um sistema *fuzzy* (Zadeh, 1965; Wang, 1996) que utiliza o sinal de erro e sua primeira derivada como variáveis de entrada para se obter como saída os parâmetros do controlador PID a cada instante de tempo.

Comparações são feitas entre o comportamento dos três sistemas controlados tanto por controlador PID convencional quanto por PID adaptativo, onde se comprova que um PID adaptativo com o universo de discurso das variáveis de entrada e saída do sistema *fuzzy* bem ajustado possui desempenho superior quando comparado a um PID convencional (Zhao *et al.*, 1993).

Além do PID *fuzzy* com ganho programado, este trabalho apresenta mais duas opções de PIDs adaptativos utilizando sistemas *fuzzy* para comparação de desempenho com PID convencional, a primeira opção é um PD *fuzzy* com controle integral com ganho *fuzzy* e a segunda opção é um PD *fuzzy* em conjunto com um PI *fuzzy*. Simulações realizadas comparam o desempenho de um PID convencional proposto para os três sistemas existentes com o desempenho obtido por meio das duas abordagens usando sistemas *fuzzy*, avaliando-se tempo de acomodação, sobressinal e esforço de controle para cada configuração de controlador mais processo.

2. Introdução

O controlador mais usado em processos industriais é o controlador PID (Proporcional Integral Derivativo), pois possui uma estrutura simples e um desempenho robusto para uma ampla faixa de sistemas dinâmicos presentes na indústria. O projeto desse controlador exige somente a especificação de três parâmetros: o ganho proporcional K_p , a constante de tempo integral T_i e a constante de tempo derivativo T_d . Todavia, a otimização da seleção de tais parâmetros ainda é objeto de estudo e desenvolvimento de métodos para redução de tempo gasto para essa tarefa (Kuo, 1987; Takahashi *et al.*, 1970).

O artigo reproduzido neste trabalho propõe o uso de um sistema *fuzzy* para encontrar os parâmetros ótimos do controlador PID a cada instante de tempo k , onde o sistema *fuzzy* possui como entrada o sinal de erro $e(k)$ e a sua primeira diferença $\Delta e(k)$, essas informações são tratadas pelo sistema, tendo três variáveis como saída: K'_p , K'_d e α . Essas variáveis de saída são convertidas em K_p , K_i e K_d a cada instante de tempo k , levando a obtenção de um PID a parâmetros variáveis.

Resumidamente, o sistema *fuzzy* utiliza descrições linguísticas de especialistas humanos no controle de um processo e as representa como regras ou relações *fuzzy*. Esta base de conhecimento é usada por um mecanismo de inferência, em conjunto com algum conhecimento dos estados do processo (variáveis medidas do processo), a fim de determinar as ações de controle (Zhao *et al.*, 1993). No artigo, um melhor desempenho é alcançado com o uso do sistema *fuzzy* para determinar os parâmetros do controlador PID em comparação com um PID a parâmetros fixos.

3. Controlador PID convencional

A função de transferência de um controlador PID é mostrada na Equação 1:

$$G_c(s) = K_p + K_i/s + K_d s \quad (1)$$

Onde, K_p , K_i e K_d são os ganhos proporcional, integral e derivativo, respectivamente. Outra forma equivalente e útil do controlador PID é dada pela Equação 2 (Dorf, 2001; Ogata, 1998):

$$G_c(s) = K_p(1 + 1/(T_i s) + T_d s) \quad (2)$$

Onde, T_i e T_d são as constantes de tempo integral e derivativo, respectivamente, sendo $T_i = K_p/K_i$ e $T_d = K_d/K_p$. A expressão equivalente em tempo discreto para o controlador PID utilizado neste trabalho é dada por:

$$u(k) = K_p e(k) + K_i T_s \sum_{i=1}^n e(i) + \frac{K_d}{T_s} \Delta e(k)$$

Onde, $u(k)$ é o sinal de controle, $e(k)$ é o erro entre o sinal de referência e a saída do processo, T_s é o período de amostragem para o controlador, e $\Delta e(k) \triangleq e(k) - e(k-1)$. Encontrar parâmetros ótimos de um controlador PID para um dado processo não é trivial. Tanto um PID analógico quanto um PID digital necessitam que seus parâmetros sejam sintonizados para que o sistema apresente o comportamento desejado, satisfazendo as especificações de projeto.

O controlador PID convencional não apresenta um desempenho satisfatório no controle de sistemas com parâmetros variantes no tempo ou que possuam não linearidades. O artigo reproduzido nesse trabalho apresenta uma possível solução para resolver esse problema: a utilização de um controlador PID *fuzzy* com ganho programado, ou seja, os parâmetros do controlador PID são variáveis, sendo ajustados pelo sistema *fuzzy*.

4. Controlador PID *Fuzzy* com Ganho Programado

Na Figura 1 é mostrado o diagrama de blocos de um sistema de controle PID *fuzzy* com ganho programado. O método utilizado neste trabalho consiste em explorar a lógica *fuzzy* e o raciocínio aproximado para determinar os parâmetros do controlador.

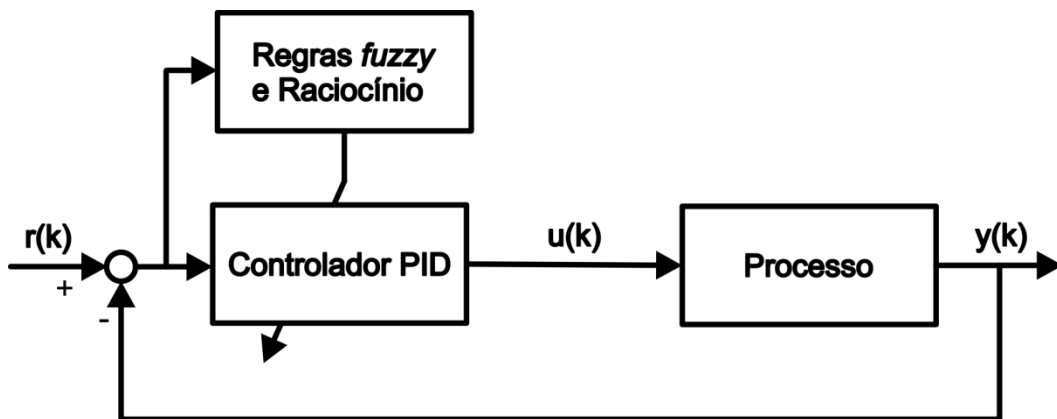


Figura 1. Diagrama de blocos do controlador PID *fuzzy* com ganho programado.

Supõe-se que K_p , K_d estão em intervalos descritos por $[K_{p,min}, K_{p,max}]$ e $[K_{d,min}, K_{d,max}]$, respectivamente. Por conveniência, K_p e K_d são normalizados no intervalo entre $[0,1]$ por meio da seguinte transformação linear:

$$\begin{aligned} K'_p &= (K_p - K_{p,min}) / (K_{p,max} - K_{p,min}) \\ K'_d &= (K_d - K_{d,min}) / (K_{d,max} - K_{d,min}) \end{aligned} \quad (3)$$

No esquema proposto, os parâmetros do controlador PID são determinados com base no erro atual $e(k)$ e a sua primeira diferença $\Delta e(k)$. A constante de tempo de integral relaciona-se com a constante de tempo derivativo por meio da expressão:

$$T_i = \alpha T_d \quad (4)$$

Dessa forma, o ganho integral é obtido por:

$$K_i = K_p / (\alpha T_d) = K_p^2 / (\alpha K_d) \quad (5)$$

Os parâmetros K'_p , K'_d e α , são determinados por um conjunto de regras *fuzzy* do tipo:

$$\begin{aligned} \text{Se } e(k) \text{ é } A_i \text{ e } \Delta e(k) \text{ é } B_i, \text{ então } K'_p \text{ é } C_i, K'_d \text{ é } D_i, \text{ e } \alpha = \alpha_i \\ i = 1, 2, \dots, m. \end{aligned} \quad (6)$$

Onde A_i , B_i , C_i e D_i , são conjuntos *fuzzy* e α_i é uma constante. As funções de pertinência desses conjuntos *fuzzy* $e(k)$ e $\Delta e(k)$ são mostradas na Figura 2.

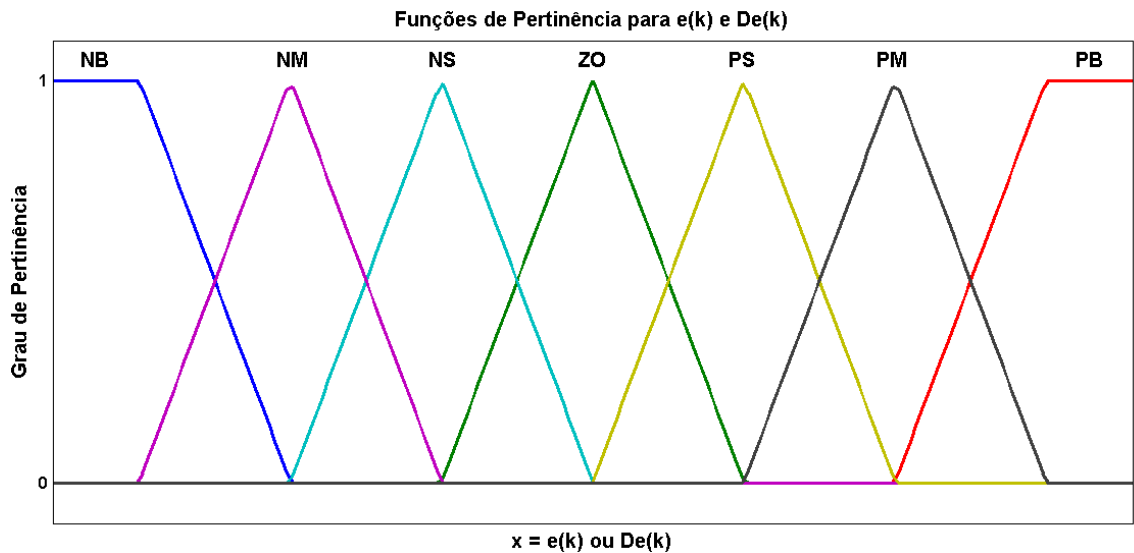


Figura 2. Funções de pertinência para $e(k)$ e $\Delta e(k)$.

Onde NS é Negativo Pequeno; NM é Negativo Médio; NB é Negativo Grande; ZO é Aproximadamente Zero; PS é Positivo Pequeno; PM é Positivo Médio e PB é Positivo Grande.

Os conjuntos *fuzzy* C_i e D_i são Grande e Pequeno, respectivamente. Esses dois conjuntos diferem dos conjuntos usados no artigo reproduzido e são caracterizados por funções de pertinência para K'_p e K'_d como mostrado na Figura 3.

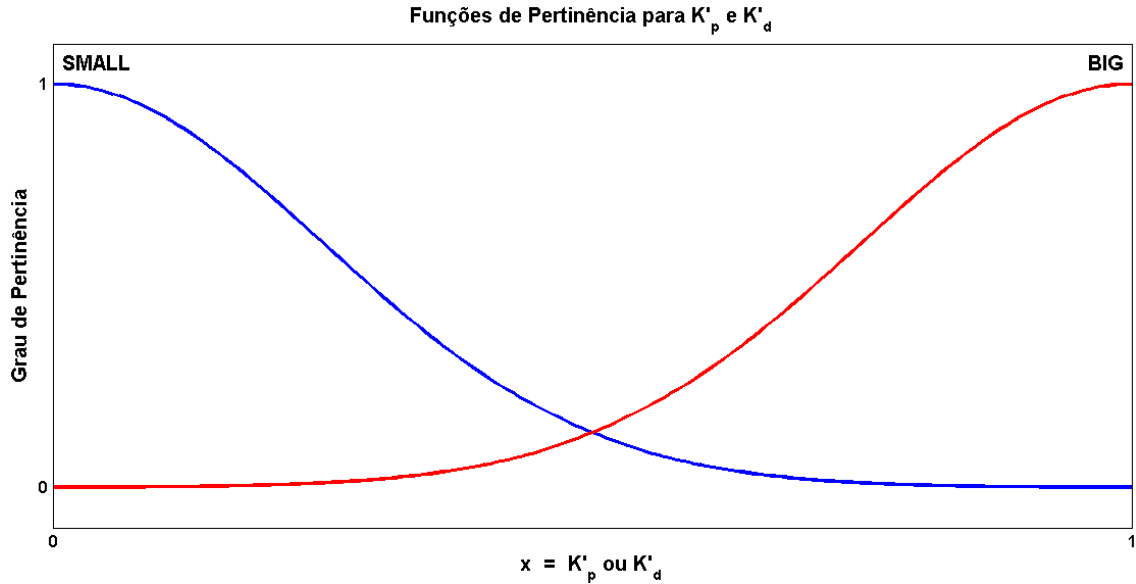


Figura 3. Funções de pertinência para K'_p e K'_d .

Na Figura 4 são mostradas as funções de pertinência *Singleton* que a variável linguística α pode assumir:

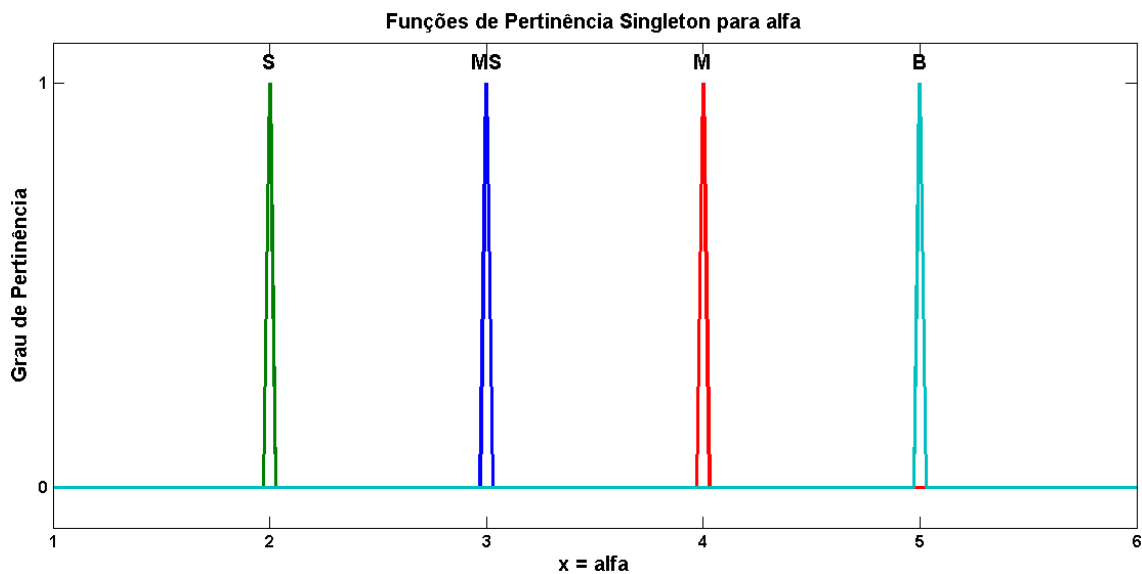


Figura 4. Funções de pertinência *Singleton* para α .

Onde, S é Pequeno; MS é Médio Pequeno; M é Médio e B é Grande. Por exemplo, se α for dito pequeno, então α assumirá o valor igual a 2.

As regras *fuzzy* na Equação 6 podem ser obtidas da experiência do operador. Neste caso, as regras são obtidas do comportamento desejado para a saída do processo a uma entrada degrau. Na Figura 5, é mostrado um exemplo de comportamento desejado para um processo. No início, ou seja, em torno do ponto *a* deseja-se um sinal de controle grande, para gerar um tempo de subida rápido.

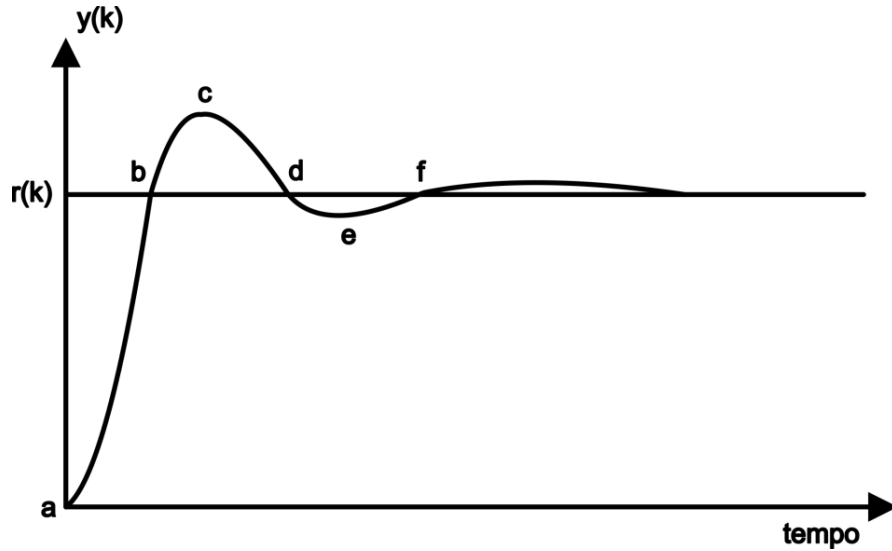


Figura 5. Resposta ao degrau de um processo

Para produzir um sinal de controle grande, o controlador PID deve ter um grande ganho proporcional, um grande ganho integral, e um pequeno ganho derivativo. Assim, o ganho proporcional K'_p pode ser representado por um conjunto *fuzzy* grande, e o ganho derivativo K'_d por um conjunto *fuzzy* pequeno. A ação integral é determinada em relação à ação derivativa, como mostrado na Equação 4. Sendo assim, α deve ser pequeno para que controlador PID possua uma forte ação integral. Portanto, a regra *fuzzy* ao redor do ponto *a* é:

Se $e(k)$ é PB e $\Delta e(k)$ é ZO, então K'_p é Grande, K'_d é Pequeno e $\alpha = 2$

No ponto *b* da Figura 5, deseja-se um sinal de controle pequeno para evitar um grande sobressinal. Para o ponto ao redor de *b* o controlador PID deve ter um pequeno ganho proporcional, um grande ganho derivativo, e um pequeno ganho integral. Assim, será considerada a seguinte regra *fuzzy* para o ponto *b*:

Se $e(k)$ é ZO e $\Delta e(k)$ é NB, então K'_p é Pequeno, K'_d é Grande e $\alpha = 5$

Assim, um conjunto de regras *fuzzy* baseado na experiência humana pode ser usado para ajustar o ganho proporcional K'_p , o ganho derivativo K'_d e a constante α . As regras de ajuste para as variáveis K'_p , K'_d e α são dadas nas Tabelas 1, 2 e 3, respectivamente. A letra B simboliza um conjunto *fuzzy* Grande, assim como a letra S simboliza um conjunto *fuzzy* Pequeno.

Tabela 1. Regras *fuzzy* para o ajuste de K'_p .

$\Delta e(k)$								
$e(k)$		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
	NB	B	B	B	B	B	B	B
	NM	S	B	B	B	B	B	S
	NS	S	S	B	B	B	S	S
	ZO	S	S	S	B	S	S	S
	OS	S	S	B	B	B	S	S
	PM	S	B	B	B	B	B	S
	PB	B	B	B	B	B	B	B

Tabela 2. Regras *fuzzy* para o ajuste de K'_d .

$\Delta e(k)$								
$e(k)$		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
	NB	S	S	S	S	S	S	S
	NM	B	B	S	S	S	B	B
	NS	B	B	B	S	B	B	B
	ZO	B	B	B	B	B	B	B
	PS	B	B	B	S	B	B	B
	PM	B	B	S	S	S	B	B
	PB	S	S	S	S	S	S	S

Como as funções de pertinência para $e(k)$ e $\Delta e(k)$ são funções triangulares igualmente espaçadas (Figura 2), é válida a seguinte relação:

$$\sum_{i=1}^m \mu_i = 1 \quad (7)$$

O processo de defuzzificação pode ser feito usando:

$$K'_p = \sum_{i=1}^m \mu_i K'_{p,i} \quad (8a); \quad K'_d = \sum_{i=1}^m \mu_i K'_{d,i} \quad (8b); \quad \alpha = \sum_{i=1}^m \mu_i \alpha_i \quad (8c)$$

Tabela 3. Regras *fuzzy* para o ajuste da constante α .

		$\Delta e(k)$						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
$e(k)$	NB	2	2	2	2	2	2	2
	NM	3	3	2	2	2	3	3
	NS	4	3	3	2	3	3	4
	ZO	5	4	3	3	3	4	5
	PS	4	3	3	2	3	3	4
	PM	3	3	2	2	2	3	3
	PB	2	2	2	2	2	2	2

Na Figura 6, a implicação *fuzzy* é feita usando o produto algébrico entre as pertinências da parte antecedente da regra *fuzzy*, como mostrado na Equação 9:

$$\mu_i = \mu_{A_i}[e(k)] \cdot \mu_{B_i}[\Delta e(k)] \quad (9)$$

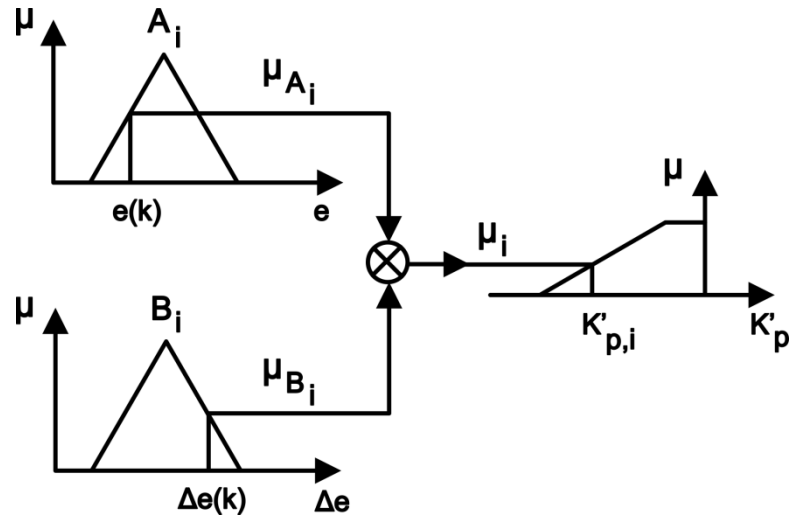


Figura 6. Processo de implicação para uma regra *fuzzy*.

Onde, μ_{A_i} , é o valor da pertinência do conjunto *fuzzy* A_i , dado um valor de $e(k)$, e μ_{B_i} , o valor da pertinência do conjunto *fuzzy* B_i dado um valor de $\Delta e(k)$, sendo $K'_{p,i}$ o valor de K'_p correspondendo a μ_i . O valor de $K'_{d,i}$ é obtido da mesma forma. A partir dos valores obtidos do sistema *fuzzy*, utiliza-se as seguintes relações para determinar os parâmetros do controlador PID:

$$K_p = (K_{p,max} - K_{p,min})K'_p + K_{p,min} \quad (10a)$$

$$K_d = (K_{d,max} - K_{d,min})K'_d + K_{d,min} \quad (10b)$$

$$K_i = K_p^2 / (\alpha K_d) \quad (10c)$$

No artigo reproduzido, a escolha dos limites do universo de discurso de K'_p e K'_d é calculada por meio das seguintes equações:

$$\begin{aligned} K_{p,min} &= 0,32K_u; & K_{p,max} &= 0,6K_u \\ K_{d,min} &= 0,08K_uT_u; & K_{d,max} &= 0,15K_uT_u \end{aligned} \quad (11)$$

Onde K_u e T_u são os valores do ganho crítico e do período crítico, respectivamente. Essas variáveis são determinadas levando cada sistema simulado neste trabalho ao seu respectivo limiar de estabilidade, ou seja, a saída medida da planta é uma oscilação sustentada. Nas seções seguintes todas as simulações se realizaram com período de amostragem $T_s = 0,01\text{ s}$ e sinal de controle limitado em um intervalo $u = [-10,10]$.

5. Simulações PID Convencional e PID Fuzzy com Ganho Programado

Nesta seção serão apresentadas as simulações da resposta a uma entrada do tipo degrau unitário para os sistemas $G_1(s)$, $G_2(s)$ e $G_3(s)$, quando esses sistemas são controlados via PID convencional e PID *fuzzy* com ganho programado.

- Simulação para o sistema $G_1(s)$: A função de transferência do sistema é dada por:

$$G_1(s) = \frac{e^{-0,5s}}{(s+1)^2} \quad (12a)$$

Na Figura 7 é mostrado o diagrama de blocos construído em ambiente MATLAB/SIMULINK para a planta $G_1(s)$ mais controlador PID convencional sintonizado pelo método de Ziegler-Nichols ou Kitamori.

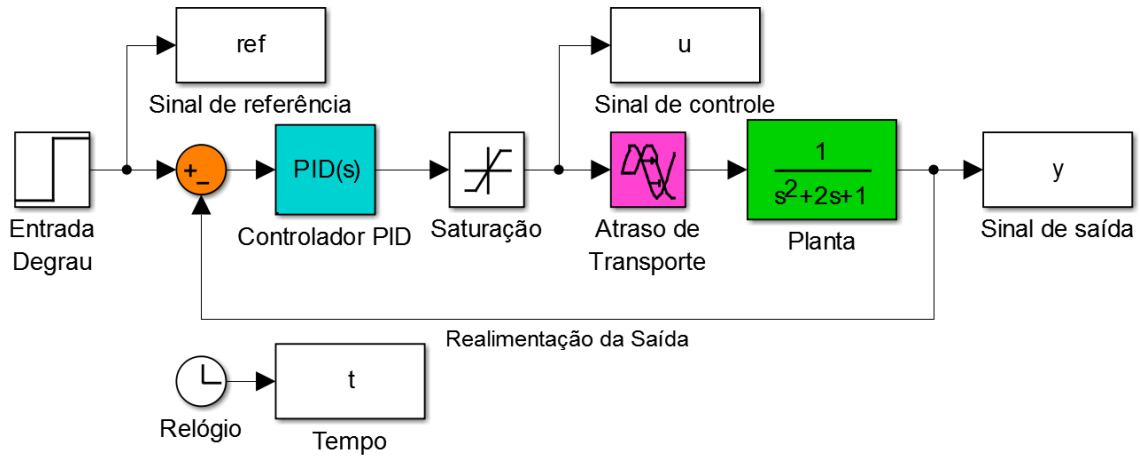


Figura 7. Diagrama de blocos em ambiente MATLAB/SIMULINK para $G_1(s)$.

O diagrama de blocos construído em ambiente MATLAB/SIMULINK para a planta $G_1(s)$ mais controlador PID *fuzzy* com ganho programado é mostrado na Figura 8.

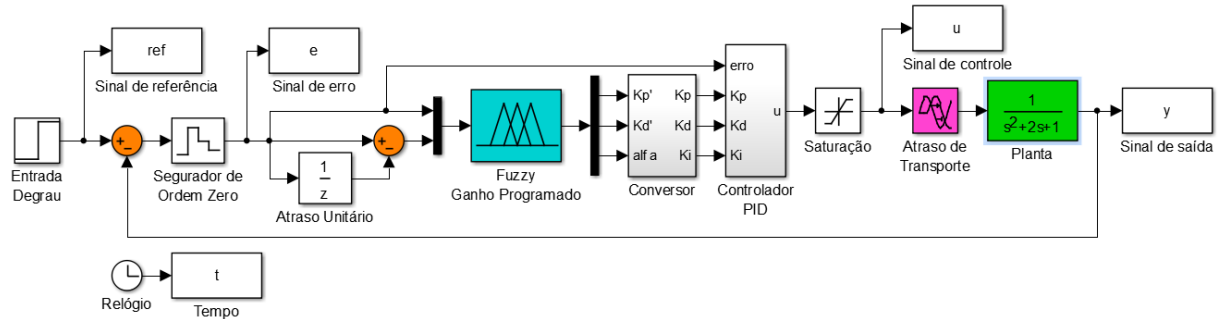


Figura 8. Diagrama de blocos em ambiente MATLAB/SIMULINK para $G_1(s)$.

Os parâmetros utilizados para sintonia do controlador PID convencional tanto pelo método de Ziegler-Nichols quanto pelo método de Kitamori são dados na Tabela 4 (Zhao *et al.*, 1993).

Tabela 4. Parâmetros para sintonia do controlador PID.

Processo	Controlador PID Ziegler-Nichols	Controlador PID Kitamori
$G_1(s)$	$K_p = 2,808$	$K_p = 2,212$
	$T_i = 1,640$	$T_i = 2,039$
	$T_d = 0,410$	$T_d = 0,519$

Os limites do universo de discurso declarados na *Fuzzy Logic Toolbox* do MATLAB para as variáveis de entrada e saída do controlador PID *fuzzy* com ganho programado para comparação com o controlador ajustado por métodos clássicos são mostrados na Tabela 5.

Tabela 5. Parâmetros para sintonia do controlador PID adaptativo.

Processo	Limites do Universo de Entrada	Limites do Universo de Saída
$G_1(s)$	$e(k) = [-0,5; 0,5]$	$K'_p = [0,1]$
	$\Delta e(k) = [-0,005; 0,005]$	$K'_d = [0,1]$
	-	$\alpha = [1,6]$

Na Figura 9 é mostrada a resposta a uma entrada do tipo degrau unitário para o sistema de segunda ordem $G_1(s)$ quando este é controlado por controlador PID convencional sintonizado por dois métodos clássicos de ajuste dos parâmetros e quando o mesmo é controlado por controlador PID *fuzzy* com ganho programado.

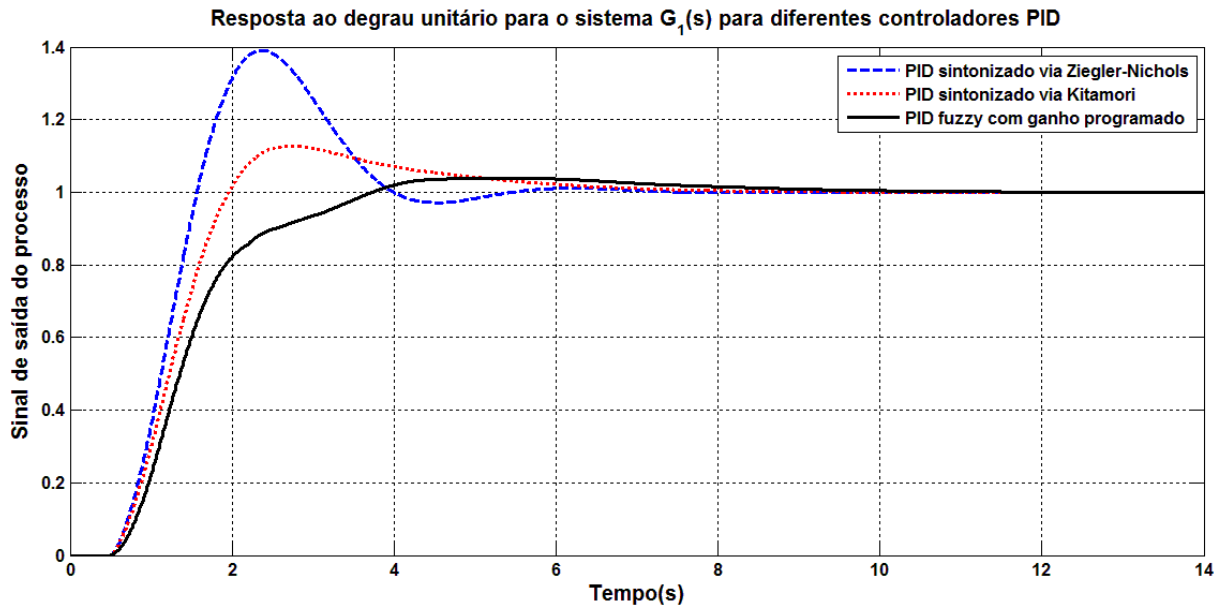


Figura 9. Resposta ao degrau de $G_1(s)$ para diferentes controladores.

A evolução temporal dos parâmetros do controlador PID *fuzzy* com ganho programado é mostrada na Figura 10.

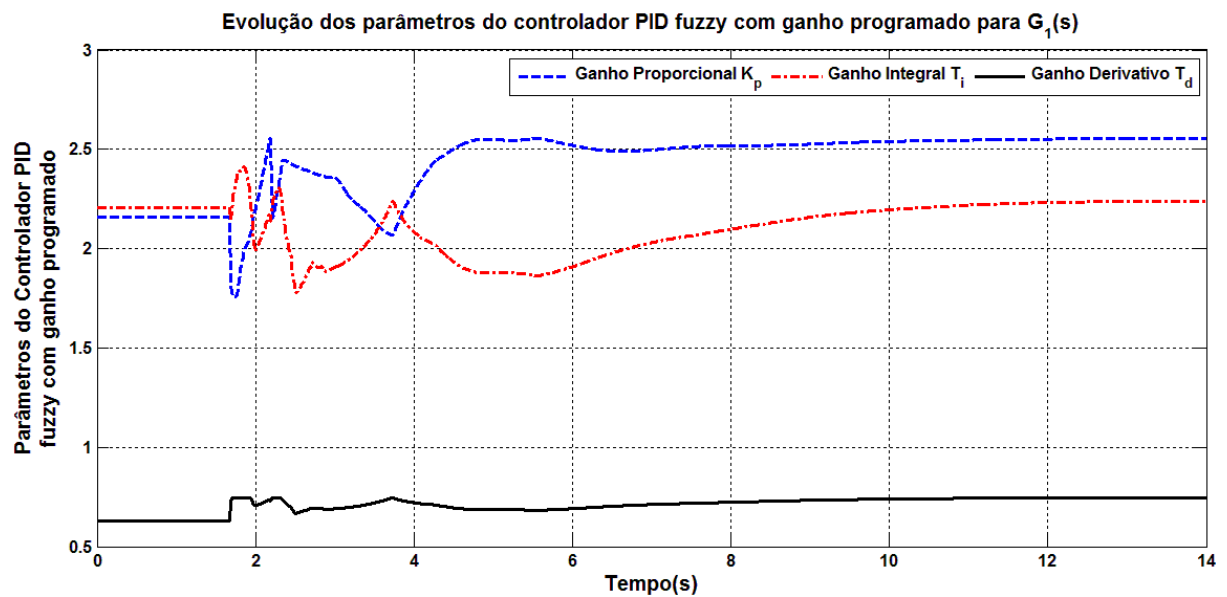


Figura 10. Evolução dos parâmetros do controlador PID *fuzzy* com ganho programado para $G_1(s)$.

- Simulação para o sistema $G_2(s)$: A função de transferência do sistema é dada por:

$$G_2(s) = \frac{4,228}{(s + 0,5)(s^2 + 1,64s + 8,456)} \quad (12b)$$

Na Figura 11 é mostrado o diagrama de blocos construído em ambiente MATLAB/SIMULINK para a planta $G_2(s)$ mais controlador PID convencional sintonizado pelo método de Ziegler-Nichols ou Kitamori.

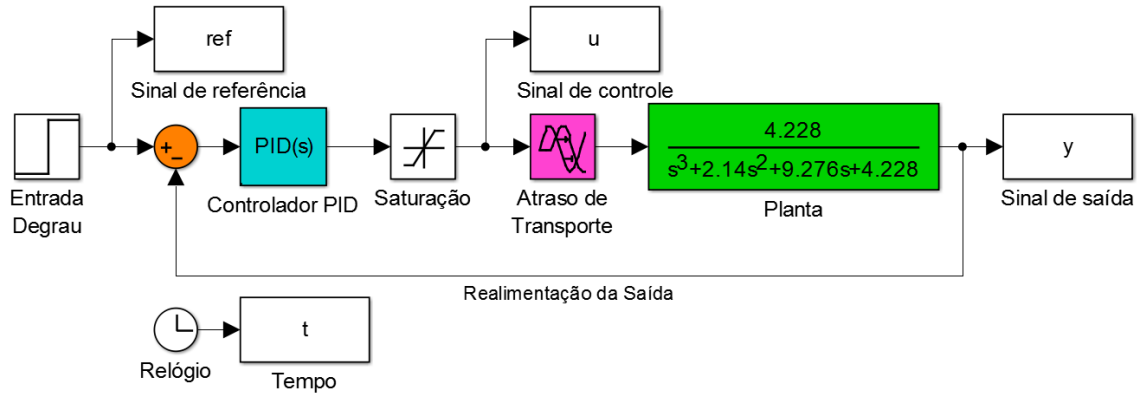


Figura 11. Diagrama de blocos em ambiente MATLAB/SIMULINK para $G_2(s)$.

O diagrama de blocos construído em ambiente MATLAB/SIMULINK para a planta $G_2(s)$ mais controlador PID *fuzzy* com ganho programado é mostrado na Figura 12.

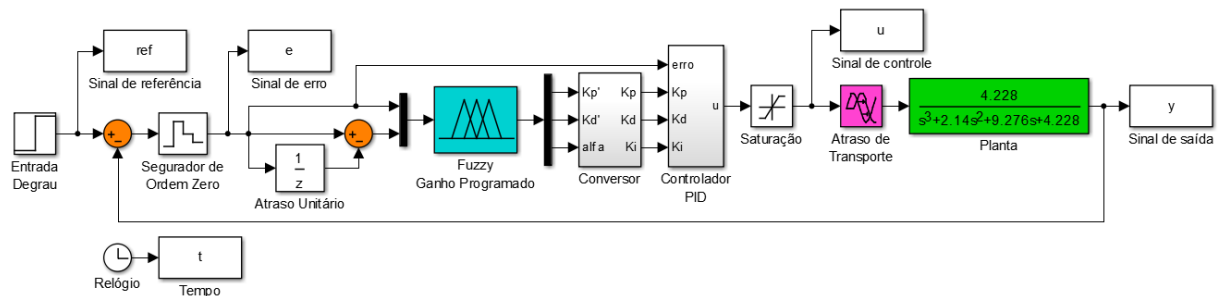


Figura 12. Diagrama de blocos em ambiente MATLAB/SIMULINK para $G_2(s)$.

Os parâmetros utilizados para sintonia do controlador PID convencional pelo método de Ziegler-Nichols são dados na Tabela 6 (Zhao *et al.*, 1993). A sintonia pelo método de Kitamori não é realizada no artigo reproduzido para a planta $G_2(s)$.

Tabela 6. Parâmetros para sintonia do controlador PID.

Processo	Controlador PID Ziegler-Nichols	Controlador PID Kitamori
$G_2(s)$	$K_p = 2,190$	-
	$T_i = 1,030$	-
	$T_d = 0,258$	-

Os limites do universo de discurso declarados na *Fuzzy Logic Toolbox* do MATLAB para as variáveis de entrada e saída do controlador PID *fuzzy* com ganho

programado para comparação com o controlador ajustado pelo método clássico é mostrado na Tabela 7.

Tabela 7. Parâmetros para sintonia do controlador PID adaptativo.

Processo	Limites do Universo de Entrada	Limites do Universo de Saída
$G_2(s)$	$e(k) = [-0,1; 0,1]$	$K'_p = [0,1]$
	$\Delta e(k) = [-0,01; 0,01]$	$K'_d = [0,1]$
	-	$\alpha = [1,6]$

Na Figura 13 é mostrada a resposta a uma entrada do tipo degrau unitário para o sistema de terceira ordem $G_2(s)$ quando este é controlado por controlador PID convencional sintonizado pelo método de Ziegler-Nichols para ajuste dos parâmetros e quando o mesmo é controlado por controlador PID *fuzzy* com ganho programado.

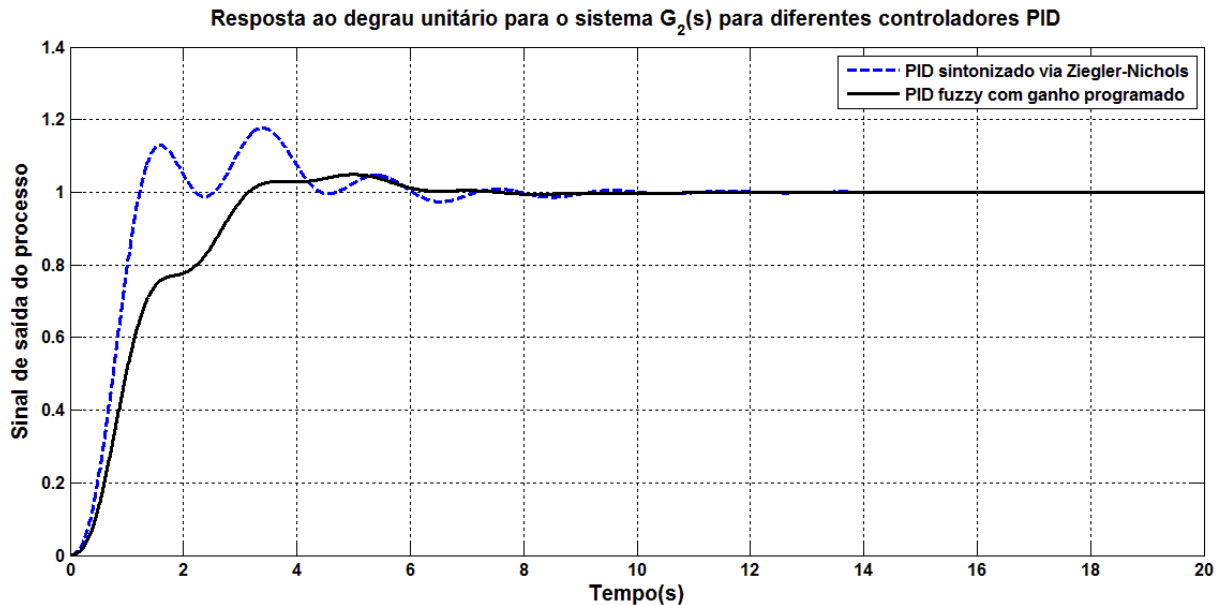


Figura 13. Resposta ao degrau de $G_2(s)$ para diferentes controladores.

- Simulação para o sistema $G_3(s)$: A função de transferência do sistema é dada por:

$$G_1(s) = \frac{27}{(s+1)(s+3)^3} \quad (12c)$$

Na Figura 14 é mostrado o diagrama de blocos construído em ambiente MATLAB/SIMULINK para a planta $G_3(s)$ mais controlador PID convencional sintonizado pelo método de Ziegler-Nichols ou Kitamori.

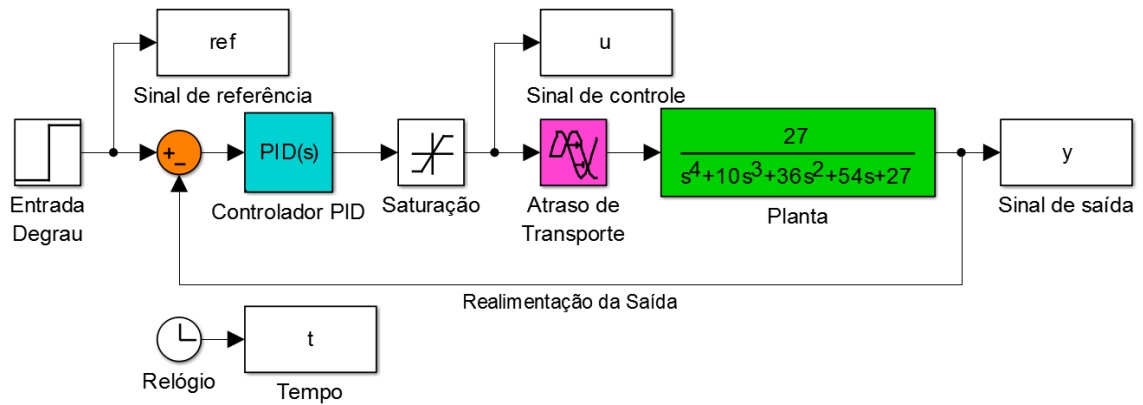


Figura 14. Diagrama de blocos em ambiente MATLAB/SIMULINK para $G_3(s)$.

O diagrama de blocos construído em ambiente MATLAB/SIMULINK para a planta $G_3(s)$ mais controlador PID fuzzy com ganho programado é mostrado na Figura 15.

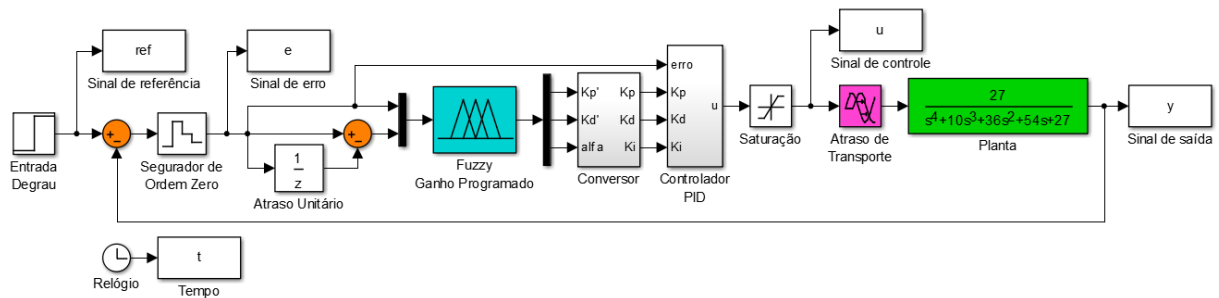


Figura 15. Diagrama de blocos em ambiente MATLAB/SIMULINK para $G_3(s)$.

Os parâmetros utilizados para sintonia do controlador PID convencional tanto pelo método de Ziegler-Nichols quanto pelo método de Kitamori são dados na Tabela 8 (Zhao *et al.*, 1993).

Tabela 8. Parâmetros para sintonia do controlador PID.

Processo	Controlador PID Ziegler-Nichols	Controlador PID Kitamori
$G_3(s)$	$K_p = 3,072$	$K_p = 2,357$
	$T_i = 1,352$	$T_i = 1,649$
	$T_d = 0,338$	$T_d = 0,414$

Os limites do universo de discurso declarados na *Fuzzy Logic Toolbox* do MATLAB para as variáveis de entrada e saída do controlador PID fuzzy com ganho programado para comparação com o controlador ajustado por métodos clássicos são mostrados na Tabela 9.

Tabela 9. Parâmetros para sintonia do controlador PID adaptativo.

Processo	Limites do Universo de Entrada	Limites do Universo de Saída
$G_3(s)$	$e(k) = [-0,5; 0,5]$	$K'_p = [0,1]$
	$\Delta e(k) = [-0,005; 0,005]$	$K'_d = [0,1]$
	-	$\alpha = [1,6]$

Na Figura 16 é mostrada a resposta a uma entrada do tipo degrau unitário para o sistema de quarta ordem $G_3(s)$ quando este é controlado por controlador PID convencional sintonizado por dois métodos clássicos de ajuste dos parâmetros e quando o mesmo é controlado por controlador PID *fuzzy* com ganho programado.

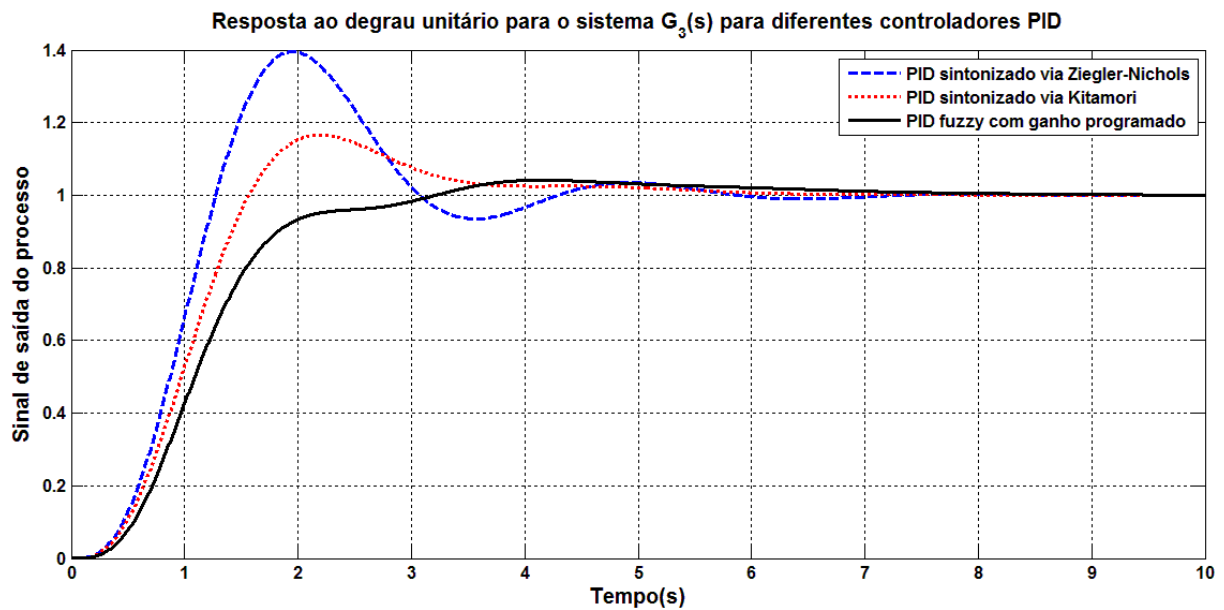


Figura 16. Resposta ao degrau de $G_3(s)$ para diferentes controladores.

6. Simulações PID Convencional e PD Fuzzy com Controle Integral com Ganho Fuzzy

Nesta seção os três sistemas citados anteriormente (Equações 12a, 12b e 12c) são controlados via controlador PD *fuzzy* com controle integral com ganho *fuzzy*. Para efeito de comparação, o desempenho dos sistemas controlados por essa configuração é mostrado juntamente com o desempenho dos sistemas quando controlados por controlador PID clássico, sintonizado conforme Tabelas 4, 6 e 8.

Esta configuração possui para o controlador PD *fuzzy* a base de regras mostrada na Tabela 10, onde o sistema *fuzzy* utiliza $e(k)$ e $\Delta e(k)$ como variáveis de entrada e a variável $u_{PD}(k)$ como saída. AZ significa *Almost Zero*.

Tabela 10. Base de regras para o controlador PD *fuzzy*.

		$\Delta e(k)$						
$e(k)$		NB	NM	NS	AZ	PS	PM	PB
	NB	NB	NB	NB	NM	NM	NS	AZ
	NM	NB	NB	NB	NM	NS	AZ	PS
	NS	NB	NM	NM	NS	AZ	PS	PM
	AZ	NB	NS	NS	AZ	PS	PM	PB
	PS	NM	NS	AZ	PS	PM	PB	PB
	PM	NS	AZ	PS	PM	PB	PB	PB
	PB	AZ	PS	PM	PM	PB	PB	PB

Na Tabela 11 é mostrada a base de regras para o ganho *fuzzy* utilizada nesta configuração.

Tabela 11. Base de regras para o ganho *fuzzy*.

$e(k)$	NB	NM	NS	AZ	OS	PM	PB
K_{fuzzy}	PS	PM	PM	PB	PM	PM	PS

O sinal de controle é gerado por:

$$u(k) = u_{PD}(k) + K_{fuzzy} \sum e(k)$$

- Simulação para o sistema $G_1(s)$:

O diagrama de blocos construído em ambiente MATLAB/SIMULINK para a planta $G_1(s)$ mais controlador PD *fuzzy* com controle integral com ganho *fuzzy* é mostrado na Figura 17.

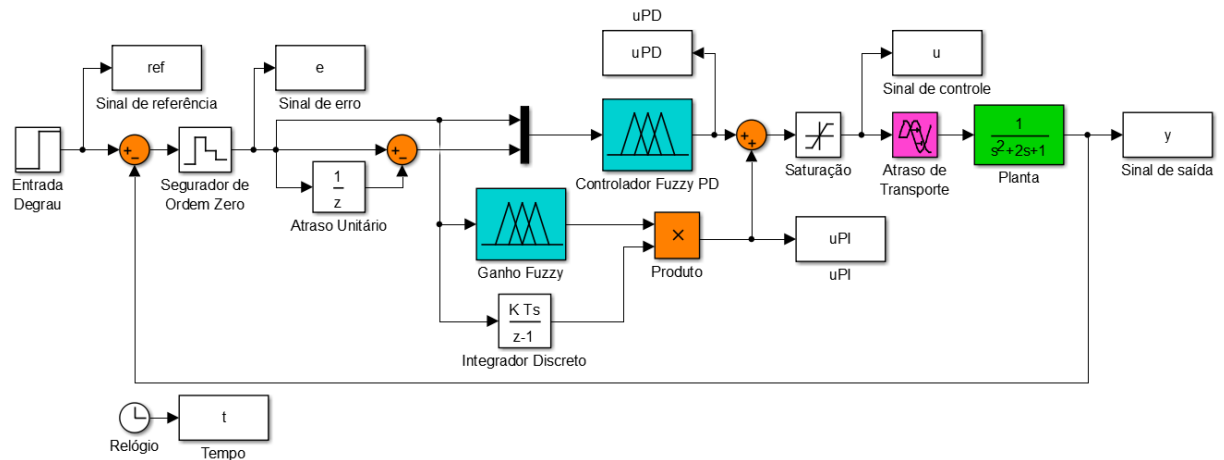


Figura 17. Diagrama de blocos em ambiente MATLAB/SIMULINK para $G_1(s)$.

Os limites do universo de discurso declarados na *Fuzzy Logic Toolbox* do MATLAB para as variáveis de entrada e saída do controlador PD *fuzzy* com controle integral com ganho *fuzzy* para comparação com o controlador ajustado por métodos clássicos são mostrados nas Tabelas 12 e 13.

Tabela 12. Parâmetros para sintonia do controlador PD *fuzzy*.

Processo	Limites do Universo de Entrada	Limites do Universo de Saída
$G_1(s)$	$e(k) = [-1,1]$	$u_{PD} = [-4,4]$
	$\Delta e(k) = [-0,025; 0,025]$	

Tabela 13. Parâmetros para sintonia do ganho *fuzzy*.

Processo	Limites do Universo de Entrada	Limites do Universo de Saída
$G_1(s)$	$e(k) = [-0,5; 0,5]$	$K_{fuzzy} = [0,1]$

Na Figura 18 é mostrada a resposta a uma entrada do tipo degrau unitário para o sistema de segunda ordem $G_1(s)$ quando este é controlado por controlador PID convencional sintonizado de acordo com a Tabela 4 e quando o mesmo é controlado por controlador PD *fuzzy* com controle integral com ganho *fuzzy*.

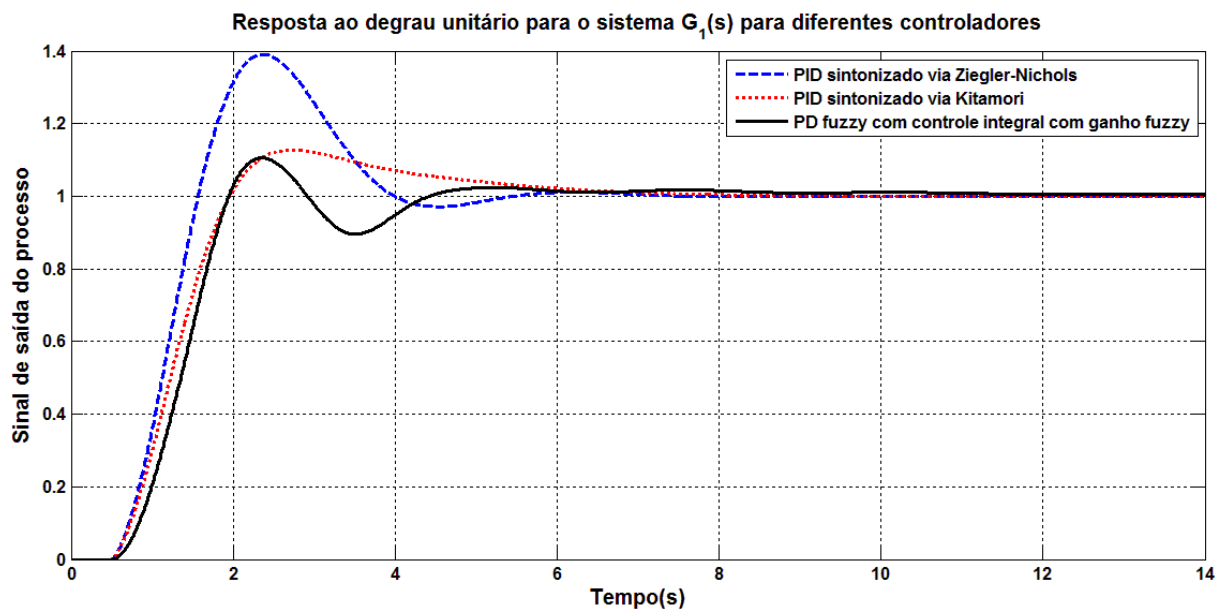


Figura 18. Resposta ao degrau de $G_1(s)$ para diferentes controladores.

- Simulação para o sistema $G_2(s)$:

O diagrama de blocos construído em ambiente MATLAB/SIMULINK para a planta $G_2(s)$ mais controlador PD *fuzzy* com controle integral com ganho *fuzzy* é mostrado na Figura 19.

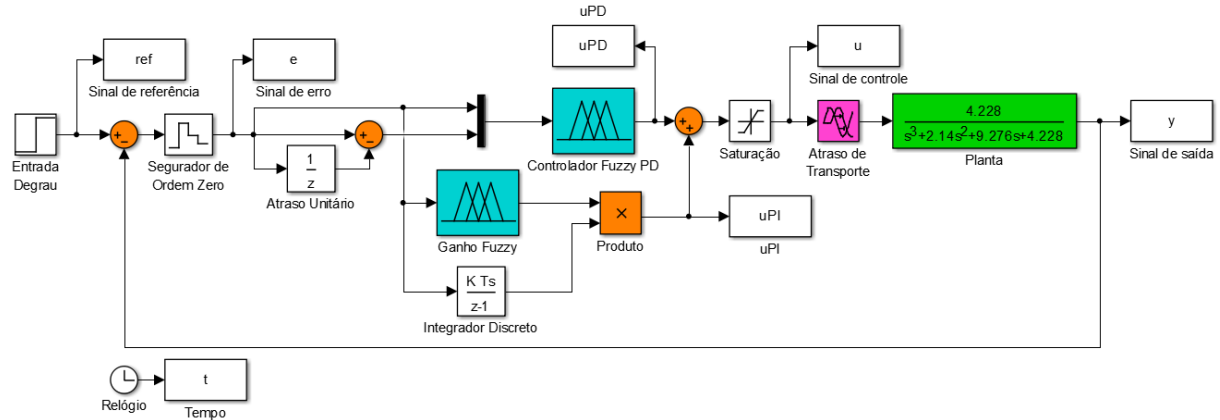


Figura 19. Diagrama de blocos em ambiente MATLAB/SIMULINK para $G_2(s)$.

Os limites do universo de discurso declarados na *Fuzzy Logic Toolbox* do MATLAB para as variáveis de entrada e saída do controlador PD *fuzzy* com controle integral com ganho *fuzzy* para comparação com o controlador ajustado por métodos clássicos são mostrados nas Tabelas 14 e 15.

Tabela 14. Parâmetros para sintonia do controlador PD *fuzzy*.

Processo	Limites do Universo de Entrada	Limites do Universo de Saída
$G_2(s)$	$e(k) = [-1,1]$	$u_{PD} = [-3,3]$
	$\Delta e(k) = [-0,02; 0,02]$	

Tabela 15. Parâmetros para sintonia do ganho *fuzzy*.

Processo	Limites do Universo de Entrada	Limites do Universo de Saída
$G_2(s)$	$e(k) = [-1,1]$	$K_{fuzzy} = [0,1]$

Na Figura 20 é mostrada a resposta a uma entrada do tipo degrau unitário para o sistema de terceira ordem $G_2(s)$ quando este é controlado por controlador PID convencional sintonizado de acordo com a Tabela 6 e quando o mesmo é controlado por controlador PD *fuzzy* com controle integral com ganho *fuzzy*.

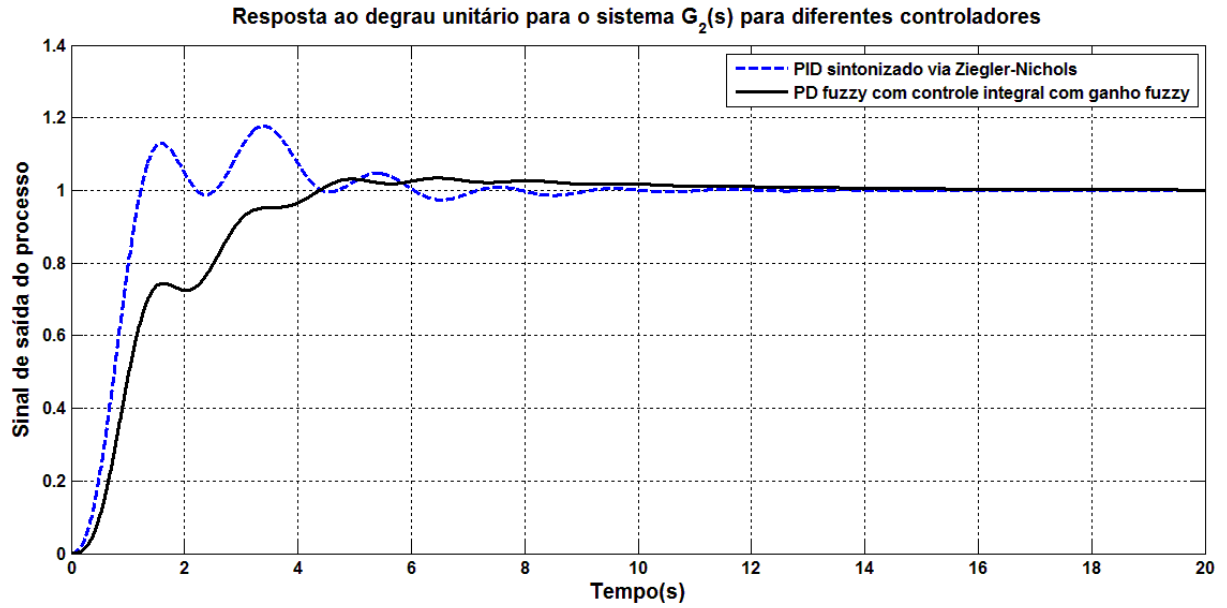


Figura 20. Resposta ao degrau de $G_2(s)$ para diferentes controladores.

- Simulação para o sistema $G_3(s)$:

O diagrama de blocos construído em ambiente MATLAB/SIMULINK para a planta $G_3(s)$ mais controlador PD *fuzzy* com controle integral com ganho *fuzzy* é mostrado na Figura 21.

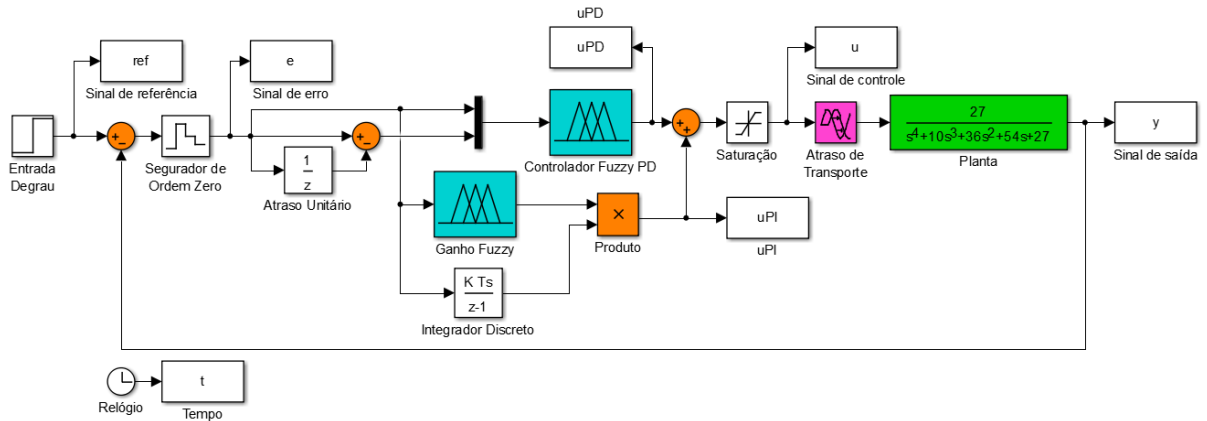


Figura 21. Diagrama de blocos em ambiente MATLAB/SIMULINK para $G_3(s)$.

Os limites do universo de discurso declarados na *Fuzzy Logic Toolbox* do MATLAB para as variáveis de entrada e saída do controlador PD *fuzzy* com controle integral com ganho *fuzzy* para comparação com o controlador ajustado por métodos clássicos são mostrados nas Tabelas 16 e 17.

Tabela 16. Parâmetros para sintonia do controlador PD *fuzzy*.

Processo	Limites do Universo de Entrada	Limites do Universo de Saída
$G_3(s)$	$e(k) = [-1,1]$	$u_{PD} = [-4,4]$
	$\Delta e(k) = [-0,025; 0,025]$	

Tabela 17. Parâmetros para sintonia do ganho *fuzzy*.

Processo	Limites do Universo de Entrada	Limites do Universo de Saída
$G_3(s)$	$e(k) = [-0,5; 0,5]$	$K_{fuzzy} = [0,1]$

Na Figura 22 é mostrada a resposta a uma entrada do tipo degrau unitário para o sistema de terceira ordem $G_3(s)$ quando este é controlado por controlador PID convencional sintonizado de acordo com a Tabela 8 e quando o mesmo é controlado por controlador PD *fuzzy* com controle integral com ganho *fuzzy*.

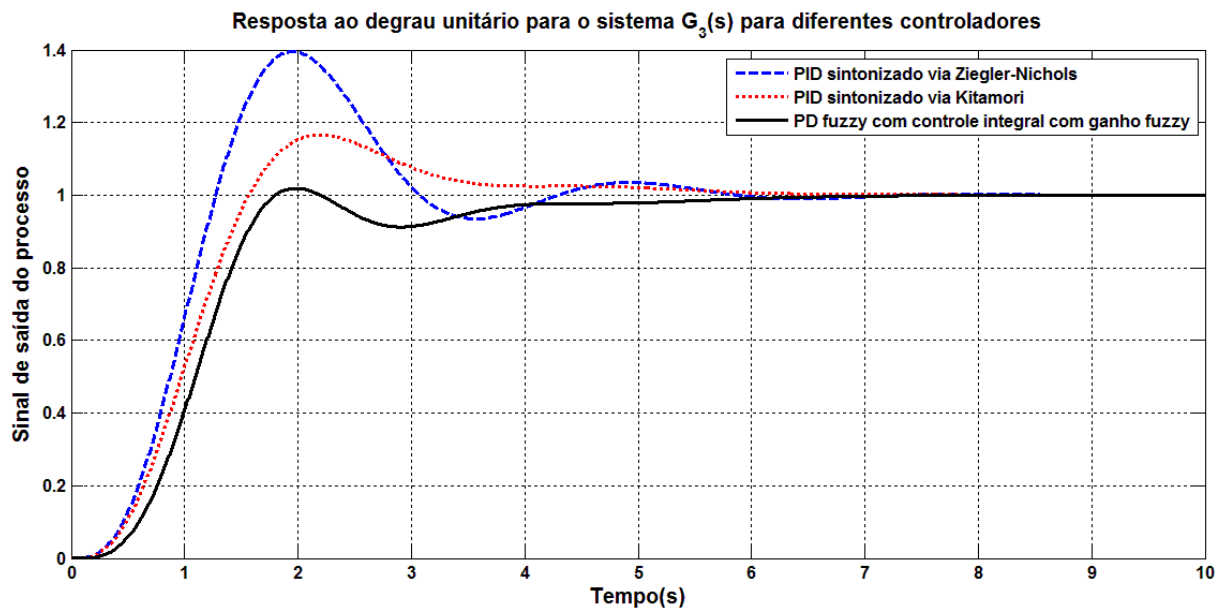


Figura 22. Resposta ao degrau de $G_3(s)$ para diferentes controladores.

7. Simulações PID Convencional e PD Fuzzy em conjunto com PI Fuzzy

Nesta seção os três sistemas usados no artigo reproduzido (Equações 12a, 12b e 12c) são controlados via controlador PD *fuzzy* em conjunto com PI *fuzzy*. O desempenho a uma entrada do tipo degrau unitário das plantas controladas por essa configuração é mostrado juntamente com o desempenho dos sistemas quando controlados por controlador PID clássico, sintonizado conforme os métodos de sintonia presentes nas Tabelas 4, 6 e 8.

Nesta configuração o controlador PI também é fuzzy, no entanto difere do controlador PD *fuzzy*, pois sua base de regras é unidimensional, usando somente a informação do erro atual $e(k)$. As funções de pertinência para controlador PI *fuzzy* podem possuir a mesma estrutura apresentada para o controlador PD *fuzzy*, ou seja, funções triangulares igualmente espaçadas. Na Tabela 18 é mostrada a base de regras para o controlador PI *fuzzy*. A base de regras para o controlador PD *fuzzy* é a mesma empregada na seção anterior (Tabela 10). Os limites das funções de pertinência utilizadas para o controlador PI *fuzzy* devem ser menores que os limites utilizados para o controlador PD *fuzzy*.

Tabela 28. Base de regras para o controlador PI *fuzzy*.

$e(k)$	NB	NM	NS	AZ	OS	PM	PB
u_{PI}	NB	NM	NS	AZ	OS	PM	PB

Dessa forma, o sinal de controle é gerado por:

$$u(k) = u_{PD}(k) + u_{PI}(k)$$

Nas Tabelas 18 e 19 são mostrados os limites do universo de discurso declarados na *Fuzzy Logic Toolbox* do MATLAB para as variáveis de entrada e saída do controlador PD *fuzzy* em conjunto com PI *fuzzy*. Todas as simulações apresentadas nesta seção do trabalho utilizam o mesmo universo de discurso.

Tabela 18. Parâmetros para sintonia do controlador PD *fuzzy*.

Processos	Limites do Universo de Entrada	Limites do Universo de Saída
$G_1(s)$, $G_2(s)$ e $G_3(s)$	$e(k) = [-1,1]$	$u_{PD} = [-3,3]$
	$\Delta e(k) = [-0,02; 0,02]$	

Tabela 19. Parâmetros para o controlador PI *fuzzy*.

Processos	Limites do Universo de Entrada	Limites do Universo de Saída
$G_1(s)$, $G_2(s)$ e $G_3(s)$	$e(k) = [-1,1]$	$u_{PI} = [-0,008; 0,008]$

- Simulação para o sistema $G_1(s)$:

O diagrama de blocos construído em ambiente MATLAB/SIMULINK para a planta $G_1(s)$ mais controlador PD *fuzzy* em conjunto com PI *fuzzy* é mostrado na Figura 23.

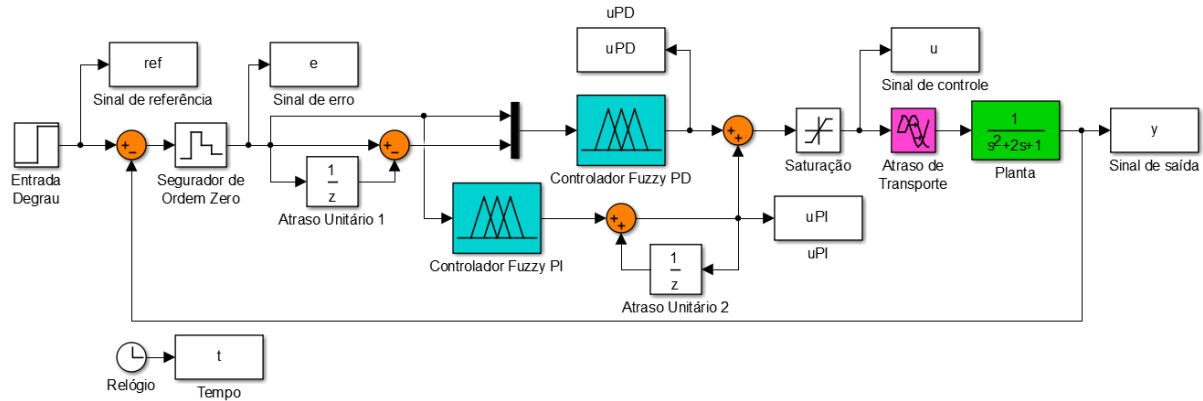


Figura 23. Diagrama de blocos em ambiente MATLAB/SIMULINK para $G_1(s)$.

Na Figura 24 é mostrada a resposta a uma entrada do tipo degrau unitário para o sistema de segunda ordem $G_1(s)$ quando este é controlado por controlador PID convencional sintonizado de acordo com a Tabela 4 e quando o mesmo é controlado por controlador PD *fuzzy* em conjunto com PI *fuzzy*.

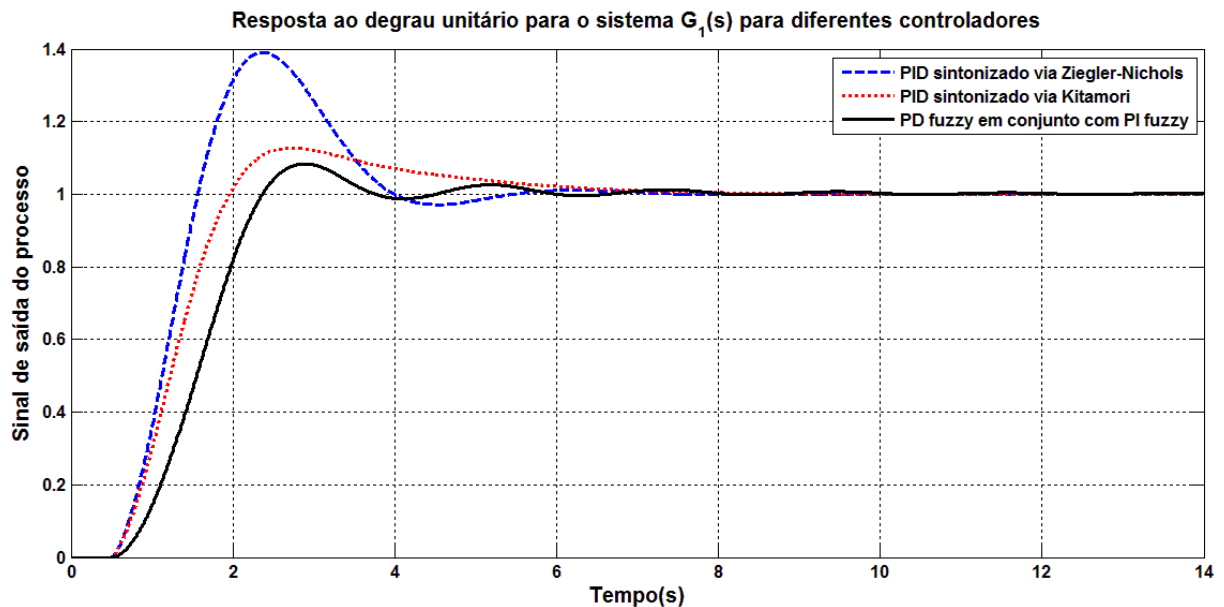


Figura 24. Resposta ao degrau de $G_1(s)$ para diferentes controladores.

- Simulação para o sistema $G_2(s)$:

O diagrama de blocos construído em ambiente MATLAB/SIMULINK para a planta $G_2(s)$ mais controlador PD *fuzzy* em conjunto com PI *fuzzy* é mostrado na Figura 25.

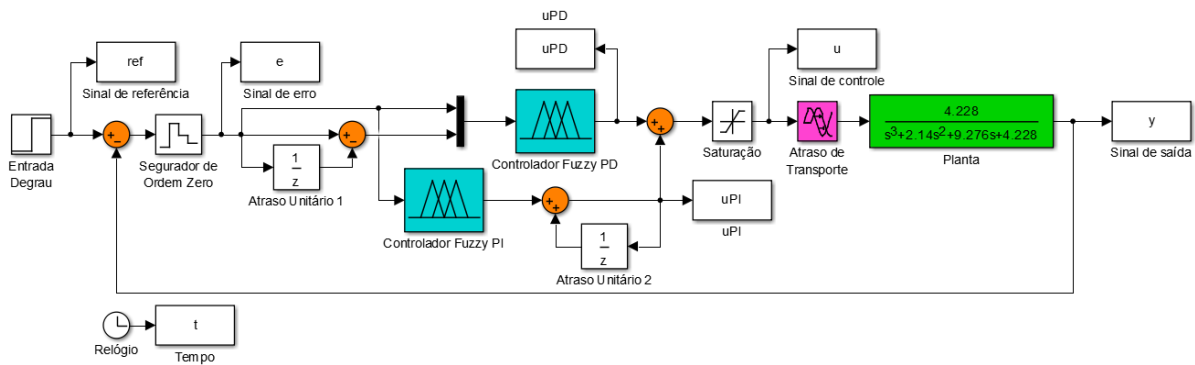


Figura 25. Diagrama de blocos em ambiente MATLAB/SIMULINK para $G_2(s)$.

Na Figura 26 é mostrado a resposta a uma entrada do tipo degrau unitário para o sistema de terceira ordem $G_2(s)$ quando este é controlado por controlador PID convencional sintonizado de acordo com a Tabela 6 e quando o mesmo é controlado por controlador PD *fuzzy* em conjunto com PI *fuzzy*.

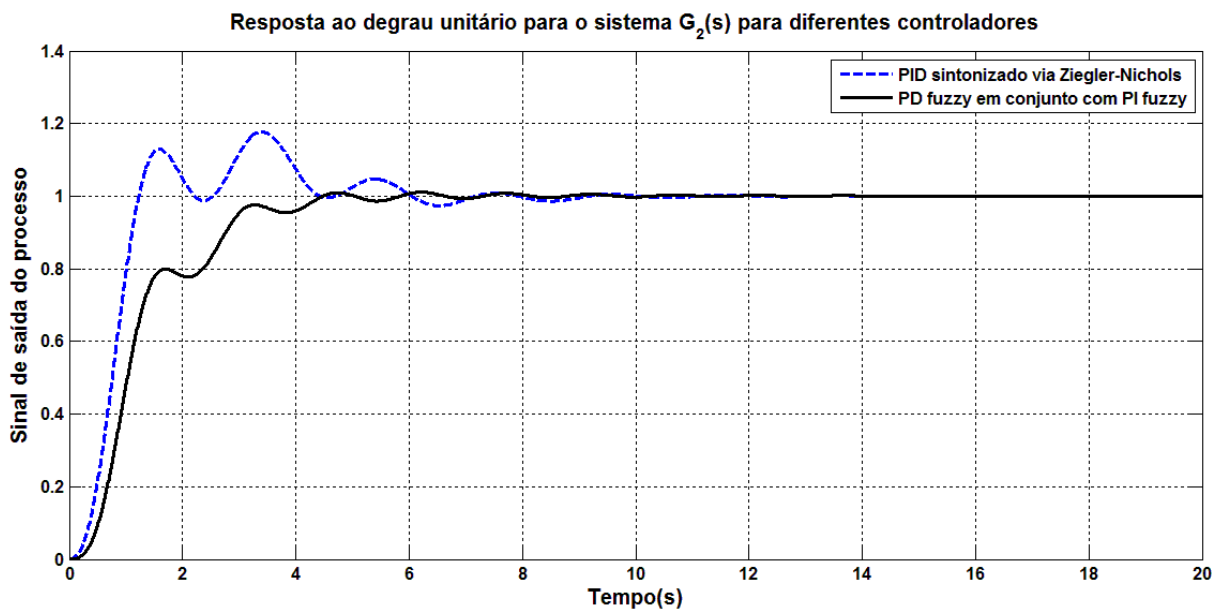


Figura 26. Resposta ao degrau de $G_2(s)$ para diferentes controladores.

- Simulação para o sistema $G_3(s)$:

O diagrama de blocos construído em ambiente MATLAB/SIMULINK para a planta $G_3(s)$ mais controlador PD *fuzzy* em conjunto com PI *fuzzy* é mostrado na Figura 27.

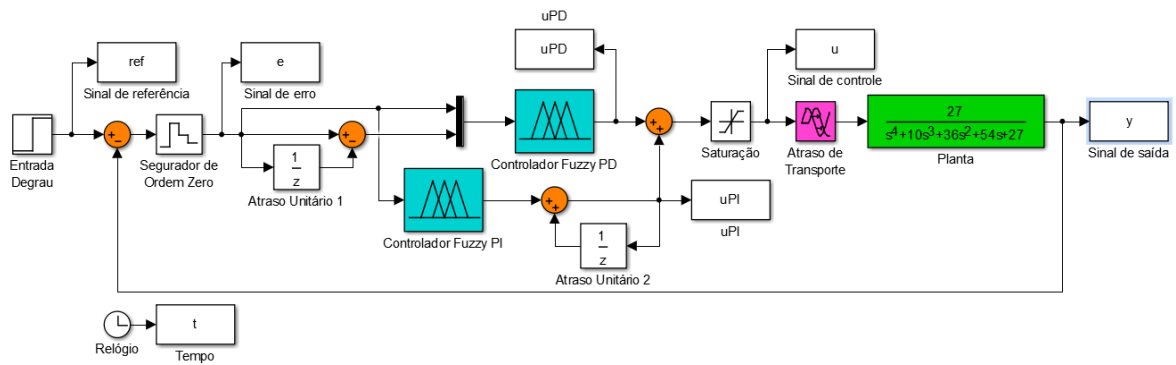


Figura 27. Diagrama de blocos em ambiente MATLAB/SIMULINK para $G_3(s)$.

Na Figura 28 é mostrado a resposta a uma entrada do tipo degrau unitário para o sistema de quarta ordem $G_3(s)$ quando este é controlado por controlador PID convencional sintonizado de acordo com a Tabela 8 e quando o mesmo é controlado por controlador PD *fuzzy* em conjunto com PI *fuzzy*.

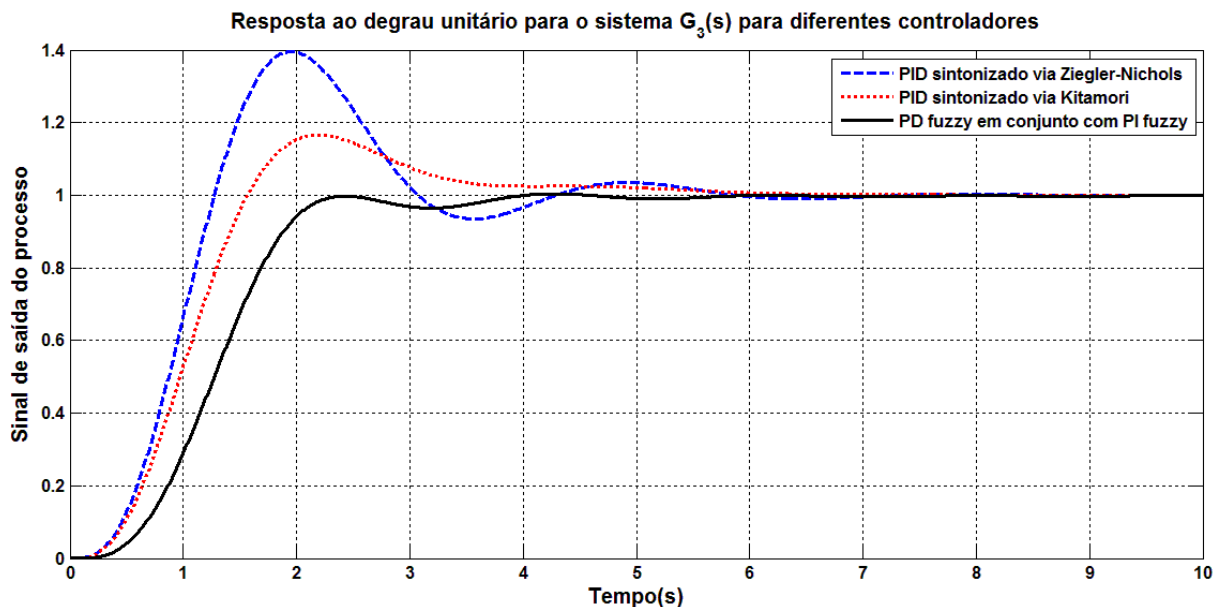


Figura 28. Resposta ao degrau de $G_3(s)$ para diferentes controladores.

8. Conclusões e Resultados

Todas as configurações propostas de controle por meio da lógica *fuzzy* incluem o conhecimento de um especialista humano, sendo estas estratégias simuladas para três plantas de ordens distintas, onde o desempenho dos controladores *fuzzy* foi bastante satisfatório mediante comparação a um controlador PID a parâmetros fixos. Melhorias no desempenho dos sistemas podem ser alcançadas pelo ajuste fino dos universos de discurso de entrada e saída do sistema *fuzzy*, alterações na base de regras, bem como a avaliação da influência de diferentes funções de pertinências para o desempenho dos controladores *fuzzy*.

As Tabelas 19, 20 e 21 contém o resumo dos resultados obtidos das simulações para cada sistema mais controlador PID convencional e controladores *fuzzy*. O tempo de acomodação T_a e o sobressinal máximo percentual $OS(\%)$ são mostrados para cada sistema.

Tabela 19. Resumo dos resultados de simulação para $G_1(s)$.

Resultados de Simulação para o Sistema $G_1(s)$		
Controlador	Tempo de Acomodação	Sobressinal
PID Ziegler-Nichols	$T_a = 3,71 \text{ s}$	$OS(\%) = 39,1\%$
PID Kitamori	$T_a = 4,64 \text{ s}$	$OS(\%) = 12,8\%$
PID <i>fuzzy</i> com ganho programado	$T_a = 3,2 \text{ s}$	$OS(\%) = 3,81\%$
PD <i>fuzzy</i> com controle integral com ganho <i>fuzzy</i>	$T_a = 4,02 \text{ s}$	$OS(\%) = 10,6\%$
PD <i>fuzzy</i> em conjunto com PI <i>fuzzy</i>	$T_a = 3,32 \text{ s}$	$OS(\%) = 8,3\%$

Tabela 20. Resumo dos resultados de simulação para $G_2(s)$.

Resultados de Simulação para o Sistema $G_2(s)$		
Controlador	Tempo de Acomodação	Sobressinal
PID Ziegler-Nichols	$T_a = 4,11 \text{ s}$	$OS(\%) = 17,7\%$
PID Kitamori	-	-
PID <i>fuzzy</i> com ganho programado	$T_a = 2,89 \text{ s}$	$OS(\%) = 4,97\%$
PD <i>fuzzy</i> com controle integral com ganho <i>fuzzy</i>	$T_a = 3,34 \text{ s}$	$OS(\%) = 3,4\%$
PD <i>fuzzy</i> em conjunto com PI <i>fuzzy</i>	$T_a = 2,99 \text{ s}$	$OS(\%) = 1,11\%$

Tabela 21. Resumo dos resultados de simulação para $G_3(s)$.

Resultados de Simulação para o Sistema $G_3(s)$		
Controlador	Tempo de Acomodação	Sobressinal
PID Ziegler-Nichols	$T_a = 3,85 \text{ s}$	$OS(\%) = 39,5\%$
PID Kitamori	$T_a = 3,26 \text{ s}$	$OS(\%) = 16,6\%$
PID <i>fuzzy</i> com ganho programado	$T_a = 4,53 \text{ s}$	$OS(\%) = 7,11\%$
PD <i>fuzzy</i> com controle integral com ganho <i>fuzzy</i>	$T_a = 3,51 \text{ s}$	$OS(\%) = 1,9\%$
PD <i>fuzzy</i> em conjunto com PI <i>fuzzy</i>	$T_a = 2,03 \text{ s}$	$OS(\%) = 0,04\%$

9. Referências Bibliográficas

DORF, R. C.; BISHOP, R. H. **Sistemas de Controle Modernos**. 8ª Edição, Livros Técnicos e Científicos, 2001.

KITAMORI, T. **A Method of Control Systems Design Based upon Partial Knowledge about Controlled Processes** *in* Trans. SICE Japan, vol. 15, pp. 549-555, 1979.

KUO, B. C. **Automatic Control Systems**. 5th Edition. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1987.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 3ª Edição, Livros Técnicos e Científicos, 1998.

TAKAHASHI, Y.; RABINS, M. J. & AUSLANDER, D. M. **Control and Dynamic Systems**. Menlo Park, NJ: Addison-Wesley, 1970.

WANG, L. X. **A Course in Fuzzy Systems and Control**. Prentice-Hall, 1996.

ZADEH, L. A. **Fuzzy Sets** *in* Information and Control, vol. 8, n. 3, pp. 338-353, June, 1965.

ZHAO, Z. Y.; TOMIZUKA, M. & ISAKA, S. **Fuzzy Gain Scheduling of PID Controllers** *in* IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, v.23, n.5 pp. 1392-1398, September/October, 1993.

ZIEGLER, J. G. & NICHOLS, N. B. **Optimum Settings for Automatic Controllers** *in* Trans. ASME, vol. 64, pp. 759-768, 1942.