

**PMR3409 Controle II - Experiência 7: Métodos de discretização e implementação de controladores PID**

Nome: _____ NUSP: _____ Turma: ____ <b>Alunos do grupo</b> 1. Nome: _____ NUSP: _____ Turma: ____ 2. Nome: _____ NUSP: _____ Turma: ____ Data: ___/___/___      Reposição? ( ) S ( ) N	<b>NOTA</b>
--	-------------

**O relatório deve ser feito individualmente i.e. cada aluno deve submeter um relatório. Em seguida deve ser escaneado e o arquivo PDF deve ser submetido via Sistema Moodle.**

### 1 Introdução

Nessa experiência será analisado métodos de discretização aplicados a controladores PID. Os controladores obtidos no domínio do tempo discreto serão testados no kit de motor C.C. para controle da posição e da velocidade angular.

Na Experiência 3 foram identificados os parâmetros de tempo contínuo ( $K_\omega, K_\theta, T$ ) (Obs: Mudamos a nomenclatura de  $K_p$  para  $K_\theta$  para não confundir com o ganho proporcional do controlador PID) das funções de transferência da velocidade e da posição angular do motor C.C.:

$$G_\omega(s) = \frac{K_\omega}{Ts + 1}. \tag{1}$$

$$G_\theta(s) = \frac{K_\theta}{s(Ts + 1)}. \tag{2}$$

Verifique no seu relatório da Experiência 3 e preencha a tabela abaixo:

	$K_\omega$	$K_\theta$	$T$
Conj. de dados 1			

Identifique o motor utilizado:

Motor No.	
-----------	--

O projeto de um controlador PID no domínio  $z$  consiste na escolha dos mesmos parâmetros do controlador PID no domínio  $s$ :

$$H(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{\frac{T_d}{N} s + 1} \right) \tag{3}$$

O controlador correspondente  $H(z)$  no domínio  $z$  é obtido utilizando algum método de discretização.

Os controladores PI para controle da velocidade angular e PID para controle da posição angular foram obtidos respectivamente nas Experiências 5 e 6 no domínio  $z$ . Os parâmetros no entanto refletem diretamente o controlador no domínio  $s$ . Escreva nas tabelas abaixo os parâmetros dos controladores PI e PID que você obteve:

$K_p$	$T_i$

$K_p$	$T_i$	$T_d$	$N$

## 2 Discretização do controlador PI

Nessa seção o controlador PI obtido na Experiência 5 será discretizado através de 4 diferentes métodos:

- Forward-Difference
- Backward-Difference
- Transformação Bilinear
- Casamento de pólos e zeros

Em geral, os métodos são comparados no domínio da frequência  $z$  utilizando o diagrama de Bode.

O script `DiscretizacaoPID.m` realiza a discretização do controlador PID no domínio  $s$  dado pela Equação 3. Os diagramas de Bode das funções de transferência  $H(z)$  obtidas são comparadas com o diagrama de Bode de  $H(s)$ .

1. Utilizando o script `DiscretizacaoPID.m` realize a discretização do controlador PI com os parâmetros  $(K_p, T_i)$  obtidos na Experiência 5. Setar a constante derivativa  $T_d=0$ , frequência de amostragem  $f_a=20$  e os parâmetros  $f_i=-1$ ,  $f_f=2$  para a geração da escala logaritmica do diagrama de Bode.
2. Funções de transferência do controlador PI:

Forward-Difference	
Backward-Difference	
Transformação Bilinear	
Casamento de pólos e zeros	

3. Esboce abaixo o Diagrama de Bode (Módulo e Fase) das funções de transferência  $H(z)$ :





4. Analise os resultados obtidos.

### 3 Implementação do controlador PI para controle da velocidade angular do kit de motor C.C.

O controlador PI no domínio  $z$  pode ser genericamente escrito como:

$$H(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{b_1 z + b_2}{a_1 z + a_2}, \quad (4)$$

A equação de diferenças no domínio do tempo discreto pode então ser escrita como:

$$u(k) = -\frac{a_2}{a_1} u(k-1) + \frac{b_1}{a_1} e(k) + \frac{b_2}{a_1} e(k-1) \quad (5)$$

Você deve utilizar aqui uma das funções de transferência  $H(z)$  do controlador PI obtidas no item anterior. Utilize a função que mais se aproxima do controlador no domínio  $s$ ,  $H(s)$ .

1. Indique aqui o controlador escolhido:

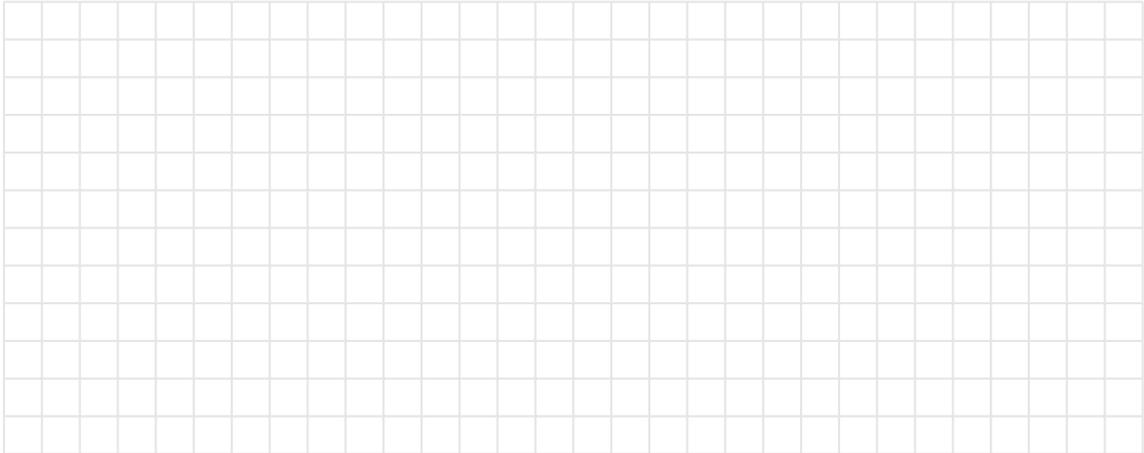
Método	
H(z)	

2. Parte experimental:

- O setup experimental já deve estar pronto.
- O script `SistemaDeControleDigitalPIDV1.m` realiza o controle de velocidade e posição angular do motor C.C. utilizando um timer com frequência  $f_a$ .
- Setar no script a frequência de amostragem  $f_a=20$ , os parâmetros  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  do controlador  $H(z)$  escolhido, e  $a_3=0.0$  e  $b_3=0.0$ .

- Para o controle de velocidade certifique-se que a instrução:  
`yk = sample(2)`  
 está habilitada. `sample(2)` se refere ao canal 1 que está ligado ao tacômetro para a medida da velocidade angular.
- O gerador de funções deve ser ajustado para uma onda quadrada de amplitude [0V,3V] e frequência  $f_g = 0.1Hz$  (Obs: o gerador de funções já deve estar ajustado com esses parâmetros se não estiver peça ajuda ao Professor).

3. Esboce abaixo o gráfico no domínio do tempo da velocidade  $\omega(t)$  e do esforço de controle  $u(t)$ . Obs: Dois períodos são suficientes.



4. Anote na tabela abaixo os valores obtidos para o tempo de subida  $t_r$ , tempo de acomodação  $t_s$ , Máximo sobre-sinal  $M_p$ . Obs: estimativa deve ser feita pelo gráfico.

$t_r$	$t_s$	$M_p$

5. Compare o resultado obtido experimentalmente com o resultado previsto pelas simulações da Experiência 5.

## 4 Discretização do controlador PID

Nessa seção o controlador PID obtido na Experiência 6 será discretizado através dos 4 diferentes métodos.

O script `DiscretizacaoPID.m` realiza a discretização do controlador PID no domínio  $s$  dado pela Equação 3. Os diagramas de Bode das funções de transferência  $H(z)$  obtidas são comparadas com o diagrama de Bode de  $H(s)$ .

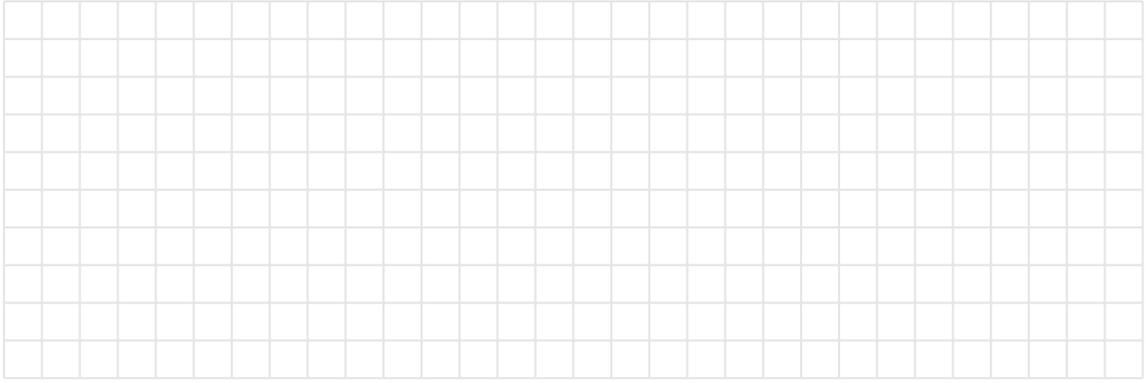
1. Utilizando o script `DiscretizacaoPID.m` realize a discretização do controlador PID com os parâmetros  $(K_p, T_i, T_d, N)$  obtidos na Experiência 6. Setar a frequência de amostragem  $f_a=20$  e os parâmetros  $f_i=-1$ ,  $f_f=2$  para a geração da escala logarítmica do diagrama de Bode.
2. Funções de transferência do controlador PID:

Forward-Difference	
Backward-Difference	
Transformação Bilinear	
Casamento de pólos e zeros	

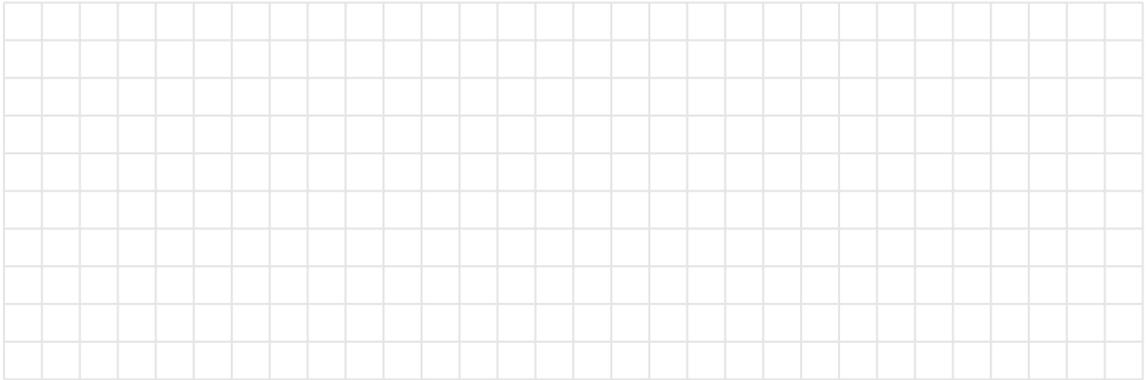
3. Esboce abaixo o Diagrama de Bode (Módulo e Fase) das funções de transferência  $H(z)$ :



4. Repita o mesmo procedimento com  $f_a=10$   
 Esboce abaixo o Diagrama de Bode (Módulo e Fase) das funções de transferência  $H(z)$ :



5. Repita o mesmo procedimento com  $f_a=200$   
Esboce abaixo o Diagrama de Bode (Módulo e Fase) das funções de transferência  $H(z)$ :



6. Analise os resultados obtidos.

## 5 Teste do controlador PID utilizando Simulink com modelo realista do motor C.C.

Infelizmente não é possível realizar um teste do controlador PID para o controle de posição angular do kit de motor C.C. A parte derivativa gera picos de tensão de valores muito elevados que facilmente ultrapassam o intervalo [-5V,+5V] do potenciômetro.

Ao invés disso é proposto aqui uma simulação utilizando um modelo em Simulink do sistema de controle em malha fechada. O modelo descrito no arquivo `ControladorPID_PosicaoAngular.xls` está associado ao diagrama esquemático ilustrado na Figura 1

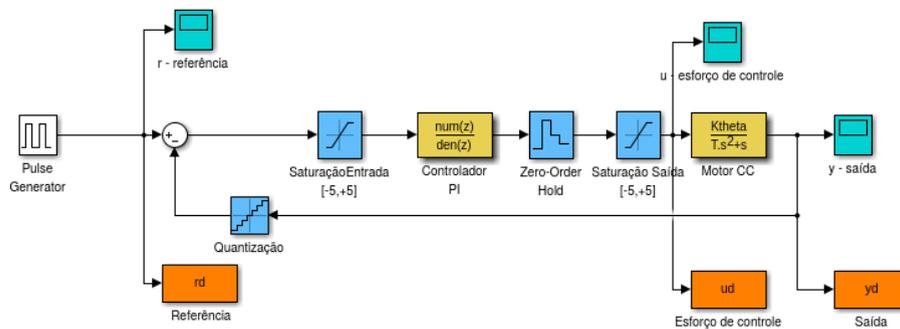


Figura 1: Diagrama esquemático do sistema de controle de posição angular.

O modelo bastante completo tem a planta definida no domínio  $s$  e o controlador no domínio  $z$ . São utilizados quantizadores, elementos de saturação e um `sample-and-hold` de ordem zero

A função de transferência do controlador PID pode ser representada genericamente pela seguinte função de transferência:

$$H(z) = \frac{b_1 z^2 + b_2 z + b_3}{a_1 z^2 + a_2 z + a_3} \quad (6)$$

O modelo em Simulink está parametrizado por variáveis que devem ser inicializadas através do script `ScriptDefinicializacaoPID_PosicaoAngular.m`.

1. Setar `nbits=12, A=1, fa=20`,
2. Setar os parâmetros da planta que você obteve na Experiência 3: `Ktheta` e `T`.
3. Setar os parâmetros do controlador PID: `a1, a2, a3, b1, b2, b3` que correspondam ao controlador obtido pelo método de discretização que mais se aproxima do equivalente no domínio  $s$ . O script deve ser executado antes de executar o modelo em Simulink.
4. Indique aqui o controlador escolhido:

Método	
H(z)	

- Executar o modelo em Simulink. Um gráfico contendo a resposta no domínio do tempo pode ser obtido executando o script `plotgraficoPID_PosicaoAngular.m`
- Esboce abaixo o gráfico no domínio do tempo da velocidade  $\theta(t)$  e do esforço de controle  $u(t)$ . Obs: Dois períodos são suficientes.



- Anote na tabela abaixo os valores obtidos para o tempo de subida  $t_r$ , tempo de acomodação  $t_s$ , Máximo sobre-sinal  $M_p$ . Obs: estimativa deve ser feita pelo gráfico.

$t_r$	$t_s$	$M_p$

- Indique na tabela abaixo os resultados previsto pelas simulações da Experiência 6.

$t_r$	$t_s$	$M_p$

- Analisar e comparar os resultados.

## 6 Implementação de controlador P para controle de posição angular do kit de motor C.C.

**Obs: Não será possível utilizar o motor no. 4 devido a um problema do potenciômetro.**

Embora o controlador PID seja difícil de ser utilizado para esse kit de motor C.C. é possível obter resultados razoáveis para o controlador proporcional já que esse não apresenta esforço de controle com rápidas derivadas e valores máximos elevados.

- Para a escolha de um valor adequado de  $K_p$  você deve utilizar o script `ControleP_VariacaoP.m` (Obs: o mesmo utilizado na Experiência 6).
- Setar os parâmetros da planta que você obteve na Experiência 3:  $K_\theta$  e  $T$ .

3. Setar o intervalo de amostragem  $T_a=0.05$ .
4. Escolher três valores para a constante proporcional  $K_{p1}$ ,  $K_{p2}$ ,  $K_{p3}$ . Já estão definidos os valores 0.1, 0.5 e 1.0 mas você pode escolher outros desde que próximos desses.
5. Executar o script.
6. Escolha um valor de  $K_p$  e anote na tabela abaixo os valores obtidos para o tempo de subida  $t_r$ , tempo de acomodação  $t_s$ , Máximo sobresinal  $M_p$ .

$t_r$	$t_s$	$M_p$

7. Parte experimental:

- O setup experimental já deve estar pronto.
- Utilizar o script SistemaDeControleDigitalPIDV1.m.
- Setar no script a frequência de amostragem  $f_a=20$ , os parâmetros  $a_1=1$ ,  $a_2=0$ ,  $a_3=0$ ,  $b_1=K_p$ ,  $b_2=0$ ,  $b_3=0$
- Para o controle de posição certifique-se que a instrução:  
`yk = sample(3)`  
 está habilitada. `sample(3)` se refere ao canal 2 que está ligado ao potenciômetro para a medida da posição angular.
- O gerador de funções deve ser ajustado para uma onda quadrada de amplitude [0V,3V] e frequência  $f_g = 0.1Hz$  (Obs: o gerador de funções já deve estar ajustado com esses parâmetros se não estiver peça ajuda ao Professor).
- Esboce abaixo o gráfico no domínio do tempo da posição angular  $\theta(t)$  e do esforço de controle  $u(t)$ . Obs: Dois períodos são suficientes.



- A partir do gráfico estimar as seguintes grandezas

$t_r$	$t_s$	$M_p$

8. Analisar e comparar os resultados de simulação e experimental.

## **7 Discussões**

## **8 Conclusões**