



UNICAMP – Faculdade de Engenharia Elétrica  
e de Computação  
EA-617 Introdução à Simulação Analógica

Experiência 9: Sistemas ECP com Entrada de Sinais Amostrados

17 de novembro de 2006

## Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Sistema Retilíneo</b>	<b>3</b>
2.1	Procedimento Experimental para o Sistema Retilíneo . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Sistema Torcional</b>	<b>6</b>
3.1	Procedimento Experimental para o Sistema Torcional . . . . .	7
<b>4</b>	<b>Emulador Industrial</b>	<b>8</b>
4.1	Procedimento Experimental para o Emulador Industrial . . . . .	9
<b>5</b>	<b>Pêndulo Invertido</b>	<b>11</b>
5.1	Procedimento Experimental para o Pêndulo . . . . .	12
<b>6</b>	<b>Levitador Magnético</b>	<b>13</b>
6.1	Procedimento Experimental para o Levitador . . . . .	14
	<b>Relatório</b>	<b>15</b>

## 1 Introdução

O objetivo desta experiência é ilustrar a validade do teorema da amostragem procedendo-se a filtragem de um sinal amostrado através de um sistema mecânico cuja dinâmica é ajustada para aproximá-lo de um filtro ideal.

Conforme visto na experiência anterior, um sistema de 2ª ordem com  $\xi = 1/2$  se comporta aproximadamente como um filtro passa-baixas com frequência de corte igual à frequência natural do sistema  $\omega_n$ . Cada um dos sistemas mecânicos ECP pode ser configurado desta maneira, com a ajuda de controladores do tipo PD, e ser utilizado como filtro passa-baixas (FPB).

A idéia central desta experiência pode ser resumida como segue. Inicialmente gera-se um sinal com composição espectral limitada em frequência<sup>1</sup>. O sinal é então amostrado com uma certa taxa de amostragem e armazenado num arquivo com extensão “.trj” o qual pode ser utilizado como sinal de referência para os sistemas ECP (através da opção “user defined” no menu “trajectory”). Finalmente uma filtragem será realizada pelos sistemas mecânicos ECP configurados como sistemas de segunda ordem, visando recuperar o sinal original. Duas questões relativas a este problema surgem. É possível recuperar o sinal original a partir das amostras? Se sim, como? O teorema da amostragem estabelece condições para que este tipo de sinal possa ser amostrado sem que haja perda de informação. De acordo com os resultados teóricos apresentados na experiência anterior, isto ocorrerá somente se duas condições se verificarem:

- O sinal original for amostrado numa frequência  $f_s$  superior ao dobro do limitante superior de seu conteúdo espectral  $f_0$ , ou seja,  $f_s > 2f_0$ ;
- O sinal amostrado for filtrado por um FPB (realizado por um sistema ECP) cuja frequência de corte  $f_n$  seja delimitada por:  $f_0 < f_n < f_s - f_0$ .

Um exemplo de sinal amostrado e adequadamente recuperado por um FPB de 2<sup>a</sup> ordem é dado pelo exercício de simulação B-1-a proposto na experiência 9. A Fig. 1 apresenta o espectro do sinal amostrado e a resposta do filtro para aquele exercício.

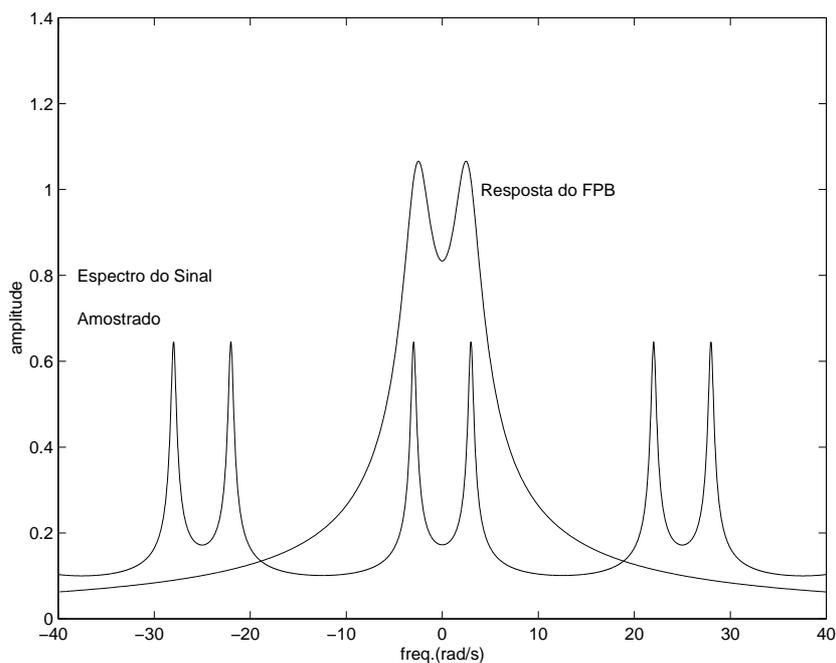


Figura 1: Espectro de um sinal amostrado e a resposta de um FPB de segunda ordem.

Em resumo, a presente experiência consistirá em utilizar o sinal amostrado (armazenado no arquivo .trj) como referência para algum sistema ECP configurado como FPB. Deseja-se obter na saída um sinal aproximadamente igual ao sinal original (antes de ser amostrado). Um sinal típico utilizado como referência nesta experiência é dado pela Fig. 2.

<sup>1</sup>Sabe-se que um sinal limitado no tempo é necessariamente ilimitado no domínio da frequência. Contudo é possível que o espectro deste sinal seja aproximadamente limitado (isto é, desprezível para frequências acima de um certo valor) e que seu limite superior seja conhecido.

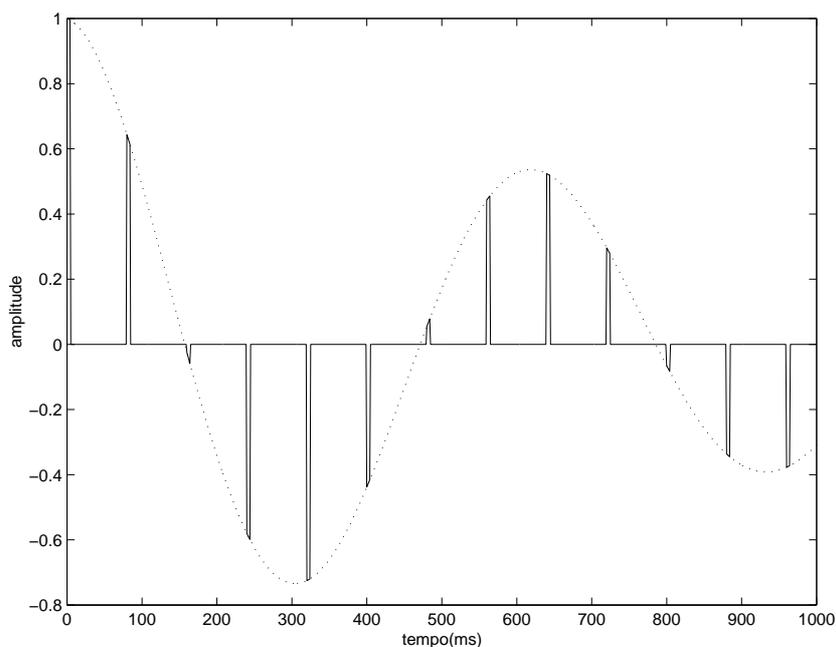


Figura 2: Sinal amostrado armazenado em arquivo “.trj”.

Os sinais utilizados tem a forma geral  $x(t) = Ke^{-\sigma t} \cos(\omega_d t)$  e são amostrados com uma frequência conhecida  $\omega_s$ . O formato “.trj” é descrito a seguir. A primeira linha deve conter o número correspondente ao número de linhas do arquivo. Cada linha seguinte deve conter um número correspondente a um valor da função desejada. Ao selecionar a opção “trajectory” seguida de “user defined” no software “ECP-Executive” o usuário deve definir um valor “segment time” (expresso em milissegundos) que corresponde ao tempo em que cada valor definido no arquivo será mantido.

Nas seções seguintes será mostrado como cada dispositivo ECP pode ser configurado como um sistema de segunda ordem, com função de transferência aproximadamente igual a de um filtro passa-baixas.

## 2 Sistema Retilíneo

Considere o sistema retilíneo configurado como sistema de segunda ordem, isto é, com apenas um carro ligado ao segundo carro por uma mola e com o segundo carro imobilizado, conforme a Fig. 3.

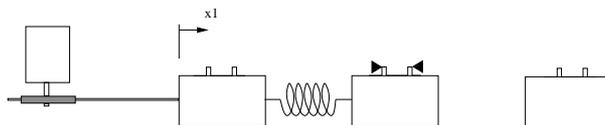


Figura 3: Diagrama do sistema retilíneo com o carro 2 travado.

A função de transferência deste sistema é dada por:

$$F(s) = \frac{k_{hw}}{m_1 s^2 + c_1 s + k_1} \quad (1)$$

onde:

$m_1$ : é a massa do carro;

$c_1$ : é o coeficiente de atrito viscoso do carro;

$k_1$ : é a constante da mola;

$k_{hw}$ : é o ganho de hardware do sistema.

Considere agora, o sistema anterior controlado por um controlador PD com "velocity feedback" com o parâmetro  $k_i = 0$ , conforme a Fig. 7 e  $F(s)$  descrito pela equação (1).

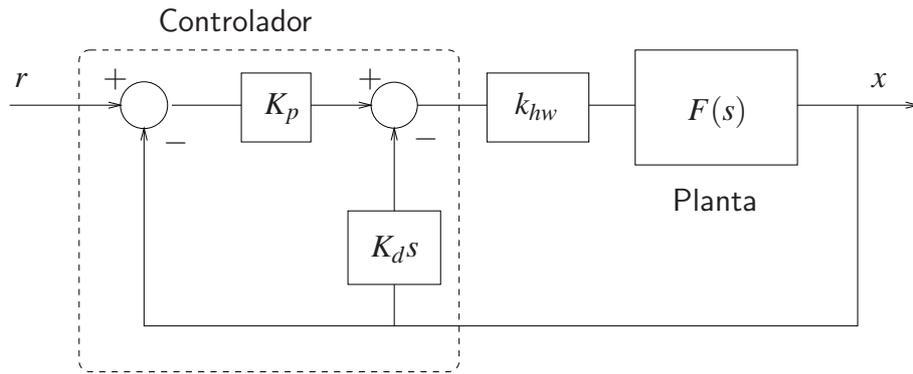


Figura 4: Diagrama de blocos do sistema com controlador PD com "velocity feedback".

A função de transferência do sistema em malha fechada é dada por:

$$\frac{X(s)}{R(s)} = \frac{k_{hw}k_p}{m_1s^2 + (c_1 + k_{hw}k_d)s + (k_1 + k_{hw}k_p)} \quad (2)$$

Para que este sistema se comporte aproximadamente como um filtro de segunda ordem, deve-se calcular os parâmetros  $k_p$  e  $k_d$  de modo que o coeficiente de amortecimento seja  $1/2$  e que a frequência natural de oscilação seja igual à frequência de corte desejada para o filtro. Para que isto aconteça deve-se fazer:

$$k_p = \frac{m_1\omega_n^2 - k_1}{k_{hw}} \quad (3)$$

e

$$k_d = \frac{m_1\omega_n - c_1}{k_{hw}} \quad (4)$$

## 2.1 Procedimento Experimental para o Sistema Retilíneo

Deseja-se analisar o comportamento do sistema retilíneo quando excitado por sinais amostrados com frequência de amostragem distintas

1. Com o controlador desligado, trave o segundo carro utilizando uma chave apropriada (Fig. 3). Conecte o primeiro e o segundo carro utilizando uma mola de dureza fraca .  
**Importante:** não trave o segundo carro utilizando diretamente os conectores nos batentes. Utilize as porcas disponíveis para travá-lo;
2. Fixe quatro massas de 500g sobre o primeiro carro;
3. Para os valores de  $\omega_n = 9, 12$  e  $20$  rd/s, calcule os ganhos  $k_p$  e  $k_d$  do controlador **PD with Velocity Feedback**, de acordo com as equações (3) e (4) respectivamente. Adote os seguintes valores:

$$k_{hw} = 14732, \quad m_1 = 2.778\text{kg (com pesos)}, \quad c_1 = 3.9189\text{N-s/m}, \quad k_1 = 175\text{N/m}$$

**Importante:** Os valores dos ganhos  $k_p$  e  $k_d$  devem ser menores do que 0,1 e 0,04 respectivamente.

4. Com o controlador ligado, entre na caixa de diálogo **Control Algorithm** do menu **Set-up** e defina **Ts=0.00442s** para **Continuous Time**. No menu **Set-up**, selecione **PI with Velocity Feedback** e entre com os valores  $k_p$  e  $k_d$  calculados no passo anterior ( $k_i = 0$ ). Selecione **Implement Algorithm** e **OK**.
5. Entre no menu **Command**, vá para **Trajectory** e selecione **User Defined**. Realize os seguintes ajustes:
  - (a) Selecione **Close Loop Trajectory**,
  - (b) Selecione **Segment Time: 10 (msec)**,
  - (c) Selecione **Trajectory Filename: c:/ea619/fun1Lret.trj**  
Onde o sinal  $f_1$  é o sinal amostrado:

$$f(t) = \text{cte} \exp(-0,1t) \sin(10t), \quad \text{frequência de amostragem } \omega_s = 63 \text{ rd/s}$$

- (d) Não habilite a opção interpolação por spline.
6. Vá para o **Set-up Data Acquisition** no menu **Data** e selecione **Encoder #1** e **Commanded Position** como variáveis para aquisição; especifique uma amostragem a cada 2 ciclos. Selecione **OK** para sair. Selecione **Zero Position** no menu **Utility** para zerar as posições dos encoders;
7. Selecione **Execute** no menu **Command**. No comando **Set up Plot** selecione **Command Position** no eixo da direita e **Encoder 1 Position** no eixo esquerdo. Verifique a qualidade do sinal recuperado na saída do sistema ECP.
8. Repita o experimento utilizando agora o sinal no arquivo:

C:/ea619/fun2Lret.trj

Onde o sinal  $f_2$  é o sinal amostrado:

$$f(t) = \text{cte} \exp(-0,1t) \sin(10t), \quad \text{frequência de amostragem } \omega_s = 31 \text{ rd/s}$$

Verifique a qualidade do sinal recuperado na saída do sistema ECP. Se necessário refaça o cálculo dos parâmetros do controlador PD.

### 3 Sistema Torcional

A utilização do sistema torcional configurado como sistema de segunda ordem é muito semelhante ao caso anterior. Retire os discos 2 e 3.

A função de transferência deste sistema é dada por:

$$F(s) = \frac{k_{hw}}{J_1 s^2 + c_1 s} \quad (5)$$

onde:

$J_1$ : é o momento de inércia do disco 1;

$c_1$ : é o coeficiente de atrito viscoso do disco 1;

$k_{hw}$ : é o ganho de hardware do sistema.

Considere agora, o sistema anterior controlado por um controlador PD com "velocity feedback" com o parâmetro  $k_i = 0$ , conforme a Fig. 5 e  $F(s)$  dado pela equação (5).

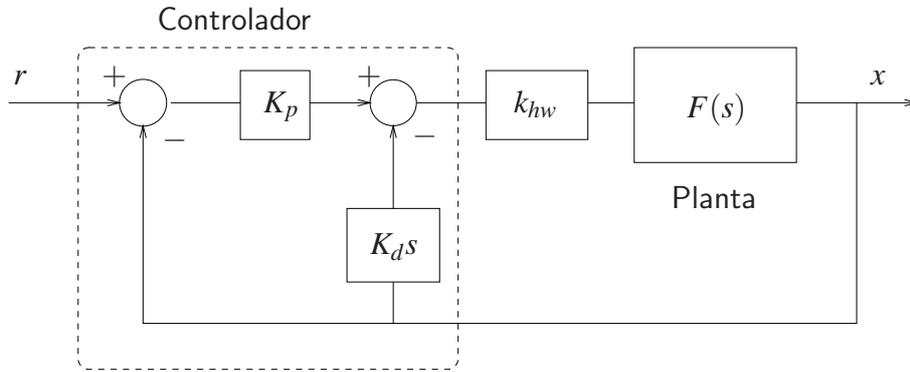


Figura 5: Diagrama de blocos do sistema com controlador PD com "velocity feedback".

A função de transferência do sistema em malha fechada é dada por:

$$\frac{\theta(s)}{R(s)} = \frac{k_{hw} k_p}{J_1 s^2 + (c_1 + k_{hw} k_d) s + k_{hw} k_p} \quad (6)$$

Para que este sistema se comporte aproximadamente como um filtro de segunda ordem, deve-se calcular os parâmetros  $k_p$  e  $k_d$  de modo que o coeficiente de amortecimento seja  $\frac{1}{2}$  e que a frequência natural de oscilação seja igual à frequência de corte desejada para o filtro. Para que isto aconteça deve-se fazer:

$$k_p = \frac{J_1 \omega_n^2}{k_{hw}} \quad (7)$$

e

$$k_d = \frac{J_1 \omega_n - c_1}{k_{hw}} \quad (8)$$

### 3.1 Procedimento Experimental para o Sistema Torcional

Deseja-se analisar o comportamento do sistema torcional quando excitado por sinais amostrados com frequência de amostragem distintas

1. Fixe quatro massas de 500g sobre o disco inferior na distância de 9 cm;
2. Para os valores de  $\omega_n = 3, 4$  e 12 rd/s, calcule os ganhos  $k_p$  e  $k_d$  do controlador **PD with Velocity Feedback**, de acordo com as equações (7) e (8) respectivamente. Adote os seguinte valores:

$$c_1 = 0.0076394 \text{ N-s/m}, J_1 = 0.0187 \text{ N/m (com pesos)} \text{ e } k_{hw} = 17.6$$

**Importante:** Os valores dos ganhos  $k_p$  e  $k_d$  devem ser menores do que 0.2.

3. Com o controlador ligado, entre na caixa de diálogo **Control Algorithm** do menu **Set-up** e defina **Ts=0.00442s** para **Continuous Time**. No menu **Set-up**, selecione **PI with Velocity Feedback** e entre com os valores  $k_p$  e  $k_d$  calculados no passo anterior ( $k_i = 0$ ). Selecione **Implement Algorithm** e **OK**.
4. Entre no menu **Command**, vá para **Trajectory** e selecione **User Defined**. Realize os seguintes ajustes:
  - (a) Selecione **Close Loop Trajectory**,
  - (b) Selecione **Segment Time: 10 (msec)**,
  - (c) Selecione **Trajectory Filename: C:/ea619/fun1\_emu.trj**  
Onde o sinal  $f_1$  é o sinal amostrado:

$$f(t) = \text{cte} \exp(-0, 1t) \sin(4t), \quad \text{frequência de amostragem } \omega_s = 126 \text{ rd/s}$$

- (d) Não habilite a opção interpolação por spline.
5. Vá para o **Set-up Data Acquisition** no menu **Data** e selecione **Encoder #1** e **Commanded Position** como variáveis para aquisição; especifique uma amostragem a cada 2 ciclos. Selecione **OK** para sair. Selecione **Zero Position** no menu **Utility** para zerar as posições dos encoders;
6. Selecione **Execute** no menu **Command**. No comando **Set up Plot** selecione **Command Position** no eixo da direita e **Encoder 1 Position** no eixo esquerdo. Verifique a qualidade do sinal recuperado na saída do sistema ECP.
7. Repita o experimento utilizando agora o sinal no arquivo:

C:/ea619/fun2\_emu.trj

Onde o sinal  $f_2$  é o sinal amostrado:

$$f(t) = \text{cte} \exp(-0, 1t) \sin(4t), \quad \text{frequência de amostragem } \omega_s = 16 \text{ rd/s}$$

Verifique a qualidade do sinal recuperado na saída do sistema ECP. Se necessário refaça o cálculo dos parâmetros do controlador PD.

## 4 Emulador Industrial

Uma particularidade deste sistema é que o momento de inércia total do sistema é composto pelo momento de inércia do disco de atuação somado ao momento de inércia refletido do disco de carga.

A função de transferência deste sistema é na configuração a ser utilizada é dada por:

$$F(s) = \frac{k_{hw}}{J^*s^2 + c^*s} \quad (9)$$

onde:

$J^*$ : é o momento de inércia total refletido sobre o eixo do motor;

$c^*$ : é o coeficiente de atrito viscoso;

$k_{hw}$ : é o ganho de hardware do sistema.

Considere agora, o sistema anterior controlado por um controlador PD com “velocity feedback” com o parâmetro  $k_i = 0$ , conforme a Fig. 6 com  $F(s)$  dado pela equação (9).

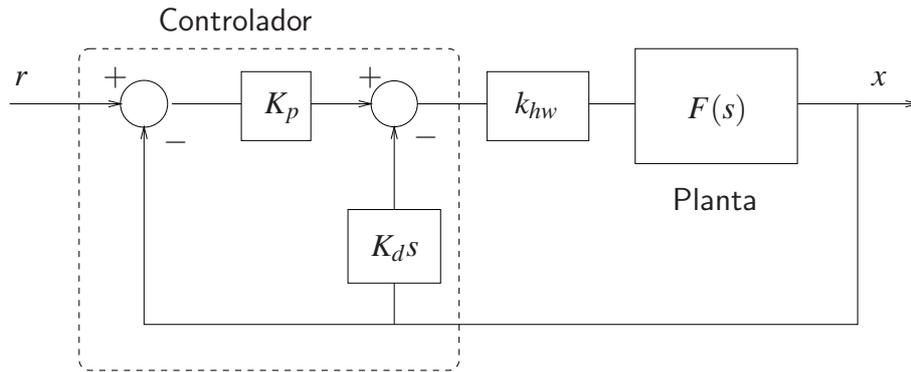


Figura 6: Diagrama de blocos do sistema com controlador PD com “velocity feedback”.

A função de transferência do sistema em malha fechada é dada por:

$$\frac{\theta(s)}{R(s)} = \frac{k_{hw}k_p}{J^*s^2 + (c^* + k_{hw}k_d)s + (k_{hw}k_p)} \quad (10)$$

Para que este sistema se comporte aproximadamente como um filtro de segunda ordem, deve-se calcular os parâmetros  $k_p$  e  $k_d$  de modo que o coeficiente de amortecimento seja  $\frac{1}{2}$  e que a frequência natural de oscilação seja igual à frequência de corte desejada para o filtro. Para que isto aconteça deve-se fazer:

$$k_p = \frac{J^*\omega_n^2}{k_{hw}} \quad (11)$$

e

$$k_d = \frac{J^*\omega_n - c^*}{k_{hw}} \quad (12)$$

## 4.1 Procedimento Experimental para o Emulador Industrial

Deseja-se analisar o comportamento do sistema emulador industrial quando excitado por sinais amostrados com frequência de amostragem distintas.

1. Com o controlador desligado, coloque o sistema no Caso Teste #12:
  - (a)  $n_{pd} = 24$ ,  $n_{pl} = 36$ ,
  - (b) Correias: 140 (entre “drive” e pino) e 260 (entre “load e pino),
  - (c) 4 massas de 500gr no disco de carga a 10cm do centro,
  - (d) 4 massas de 200gr no disco de tração a 6cm do centro.
2. Para os valores de  $\omega_n = 3, 4$  e  $12$  rd/s, calcule os ganhos  $k_p$  e  $k_d$  do controlador **PD with Velocity Feedback**, de acordo com as equações (11) e (12) respectivamente. Adote os seguinte valores:

$$J^* = 0.0053 \text{ N/m}, k_{hw} = 5.77 \text{ e } c^* = 0,0015 \text{ N-s/m}$$

**Importante:** Os valores dos ganhos  $k_p$  e  $k_d$  devem ser menores do que 0.2 e 0.05 respectivamente.

3. Com o controlador ligado, entre na caixa de diálogo **Control Algorithm** do menu **Set-up** e defina **Ts=0.001768s** para **Continuous Time**. No menu **Set-up**, selecione **PI with Velocity Feedback** e entre com os valores  $k_p$  e  $k_d$  calculados no passo anterior ( $k_i = 0$ ). Selecione **Encoder #2** e **OK**. Selecione **Implement Algorithm** e **OK**.
4. Entre no menu **Command**, vá para **Trajectory** e selecione **User Defined**. Realize os seguintes ajustes:
  - (a) Selecione **Close Loop Trajectory**,
  - (b) Selecione **Segment Time: 10** (msec),
  - (c) Selecione **Trajectory Filename: C:/ea619/fun1\_emu.trj**  
Onde o sinal  $f_1$  é o sinal amostrado:

$$f(t) = \text{cte} \exp(-0,1t) \sin(16t), \quad \text{frequência de amostragem } \omega_s = 315 \text{ rd/s}$$

- (d) Não habilite a opção interpolação por spline.
5. Vá para o **Set-up Data Acquisition** no menu **Data** e selecione **Encoder #2** e **Commanded Position** como variáveis para aquisição; especifique uma amostragem a cada 6 ciclos. Selecione **OK** para sair. Selecione **Zero Position** no menu **Utility** para zerar as posições dos encoders;
6. Selecione **Execute** no menu **Command**. No comando **Set up Plot** selecione **Command Position** no eixo da direita e **Encoder 2 Position** no eixo esquerdo. Verifique a qualidade do sinal recuperado na saída do sistema ECP.

7. Repita o experimento utilizando agora o sinal no arquivo:

C:/ea619/fun2\_emu.trj

Onde o sinal  $f_2$  é o sinal amostrado:

$$f(t) = \text{cte} \exp(-0,1t) \sin(16t), \quad \text{frequência de amostragem } \omega_s = 31 \text{ rd/s}$$

Verifique a qualidade do sinal recuperado na saída do sistema ECP. Se necessário refaça o cálculo dos parâmetros do controlador PD.

## 5 Pêndulo Invertido

Considere o pêndulo invertido com a haste principal travada; a função de transferência deste sistema é dada por:

$$F(s) = \frac{k_{hw}}{m_1 s^2 + c_1 s} \quad (13)$$

onde:

$m_1$ : é a massa da haste deslizante com os pesos “orelha”;

$c_1$ : é o coeficiente de atrito viscoso da haste deslizante;

$k_{hw}$ : é o ganho de hardware do sistema, definido pelo produto  $k_s k_f k_x$ ;

Considere agora, o sistema anterior controlado por um controlador PD com “velocity feedback” com o parâmetro  $k_i = 0$ , conforme a Fig. 7 e  $F(s)$  descrito pela equação (13).

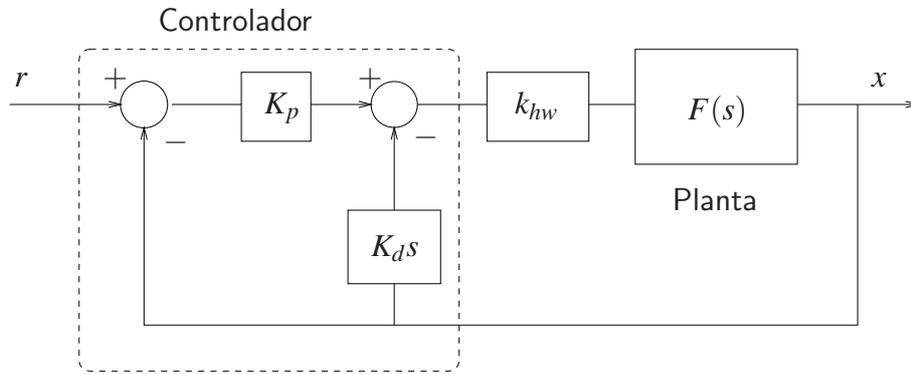


Figura 7: Diagrama de blocos do sistema com controlador PD com “velocity feedback”.

A função de transferência do sistema em malha fechada é dada por:

$$\frac{X(s)}{R(s)} = \frac{k_{hw} k_p}{m_1 s^2 + (c_1 + k_{hw} k_d) s + k_{hw} k_p} \quad (14)$$

Para que este sistema se comporte aproximadamente como um filtro de segunda ordem, deve-se calcular os parâmetros  $k_p$  e  $k_d$  de modo que o coeficiente de amortecimento seja  $1/2$  e que a frequência natural de oscilação seja igual à frequência de corte desejada para o filtro. Para que isto aconteça deve-se fazer:

$$k_p = \frac{m_1 \omega_n^2}{k_{hw}} \quad (15)$$

e

$$k_d = \frac{m_1 \omega_n - c_1}{k_{hw}} \quad (16)$$

## 5.1 Procedimento Experimental para o Pêndulo

Deseja-se analisar o comportamento da haste deslizante quando excitada por sinais amostrados com frequência de amostragem distintas.

1. Desligue o controlador fixe os pesos “orelhas” na haste deslizante. Trave a haste principal do pêndulo utilizando um calço no contrapeso. A haste deslizante deve estar na posição central.
2. Para os valores de  $\omega_n = 20, 30$  e  $50$  rd/s, calcule os ganhos  $k_p$  e  $k_d$  do controlador **PD with Velocity Feedback**, de acordo com as equações (15) e (16) respectivamente. Adote os seguintes valores:

$$m_1 = 0.216\text{kg}, \quad c_1 = 0.225 \text{ N-s/m}, \quad \text{e} \quad k_{hw} = 2088$$

**Importante:** Os valores dos ganhos  $k_p$  e  $k_d$  devem ser menores do que 0,4 e 0,04 respectivamente.

3. Com o controlador ligado, entre na caixa de diálogo **Control Algorithm** do menu **Set-up** e defina **Ts=0.00442s** para **Continuous Time**. No menu **Set-up**, selecione **PI with Velocity Feedback** e entre com os valores  $k_p$  e  $k_d$  calculados no passo anterior ( $k_i = 0$ ). Selecione **Encoder #2** e **OK**. Selecione **Implement Algorithm** e **OK**.
4. Entre no menu **Command**, vá para **Trajectory** e selecione **User Defined**. Realize os seguintes ajustes:
  - (a) Selecione **Close Loop Trajectory**,
  - (b) Selecione **Segment Time: 10** (msec),
  - (c) Selecione **Trajectory Filename: C:/ea619/fun1\_pen.trj**  
Onde o sinal  $f_1$  é o sinal amostrado:

$$f(t) = \text{cte} \exp(-0,1t) \sin(8t), \quad \text{frequência de amostragem } \omega_s = 63 \text{ rd/s}$$

- (d) Não habilite a opção interpolação por spline.
5. Vá para o **Set-up Data Acquisition** no menu **Data** e selecione **Encoder #2** como variável para aquisição; especifique uma amostragem a cada 2 ciclos. Selecione **OK** para sair. Selecione **Zero Position** no menu **Utility** para zerar as posições dos encoders;
  6. Selecione **Execute** no menu **Command**. No comando **Set up Plot** selecione **Command Position** no eixo da direita e **Encoder 2 Position** no eixo esquerdo. Verifique a qualidade do sinal recuperado na saída do sistema ECP.
  7. Repita o experimento utilizando agora o sinal no arquivo:  
C:/ea619/fun2\_pen.trj  
Onde o sinal  $f_2$  é o sinal amostrado:

$$f(t) = \text{cte} \exp(-0,1t) \sin(8t), \quad \text{frequência de amostragem } \omega_s = 31 \text{ rd/s}$$

Verifique a qualidade do sinal recuperado na saída do sistema ECP. Se necessário refaça o cálculo dos parâmetros do controlador PD.

## 6 Levitador Magnético

Considere o levitador magnético somente com o disco #1. A função de transferência deste sistema é dada por:

$$F(s) = \frac{k_{hw}}{m_1 s^2 + c_1 s} \quad (17)$$

onde:

$m_1$ : é a massa do disco magnético;

$c_1$ : é o coeficiente de atrito viscoso;

$k_{hw}$ : é o ganho de hardware do sistema.

Considere agora, o sistema anterior controlado por um controlador PD com "velocity feedback" com o parâmetro  $k_i = 0$ , conforme a Fig. 8 e  $F(s)$  descrito pela equação (17).

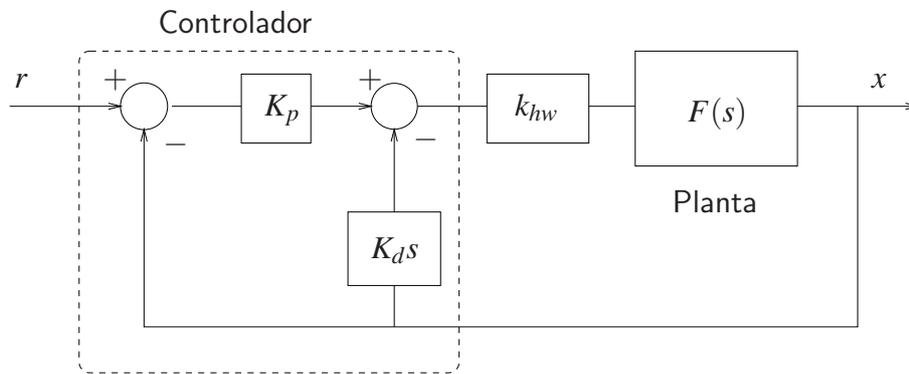


Figura 8: Diagrama de blocos do sistema com controlador PD com "velocity feedback".

A função de transferência do sistema em malha fechada é dada por:

$$\frac{X(s)}{R(s)} = \frac{k_{hw} k_p}{m_1 s^2 + (c_1 + k_{hw} k_d) s + k_{hw} k_p} \quad (18)$$

Para que este sistema se comporte aproximadamente como um filtro de segunda ordem, deve-se calcular os parâmetros  $k_p$  e  $k_d$  de modo que o coeficiente de amortecimento seja 1/2 e que a frequência natural de oscilação seja igual à frequência de corte desejada para o filtro. Para que isto aconteça deve-se fazer:

$$k_p = \frac{m_1 \omega_n^2}{k_{hw}} \quad (19)$$

e

$$k_d = \frac{m_1 \omega_n - c_1}{k_{hw}} \quad (20)$$

## 6.1 Procedimento Experimental para o Levitador

Deseja-se analisar o comportamento do disco #1 do levitador quando excitado por sinais amostrados com frequência de amostragem distintas.

1. No menu **File** carregue os parâmetros de calibração do sensor. Através da opção **Load Settings** carregue o arquivo "Exp6M.cfg". Entre no menu **Setup, Sensor Calibration**, selecione a opção **Calibrate Sensor**  $Y_{cal} = a/Y_{raw} + f/\text{sqrt}(Y_{raw} + g + h * Y_{raw})$  e habilite a opção **Apply Thermal Compensation**;
2. Para os valores de  $\omega_n = 18, 25$  e  $35$  rd/s, calcule os ganhos  $k_p$  e  $k_d$  do controlador PD, de acordo com as equações (19) e (20) respectivamente. Adote os seguintes valores:

$$m_1 = 0.123\text{kg}, \quad c_1 = 0.45 \text{ N-s/m}, \quad \text{e} \quad k_{hw} = 104.6$$

**Importante:** Os valores dos ganhos  $k_p$  e  $k_d$  devem ser menores do que 2 e 0,04 respectivamente.

3. Entre na caixa de diálogo **Control Algorithm** e defina **Ts=0.001768s**. Carregue o algoritmo **Exp9\_ea617.alg** através da opção **Load from disk**. Em seguida selecione **Edit Algorithm** e ajuste os ganhos  $k_p$  e  $k_d$  de acordo com os valores calculados no item anterior. Em seguida selecione **Implement Algorithm**. O disco irá se mover para a altura de 2.5 [cm] mantendo-se nesta posição;
4. Vá para o **Setup Data Acquisition** no menu **Data** e selecione **Commanded Position** e **Variable Q10** como variáveis a adquirir, e especifique uma amostragem de dados a cada 2 ciclos;
5. Entre no menu **Command**, vá para **Trajectory** e selecione **User Defined**. Realize os seguintes ajustes:

- (a) Selecione **Trajectory Filename:** C:/ea619/fun1\_lev.trj

Onde o sinal  $f_1$  é o sinal amostrado:

$$f(t) = \text{cte} \exp(-0, 1t) \cos(20t), \quad \text{frequência de amostragem } \omega_s = 126 \text{ rd/s}$$

- (b) Selecione **Segment Time:** 10 (msec),
- (c) Não habilite a opção interpolação por spline.

6. Selecione **Execute** no menu **Command**. No comando **Set up Plot** selecione **Command Position** no eixo da direita e a variável **Q10** no eixo esquerdo. Verifique a qualidade do sinal recuperado na saída do sistema ECP.
7. Repita o experimento utilizando agora o sinal no arquivo:

C:/ea619/fun2\_lev.trj

Onde o sinal  $f_2$  é o sinal amostrado:

$$f(t) = \text{cte} \exp(-0, 1t) \cos(20t), \quad \text{frequência de amostragem } \omega_s = 32 \text{ rd/s}$$

Verifique a qualidade do sinal recuperado na saída do sistema ECP. Se necessário refaça o cálculo dos parâmetros do controlador PD.

## Relatório

- A. Com base nos resultados e figuras obtidas, estabeleça quando foi possível recuperar o sinal original.
- B. Analise a influência da frequência de amostragem e a frequência de corte do filtro no sinal da saída do sistema.
- C. Compare os resultados obtidos com os previstos pela análise.