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

Experiência 2: Equipamentos ECP[1]

6 de março de 2002

Sumário

1 Introdução **2**

2 Descrição dos sistemas **2**

2.1 Emulador industrial 2

2.2 Sistema retilíneo 3

2.3 Sistema torcional 4

2.4 Pêndulo invertido 5

2.5 Levitador magnético 6

2.6 Aquisição de dados, atuação e interfaces 7

2.7 Mudanças de configuração 8

3 Segurança **8**

4 Regressão linear e ajustamento de curvas **9**

4.1 Método dos mínimos quadrados 10

4.1.1 Estimador dos mínimos quadrados 11

4.1.2 Exemplo de aplicação 12

4.2 Implementação do Matlab 13

Roteiro **14**

[1] ECP – Educational Control Products. Encontram-se no laboratório LE-31 da FEEC.

1 Introdução

Cinco dispositivos eletromecânicos ECP estão disponíveis para uso nas disciplinas EA-617 Introdução a Simulação Analógica, e EA-722 Laboratório de Controle e Servomecanismos. Esses sistemas foram concebidos para facilitar o entendimento dos princípios básicos de controle e da análise de sistemas, consistindo de cinco diferentes plataformas para experimentos e demonstrações. Cada um deles consiste de um dispositivo eletromecânico e de um sistema de apoio completo — software e hardware, para aquisição de dados, atuação, vizualização de dados, etc.

1. O sistema denominado *Emulador Industrial* reproduz situações típicas encontradas no controle de sistemas industriais.
2. O sistema denominado *Sistema Retilíneo* reproduz situações típicas encontradas no controle de sistemas clássicos massa-mola-atrito.
3. O sistema denominado *Sistema Torcional* reproduz situações típicas encontradas no controle de sistemas industriais flexíveis.
4. O sistema denominado *Pêndulo Invertido* reproduz situações típicas encontradas no controle de plantas instáveis.
5. O sistema denominado *Levitador Magnético* reproduz situações típicas encontradas no controle de sistemas multivariáveis.

Na primeira experiência com esses dispositivos, são apresentadas as suas principais características e os recursos do sistema de apoio. Inicia-se o estudo dos modelos matemáticos que serão utilizados.

2 Descrição dos sistemas

2.1 Emulador industrial

A descrição a seguir pode ser acompanhada com o auxílio da Fig. 1 ou da figura 2.2-1 do manual [1].

O sistema consiste de um *motor de atuação* (servo-atuador) que está acoplado através de uma *correia de transmissão* ao *disco de atuação*. Outra correia de transmissão conecta o disco de atuação ao dispositivo *redutor de velocidade* (SR), enquanto que uma terceira correia completa a cadeia de transmissão ao *disco de carga*.

As inércias dos discos de atuação e de carga podem ser modificadas através de *pesos* cujos valores e distâncias aos centros dos discos são convenientemente escolhidos para refletir diferentes modelos e situações de controle.

Reduções de velocidade podem ser realizadas através de *polias* e *correias* dentadas de tamanhos variáveis, ajustáveis ao SR. Pode-se introduzir, de modo a reproduzir situações

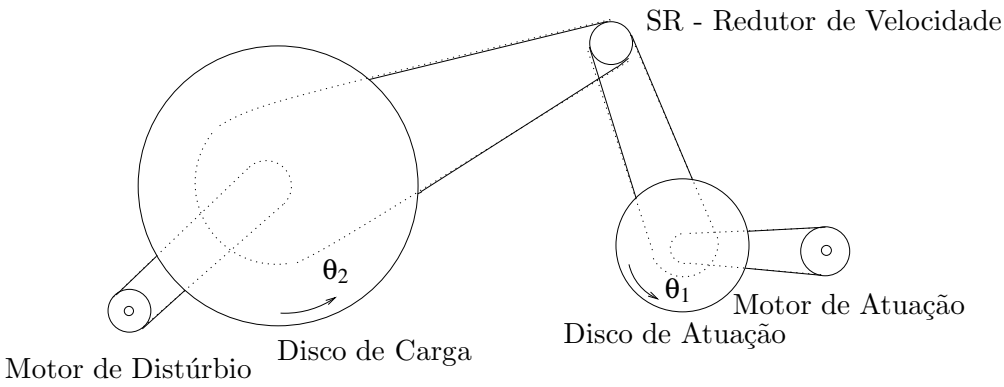

Figura 1: Diagrama esquemático do emulador industrial.

de interesse, folga na conexão mecânica (*backlash*) através de um mecanismo incorporado ao SR, ou atrito extra. Utilizando correias elásticas para conectar o dispositivo SR e o disco de carga, pode-se introduzir *flexibilidade* no acoplamento entre o movimento dos discos de atuação e de carga.

O disco de atuação move-se rigidamente, passo-a-passo com o motor de atuação, de tal forma que a inércia do motor de atuação pode ser considerada *co-alocada*[2], na inércia do disco de atuação. Contudo, a inércia da carga rotaciona numa velocidade diferente da do disco de atuação devido ao dispositivo redutor de velocidade. Como pode existir flexibilidade e/ou folga na conexão mecânica entre o disco de carga e o motor de atuação, a inércia do disco de carga é considerada não co-alocada à do motor.

Também um *motor de distúrbio* está conectado ao disco de carga através de uma redução de velocidade 4:1 feita por correia e polias, e é usado para emular atrito viscoso e distúrbios no comportamento da planta (por exemplo, nas variáveis posição e velocidade do disco de carga).

Um freio abaixo do disco de carga pode ser usado para introduzir atrito de Coulomb. Assim, atritos, distúrbios, folga em conexão mecânica e flexibilidade podem ser utilizados de forma adequada a emulação de situações práticas, permitindo refletir situações não ideais presentes em quase todos os sistemas eletromecânicos fisicamente realizáveis.

Todos os eixos rotatórios do sistema são construídos através de rolamentos de precisão. *Encoders* incrementais de alta precisão estão diretamente acoplados aos discos de atuação (θ_1) e de carga (θ_2). Os motores de atuação e de distúrbio são alimentados eletricamente por servo- amplificadores e fontes de potência instalados numa caixa separada, contendo a eletrônica de acionamento, veja Fig. 6.

2.2 Sistema retilíneo

A descrição a seguir pode ser acompanhada com o auxílio da Fig. 2 ou da figura 2.2-1 do manual [2].

[2] do inglês *collocated*

O sistema consiste de três carros (*mass carriages*) que deslizam com baixo atrito e são conectados entre si através de molas bi-direcionais. As massas estão apoiadas em rolamentos anti-fricção, e podem excursionar por até ±3 cm. O atuador linear é composto por uma cremalheira (*carriage and pinion*) apoiada sobre rolamentos anti-fricção, acoplada ao eixo de um servo-motor. *Encoders* medem as posições dos carros também através de cremalheiras.

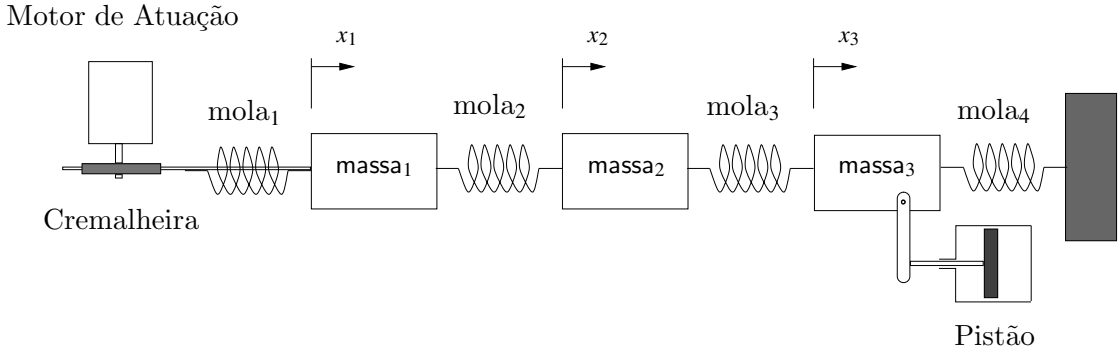

Figura 2: Diagrama Esquemático do sistema retilíneo.

Molas de diferente rigidez (*stiffness*) podem ser conectadas entre as massas ou entre as massas e a base do conjunto. Um pistão (*dashpot*) com amortecimento ajustável pode ser acoplado a qualquer uma das massas. Escalas para medidas de posição estão disponíveis como auxílio para certos experimentos. As massas dos carros podem ser alteradas, bem como a configuração e o número de massas e molas, posicionamento do pistão e de extremidades fixas. Pode-se compor dessa forma, diferentes situações de controle, vide seção 2.2 do manual [2].

O carro correspondente à massa$_1$ move-se rigidamente através de uma haste, em conjunto com o motor de atuação, de tal forma que a inércia do servo-motor pode ser considerada *co-alocada,* à inércia da massa$_1$. O dispositivo de transmissão (cremalheira) transforma o movimento de rotação do motor em translação da massa$_1$. Devido à flexibilidade na conexão por molas, as inércias da massa$_2$ e massa$_3$ são consideradas não co-alocadas à do motor.

Encoders incrementais de alta precisão diretamente acoplados aos carros fornecem leitura das posições absolutas x_1,x_2 e x_3. O motor de atuação é alimentado eletricamente por um servo-amplificador e fonte de potência instalados numa caixa separada, contendo a eletrônica de acionamento, veja Fig. 6.

2.3 Sistema torcional

A descrição a seguir pode ser acompanhada com o auxílio da Fig. 3 ou da figura 2.2-1 do manual [3].

O sistema consiste de três discos que encontram-se conectados através de um eixo torcional flexível suspenso verticamente por rolamentos anti-fricção. O eixo é movimen-

tado por um servo- motor, ao qual se encontra conectado através de uma correia rígida e engrenagem com redução de velocidade 3:1. Um *encoder* localizado na base do eixo mede o deslocamento angular θ_1 do primeiro disco com inércia J_1.

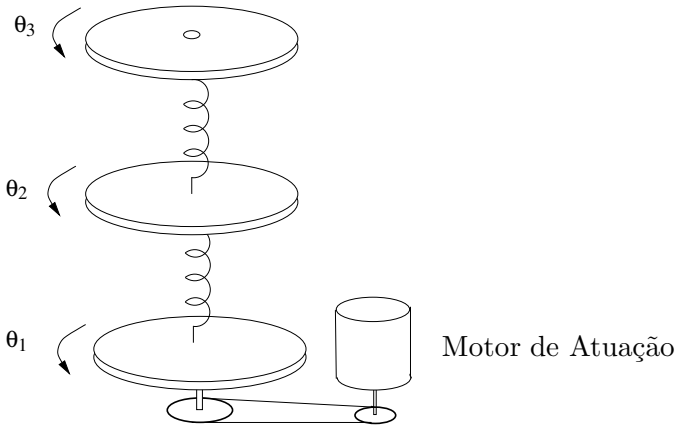

Figura 3: Diagrama Esquemático do sistema torcional.

O segundo e terceiro discos estão conectados aos seus respectivos encoders por correias e engrenagens de razões 1:1 e possuem inércias J_2 e J_3, respectivamente. Os discos são removíveis para dar origem a diferentes configurações de plantas. As inércias dos discos podem ser alteradas através de *pesos* dispostos sobre os discos à distâncias ajustáveis do centro do disco. A configuração de discos, barra de torção, inércia e extremidades fixas podem ser modificadas para refletir diferentes situações de controle, vide seção 2.2 do manual [3].

O disco_1 move-se em conjunto com o motor de atuação, de forma que a inércia do servo-motor pode ser representada *co-alocada,* à inércia do disco_1. Um dispositivo de transmissão por correia conecta e transfere o movimento de rotação do servo-motor para o disco_1. Devido à flexibilidade na conexão entre os discos, as inércias do disco_2 e disco_3 são consideradas não co-alocadas à do motor.

Encoders incrementais de alta precisão diretamente acoplados aos discos fornecem leitura dos deslocamentos angulares θ_1, θ_2 e θ_3. O motor de atuação é alimentado eletricamente por um servo-amplificador e fonte de potência instalados numa caixa separada, contendo a eletrônica de acionamento, veja Fig. 6.

2.4 Pêndulo invertido

A descrição a seguir pode ser acompanhada com o auxílio da Fig 4 ou da figura 2.2-1 do manual [4].

O sistema consiste de uma haste pendular (*pendulum rod*) que suporta a haste deslizante (*sliding balance rod*) responsável pelo balanço do sistema. A haste de balanço é movimentada através de um sistema de correia e polia, que por sua vez é movimentada

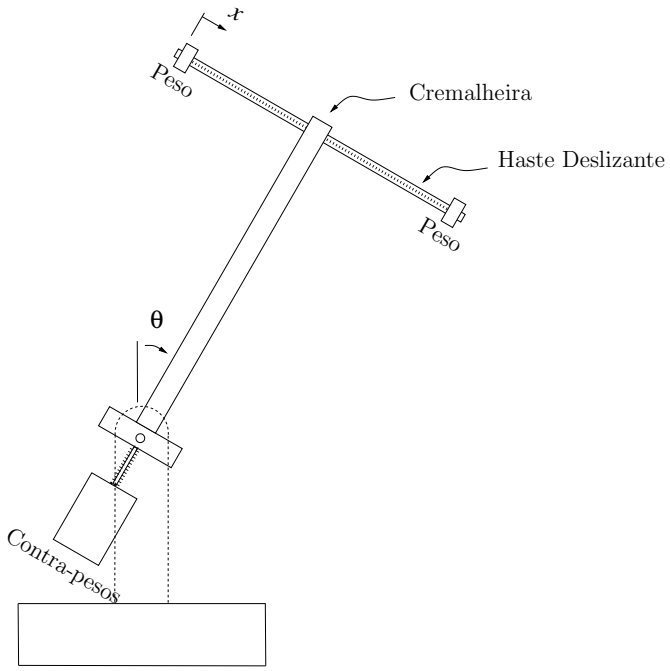

Figura 4: Diagrama Esquemático do pêndulo invertido.

através de um eixo de transmissão conectado a um servo-motor DC localizado na base da haste pendular (omitido na Fig. 4).

Um *encoder* acoplado ao motor mede o deslocamento da haste deslizante. Outro encoder localizado na base de pivoteamento do sistema é usado para medir a posição angular do pêndulo. Ajustando-se convenientemente a posição linear x da haste deslizante na presença da gravidade, pode-se controlar a posição angular θ do pêndulo em relação à vertical. Os motores de atuação são alimentados eletricamente por servo-amplificadores e fontes de potência instalados numa caixa separada, contendo a eletrônica de acionamento, veja Fig. 6.

Os contra-pesos localizados na extremidade inferior da haste pendular podem ser ajustados de forma a alterar o centro de gravidade do conjunto e, consequentemente, a dinâmica do sistema.

2.5 Levitador magnético

A descrição a seguir pode ser acompanhada com o auxílio da Fig 5 ou da figura 2.2-1 do manual [5].

O sistema é composto por duas bobinas, uma inferior e outra superior que geram um campo magnético pela passagem de uma corrente. Essas bobinas interagem através

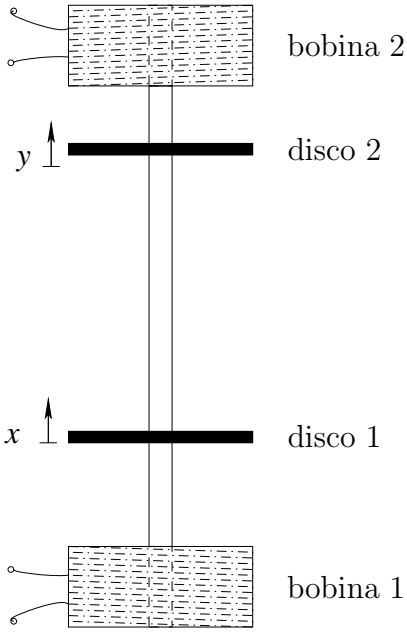

Figura 5: Diagrama do levitador magnético

do campo com (um ou dois) discos magnéticos que se deslocam em uma barra de vidro que serve como guia. Variando-se a magnitude da corrente na bobina inferior, pode-se controlar a posição do magneto inferior fazendo-o levitar através de uma força magnética repulsiva. Similarmente, o magneto superior é posicionado através de uma força magnética de atração, adotando-se um valor adequado de corrente na bobina superior. Com a proximidade dos discos surge também interação magnética (força de repulsão) entre os dois magnetos.

Dois sensores ópticos baseados em feixes de luz laser são utilizados para medir a posição dos magnetos.

2.6 Aquisição de dados, atuação e interfaces

O diagrama esquemático de um sistema ECP completo é mostrado na Fig. 6.

Nos sistemas Emulador Industrial, Retílineo, Torcional e Pêndulo Invertido, os *encoders* fornecem realimentação incremental das posições (e suas derivadas) angulares, e essas informações são roteadas para a placa DSP[3], que então converte os pulsos em valores numéricos. Para o sistema Levitador Magnético a informação sobre a posição é fornecida pelo medidor óptico. A placa DSP é capaz de interpretar comandos de trajetórias e realizar verificações em variáveis com o objetivo de garantir a segurança na operação do equipamento. Nos sistemas Emulador Industrial, Retílineo, Torcional e Pêndulo Invertido o acionamento das plantas é feito por um motor de corrente contínua

[3]DSP acrônimo para *Digital Signal Processor*.

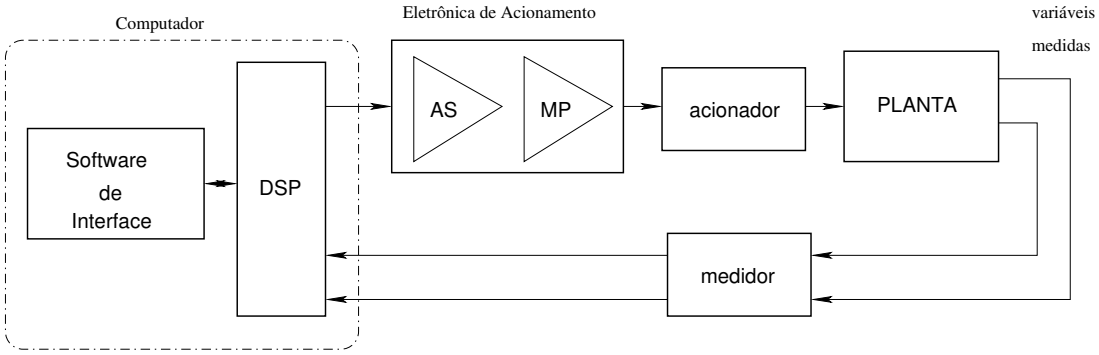

Figura 6: AS - amplificador servo; MP - módulo de potência; DSP - placa de processamento e de conversão de sinais.

sem escovas que gera o torque necessário para o respectivo processo. No Levitador Magnético o acionamento é feito por um sistema eletrônico de potência que gera o sinal de corrente adequado para a bobina.

O terceiro elemento que compõe e finaliza todos os sistemas ECP é o *programa executivo* que roda no PC e dispõe de uma interface gráfica a base de menus, que permite operar o sistema com facilidade. Ele dá suporte à definição de trajetórias, aquisição de dados, visualização de curvas, especificação de controladores, execução de comandos do sistema, etc.

2.7 Mudanças de configuração

Para uma descrição das diferentes configurações do sistema e instruções detalhadas de como realizar alterações de configurações, veja a **seção 2.2.** dos manuais correspondentes.

3 Segurança

As instruções sobre segurança contidas na **seção 2.3** dos manuais dos equipamentos deverão ser rigorosamente observadas por todos os usuários do sistema. Particular atenção deve ser dada para os seguintes pontos:

!! Em situação de emergência pressione o botão vermelho (OFF) no painel frontal da Caixa de Controle.

!! Fique a distância e não toque o mecanismo enquanto ele estiver em movimento, ou o controle estiver ativado.

!! Desligue a Caixa de Controle antes de realizar qualquer modificação no sistema.

!! Verifique se as massas adicionais, discos de inércia, correias estão presas com firmeza, antes de acionar a Caixa de Controle. Repor a cobertura de acrílico no Emulador Industrial após alterações na configuração.

Quanto aos computadores acoplados aos sistemas ECP, pede-se aos alunos que se utilizem dos diretórios em disco alocados para a disciplina `c:\user\ea617\`*turma*, e para que as configurações não sejam prejudicadas, nunca instalem software.

4 Regressão linear e ajustamento de curvas

Nos equipamentos ECP interessa-nos medir posição, velocidade e aceleração dos elementos que compõem a planta eletro-mecânica, sejam estas de natureza translacional ou rotacional. Os equipamentos ECP (vide Fig. 6) incluem *medidores ou transdutores* para essa finalidade na forma de *encoders* ou *sensor óptico*. De forma geral, se x representa a variável a ser medida e y a sua medida produzida pelo medidor, tem-se a seguinte relação geral:

$$y = g(x)$$

onde a função g representa a transformação produzida pelo medidor.

A técnica de *regressão* permite obter um modelo matemático que relaciona as variáveis de entrada com a variável de saída de um processo, o que, no caso dos medidores significa produzir uma estimativa $\hat{g}$ do que seria o valor verdadeiro da relação g. Esta relação poderia ser obtida diretamente das leis físicas que descrevem a dinâmica do sistema. Contudo, quando o conhecimento teórico não é suficiente, ou quando o modelo é complexo, a regressão permite obter os parâmetros de um modelo relacionando as variáveis de entrada e saída envolvidas no medidor.

No nosso caso, a modelagem de processos utilizando regressão procura obter modelos do seguinte tipo:

$$y = a_0 + a_1 * f_1(x) + a_2 * f_2(x) + \ldots + a_k * f_k(x)$$

onde y é a variável de saída do processo (*medidas*), $f_i(x)$ é dado, x é a variável de entrada do processo (*variável a ser medida*) e a_i são os coeficientes do modelo e que devem ser determinados.

Ilustra-se a seguir alguns tipos de função g que podem representar a curva de calibração dos medidores:

$x = a_0 + a_1 y + \frac{a_2}{y} + \frac{a_3}{\sqrt{y}}$ para o *sensor óptico* do MagLev

$y = a_0 + a_1 x$ para os *encoders* das demais plantas

Note que para o sensor óptico de fato estaremos estimando a função inversa g^{-1}, e nos encoders o termo a_0 deve ser muito pequeno, efeito de um erro de medida no ajuste de zero do medidor.

4.1 Método dos mínimos quadrados

Via de regra, em um levantamento experimental, não se dispõe de instrumentos perfeitamente *precisos* para se obter medidas das grandezas envolvidas. No modelamento de dispositivos através de experimentação, é comum a existência de medidas pouco confiáveis. Nessa situação, o *ajuste por mínimos quadrados* é muito útil para se aproximar ou ajustar as medidas realizadas às funções bem conhecidas, podendo-se dessa forma, poder representar com boa precisão o comportamento real do dispositivo em questão.

Pode-se então a partir da observação e dos valores medidos, escolher uma função do tipo polinomial, exponencial, logarítmica, trigonométrica, etc, que se assemelhe, ou que melhor se ajuste à distribuição dos pontos. Uma vez escolhida tal função, deve-se então determinar seus parâmetros baseando-se no critério de que a soma dos quadrados das distâncias das ordenadas dos pontos medidos até as ordenadas dos pontos da curva de ajuste escolhida para as mesmas abcissas seja mínima. O passo inicial então, é obter a *curva de ajustamento* que se adapte ao conjunto de dados, definindo o que será considerado a *função de melhor ajustamento*, isto é, se o ajuste será feito por uma reta, a parábola, exponencial, etc. Essa curva é expressa pela função $y = g(x)$, e é escolhida em geral segundo algum critério físico.

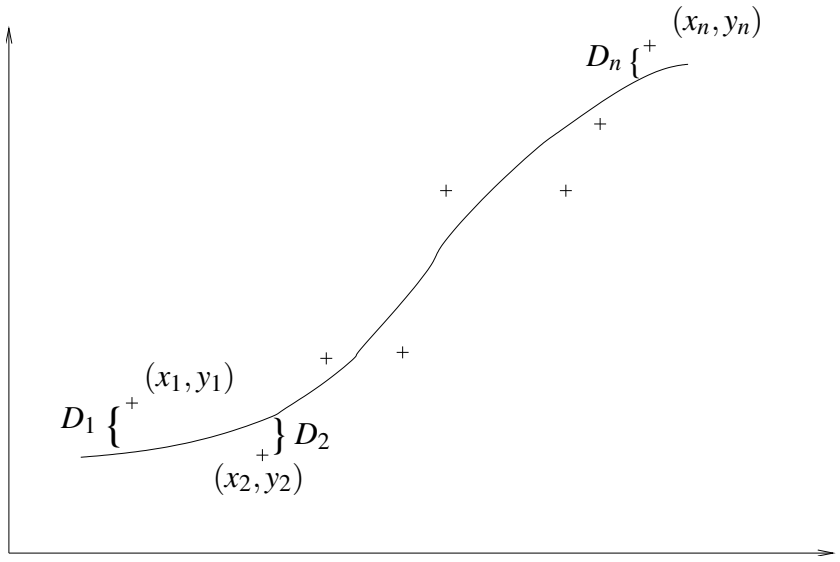

Figura 7: Pontos experimentais e curva ajustada.

Para esta definição, considere a Fig. 7 onde os dados estão representados pelos pontos $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \ldots, (x_n, y_n)$. Para um dado valor de x, por exemplo x_1, haverá uma diferença entre y_1 e o valor correspondente determinado na curva (função g). Conforme indicado na figura, representa-se essa diferença por d_1 , que é, designado como desvio, erro ou resíduo. Analogamente para os valores $x_2, \ldots, x_n$ obtém-se os desvios $d_2, \ldots, d_n$.

Uma medida da *qualidade do ajustamento* da função g aos dados disponíveis é dada pela quantidade $d_1^2 + d_2^2 + \ldots + d_n^2$. Se esta quantidade é pequena, o ajuste é bom, se ele é

elevado. o ajustamento é ruim. Portanto, utiliza-se o critério a seguir para determinação da melhor função.

Critério dos Mínimos Quadrados: De todas as curvas que se ajustam a um conjunto de dados, a que tem a propriedade de apresentar o mínimo valor

$$d_1^2 + d_2^2 + \ldots + d_n^2$$

é denominada a melhor curva de ajustamento. Diz-se que uma curva, que apresenta essa propriedade, ajusta os dados no sentido dos *Mínimos Quadrados* e é denominada *Curva de Mínimos Quadrados.* Em consequência, uma reta que apresenta essa propriedade é denominada reta de mínimos quadrados, uma parábola é denominada parábola de mínimos quadrados, etc.

4.1.1 Estimador dos mínimos quadrados

Dada a função g que corresponde ao ajustamento desejado, a função dos Mínimos Quadrados que ajusta a função g ao conjunto de pontos $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \ldots, (x_n, y_n)$, pode ser desenvolvida a partir das seguintes relações:

$$y = g(x) = a_0 + a_1 f_1(x) + a_2 f_2(x) + \ldots + a_k f_k(x) \tag{1}$$

Definindo os vetores:

$$u = [1 \; f_1(x) \; f_2(x) \; \ldots \; f_k(x))] \tag{2}$$

$$\theta = [a_0 \; a_1 \; \ldots \; a_k]^T \tag{3}$$

Tem-se a representação para (1):

$$y = u\theta$$

Deve-se obter um estimador $\hat{\theta}$ dos parâmetros desconhecidos θ a partir das medidas realizadas. Para tanto vamos supor, conforme descrito acima, que dispomos de n medidas, isto é:

$$\begin{aligned} y_1 &= u_1\theta \\ y_2 &= u_2\theta \\ &\vdots \\ y_n &= u_n\theta \end{aligned}$$

ou em representação matricial,

$$Y = U\theta, \text{ onde } Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, \; U = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix}.$$

O vetor Y é de dimensão $n \times 1$, e a matriz U é de dimensão $n \times (k+1)$. O método dos Mínimos Quadrados foi tratado de forma independente por *Gauss* e *Legendre* e eles diziam que:

> "O valor mais provável de grandezas desconhecidas é o que minimiza a soma dos quadrados da diferença entre o valor medido e o valor calculado, ponderado pelo grau de precisão da medida."

Considere então $\hat{\theta}$ o valor estimado do vetor de parâmetros θ, e define-se

$$\hat{Y} = U\hat{\theta} \tag{4}$$

Seja $\tilde{\theta} = \theta - \hat{\theta}$ e $\tilde{Y} = Y - \hat{Y}$; logo, tem-se que:

$$\tilde{Y} = U\tilde{\theta} \tag{5}$$

A equação (5) é denominada equação do erro. O estimador é obtido minimizando-se:

$$J(\theta) = w(1)\tilde{Y}_1^2 + w(2)\tilde{Y}_2^2 + \cdots + w(n)\tilde{Y}_n^2$$

onde $w(i)$ é a ponderação em cada componente do erro, que é função da precisão da medida.

Esta equação pode ser reescrita usando a forma vetorial como se segue:

$$J(\theta) = \tilde{Y}^T W \tilde{Y} = \|Y - U\hat{\theta}\|_W^2$$

onde $W = \text{diag}(w(1)w(2)\ldots w(n))$. Portanto, para se obter a melhor estimativa no sentido dos mínimos quadrados, deve-se obter $\hat{\theta}$ satisfazendo

$$\begin{aligned} J(\hat{\theta}) = \min_{\theta} J(\theta) &= \min_{\theta} \|Y - U\theta\|_W^2 \\ &= \min_{\theta} [Y^T W Y - 2Y^T W U\theta + \theta^T U^T W U\theta] \end{aligned}$$

Note que $J(\theta)$ é uma função quadrática em θ cujo o mínimo é obtido como o ponto de singularidade dessa função; assim derivando,

$$\left.\frac{\partial J}{\partial \theta}\right|_{\theta=\hat{\theta}} = -2[Y^T W U]^T + 2U^T W U\hat{\theta} = 0$$

que é denominada equação normal. Finalmente,

$$\hat{\theta} = [U^T W U]^{-1} U^T W Y \tag{6}$$

Quando $W = \sigma^2 I$ isto é, $w(i) = \sigma^2$ obtém-se o estimador dos Mínimos Quadrados descrito por

$$\hat{\theta}_{MQ} = [U^T U]^{-1} U^T Y \tag{7}$$

4.1.2 Exemplo de aplicação

Construir uma linha reta que se ajuste aos seguintes dados:

X	1	3	4	6	8	9	11	14
Y	1	2	4	4	5	7	08	09

Utilizando o Método dos Mínimos Quadrados com $y = a_0 + a_1 f_1(x)$, e $f_1(x) = x$ tem-se que os parâmetros são dados por:

$$a_0 = 0.5455, \quad \text{e} \quad a_1 = 0.6364$$

A Fig. 8 ilustra os pontos dados e a reta obtida pelos mínimos quadrados.

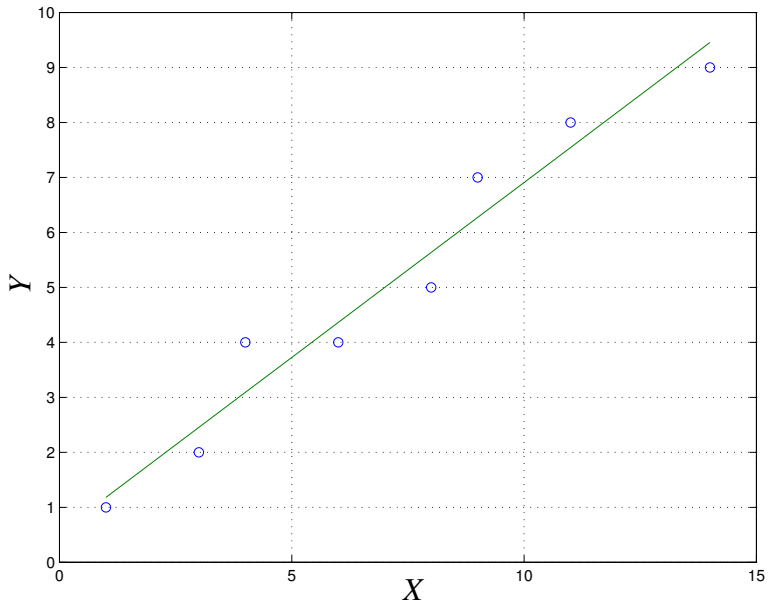

Figura 8: Pontos experimentais e curva ajustada.

4.2 Implementação do Matlab

- O código do Programa em Matlab do exemplo na seção 4.1.2 é dado a seguir.

```
% This script finds the coefficients for the example of
the linear model
Y=[1 2 4 04 05 07 08 09]'; % sensor output
X=[1 3 4 06 08 09 11 14]'; % sensor input
U=[ones(size(X)) X];
theta=U\Y
% Create vector of evaluation points for correction function
X_eval=(1:1:14)';
% Evaluate function at points
Y_eval=[ones(size(X_eval)) X_eval]*theta;
% Plot
plot(X,Y,'o',X_eval,Y_eval,'-'),grid,axis([0 15 0 10])
```

- O comando '\' é chamado `slash` no MATLAB. Para mais informações, na janela de comandos do MATLAB[4], vide
  `>>help slash`

- Na forma empregada no programa exemplo, `U\Y` calcula exatamente a expressão de $\hat{\theta}$ em (7).

[4] o comando `help` ⊡ na janela de comandos do MATLAB dá informações sobre qualquer comando "⊡" conhecido.

- No caso do sensor óptico do Levitador Magnético, adota-se a curva

$$x = g^{-1}(y) = a_0 + a_1 y + \frac{a_2}{y} + \frac{a_3}{\sqrt{y}}$$

onde x é a distância do magneto a bobina (em cm) e y é a saída do medidor (em *counts*). Neste caso adota-se no programa a matriz `U` na forma

```
U=[ones(size(Y)) Y 1./Y 1./sqrt(Y)];
theta=U\X
```

- A divisão `./` é chamada *array division* do MATLAB. Corresponde a divisão elemento por elemento de uma matriz ou vetor. Por exemplo, `1./X` fornece como resultado a matriz com elementos `1/x_{ij}`; `Y.*X` fornece a matriz com elementos `y_{ij}x_{ij}`. Neste caso é preciso que `Y` e `X` tenham exatamente a mesma dimensão.

Referências

[1] Manual for Model 220 – Industrial Emulator/Servo Trainer, ECP, 1995. 2.1

[2] Manual for Model 210/210a – Rectilinear Control System, ECP, 1998. 2.2, 2.2

[3] Manual for Model 205/205a – Torsional Control System, ECP, 1997. 2.3, 2.3

[4] Manual for Model 505 – Inverted Pendulum, ECP, 1994. 2.4

[5] Manual for Model 730 – Magnetic Levitation System, ECP, 1999. 2.5

Roteiro

Parte A – Determinação da Curva Característica dos Medidores

Emulador, Retílineo, Torcional e Pêndulo Para todos esses sistemas são utilizados *encoders* (codificadores ópticos rotacionais) como sensores das variáveis translacionais ou rotacionais. A curva característica teórica para esses medidores tem a forma $y = a_1 x$, porém para acomodar erros de medida adota-se na expressão (1) a forma:

$$y = a_0 + a_1 x$$

Ligue o PC e execute o aplicativo *ECP Executive*. Mantenha o módulo de potência MP desligado. Faça pelo menos cinco medidas de posição (em metros ou em radianos) versus *counts*, utilizando a medida na tela principal do software ECP, e obtenha os parâmetros a_0 e a_1. Conclua, adotando um ganho para o medidor na forma y (counts) $= K_e x$ (m ou rd).

Levitador O levitador magnético utiliza como sensor um sistema de medição de distância baseado num emissor e detetor laser de luz incidente no disco. A curva característica para esses medidores adotada pelo fabricante tem a forma

$$x = a_0 + a_1 y + \frac{a_2}{y} + \frac{a_3}{\sqrt{y}}$$

convencionando y saída do medidor em *counts* e x posição a ser medida em cm.

1. Utilize a montagem com um único magneto, em repouso sobre a bobina inferior. **Atenção:** Esteja de mãos limpas e evite tocar na superfície branca do magneto. Não toque na haste de vidro para não prejudicar o funcionamento do sistema.
2. Ligue o PC e execute o aplicativo *ECP USR-MV Executive*. Entre no **Setup Sensor Calibration** através do menu **Setup**. Selecione **Use Raw Sensor Counts** e **Apply Thermal Compensation**. Selecione **OK** e em seguida **Abort Control**. Ligue o Módulo de Potência para ativar o sensor.
3. Faça as medidas de y (em *counts*) versus posição x (em cm), utilizando a medida na tela principal do software ECP para leitura em counts e os valores de posição:
   0 0,5 1,0 2,0 3,0 4,0 5,0 e 6,0 cm.
4. Obtenha os parâmetros a_0, a_1, a_2 e a_3 do ajuste por mínimos quadrados.

Parte B – Demonstração Auto-Guiada

Um primeiro contato com as funções do *programa executivo* do sistema pode ser realizado seguindo-se os passos da **seção 3.2** do manual do equipamento correspondente, seguindo no máximo até o **Step 7**. Observe que os parâmetros iniciais presentes no arquivo `default.cfg` referem-se a uma determinada configuração da planta mecânica, especificada no manual, devendo-se verificar a montagem antes de se acionar o sistema.

Alguns valores de parâmetros do arquivo default podem diferir dos valores indicados no manual. Adote sempre os valores do arquivo default.

A demonstração auto-guiada deve ser realizada no tempo disponível da aula até que as diferentes funções e *menus* do software estejam sedimentadas.

As informações contidas nesta apostila devem ser complementadas por uma leitura atenta dos quatro primeiros capítulos do manual do equipamento, que deverá ser sempre consultado para maiores detalhes sobre as características do sistema.