

# **PMR2400 – CONTROLE E AUTOMAÇÃO II**

## **EXPERIÊNCIA 2**

### **RESPOSTA TEMPORAL DE SISTEMAS E IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS**

#### **1. INTRODUÇÃO**

Os objetivos desta experiência são observar a resposta temporal de sistemas no domínio do tempo contínuo e realizar a identificação dos parâmetros de um motor elétrico de corrente contínua.

Deseja-se identificar os parâmetros das funções de transferência entre a tensão de entrada do motor e a velocidade angular e entre a tensão de entrada e a posição angular.

A Seção 2 desta apostila apresenta o motor de corrente contínua utilizado nessa experiência, a Seção 3 apresenta uma breve introdução teórica sobre resposta temporal de sistemas contínuos e a Seção 4 apresenta os fundamentos teóricos sobre identificação de sistemas em tempo contínuo. Finalmente a Seção 5 apresenta um roteiro para a parte experimental.

## 2. O MÓDULO DE MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA

### 2.1. Descrição Geral

O Módulo de Motor de Corrente Contínua MS15, Figura 1, possibilita ao usuário a realização de controle em malha fechada de velocidade ou posição. A velocidade e a direção de rotação do motor podem ser controladas ou por um sinal analógico ou por uma modulação de largura de pulso.

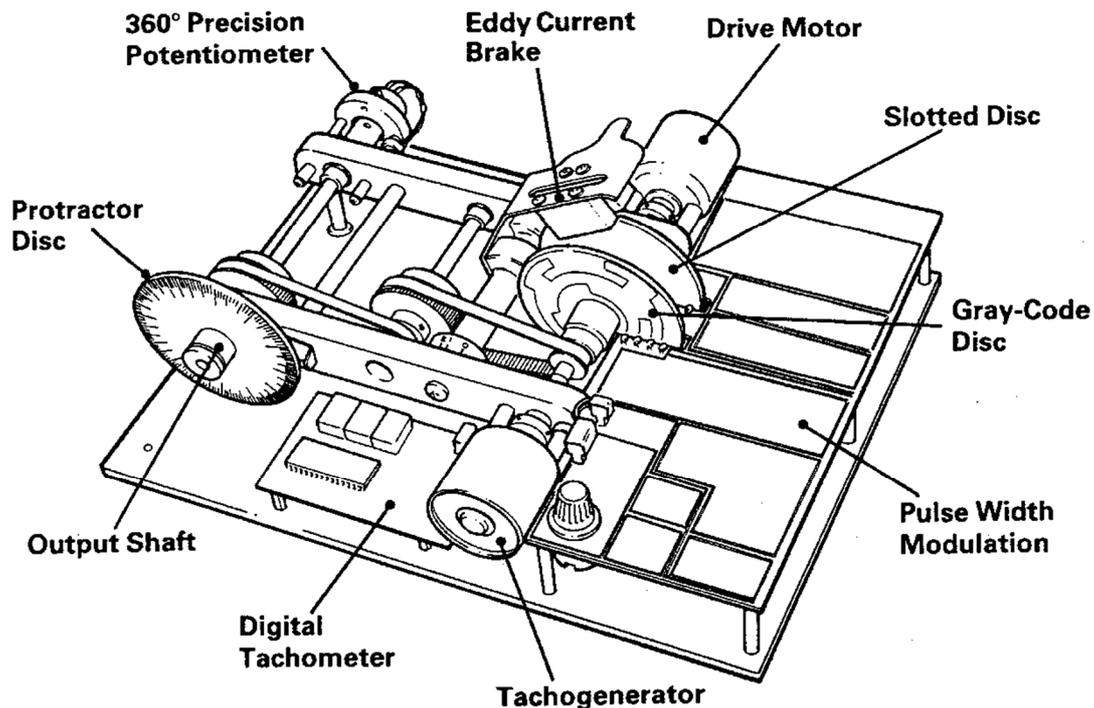


Figura 1. Módulo do motor CC MS15.

As informações de velocidade de rotação e posição para realimentação estão disponíveis tanto na forma analógica quanto na forma digital, portanto o módulo pode ser controlado utilizando um sistema analógico ou digital.

O módulo consiste dos seguintes elementos:

- Motor CC: o motor é capaz de manter rotações de 2.500rpm em ambas as direções. A saída do motor é reduzida através de engrenagens com uma relação 9:1 até o eixo de saída onde existe um disco indicador da posição angular. O módulo possui a possibilidade de ser comandado através de uma entrada analógica,  $V_{IN}$ , ou entrada digital p.w.m.  $P_W$ ;

- Tacogerador: um segundo motor CC impulsionado pelo primeiro motor que fornece uma tensão analógica proporcional à velocidade e direção de rotação. Uma carga variável pode ser aplicada a um motor CC ativando o circuito *Generator Load* (Gerador de Carga). Neste caso a saída do tacogerador,  $V_{OUT}$ , não está disponível;
- Potenciômetro: este potenciômetro é impulsionado pelo eixo de saída e fornece um sinal analógico proporcional à posição angular do eixo de saída;
- Disco com Código *Gray*: um disco de Código *Gray* com 4 bits impulsionado pelo motor CC fornece informações da posição angular do eixo de saída;
- *Slotted Disc*: impulsionado diretamente pelo eixo do motor fornece um pulso de saída a cada revolução do eixo de saída;
- Tacômetro digital: um tacômetro digital fornece, num painel de 3 dígitos, a velocidade angular do eixo de saída. A velocidade é derivada da informação fornecida pelo disco com Código de *Gray*;
- Freio Magnético (*eddy current brake*): um freio magnético de duas posições permite a inserção de diferentes carregamentos ao motor.

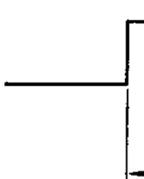
## 2.2. Modos de Operação

- Alimentação: Os requisitos de alimentação para o Módulo são os seguintes:
  - +5V em aproximadamente 400mA;
  - +12V em aproximadamente 0.5 a 0.9A (1.5A com o motor travado);
  - +12V em aproximadamente 0.5 a 0.9A (1.5A com o motor travado).

**OBS: Deve ser garantido que as fontes de alimentação devem ter um Neutro (0V) comum.**

- Chave do Acionamento do Motor:
  - Posição  $V_{IN}$ : seleciona a entrada do acionamento analógico  $V_{IN}$ ;
  - Posição PWM: seleciona a entrada do p.w.m. digital  $P_W$ .

- Chave do tacogerador:
  - Posição  $VOU^T$ : habilita a saída do tacogerador;
  - Posição  $LOAD$ : habilita a carga variável a ser aplicada ao motor por meio do circuito Gerador de Carga.
- Controle do Gerador de Carga: utilizado para variar a carga aplicado ao motor CC quando a chave do tacogerador está na posição  $LOAD$ .
- Entrada para o Acionamento do Motor ( $V_{IN}$ ): a entrada para o acionamento do motor no intervalo  $-5V$  a  $+5V$ , o nível de tensão determina a velocidade e a polaridade determina a direção de rotação:
  - $+5V$  - Velocidade máxima, sentido horário;
  - $0V$  – Estacionário;
  - $-5V$  – Velocidade máxima, sentido anti-horário.
- Habilita a Entrada ( $E$ ): um sinal 0 habilita a entrada  $V_{IN}$  ou PWM, para controlar o motor.
- Entrada PWM ( $P_W$ ): entrada para o sinal digital com modulação de largura de pulso. Formato: um sinal TTL positivo com duração de 1-2ms é requerido e deve ser repetido a cada 20ms.



Largura de Pulso	Velocidade e Direção
1.0ms	Velocidade máxima, sentido anti-horário
1.5ms	Estacionário
2.0ms	Velocidade máxima, sentido horário

Figura 2. Sinal de entrada PWM.

- Saída do Disco com Código *Gray* (D0 a D3): Fornece um sinal TTL de 4 bits dependente da posição do eixo do motor. Uma redução com um relação de 9:1 fornece uma resolução de 2.5o. Portanto o código se repete a cada 40o de rotação. Com 0o marcado no indicador do

disco a saída do Disco é 0000 e o indicador irá como indicado na tabela abaixo no sentido horário:



Marcador (Graus)	Código Gray
0/360	0000
2.5	0001
5.0	0011
7.5	0010
10.0	0110
12.5	0111
15.0	0101
17.5	0100
20.0	1100
22.5	1101
25.0	1111
27.5	1110
30.0	1010
32.5	1011
35.0	1001
37.5	1000
40.0	0000

- Tacogerador: sinal no intervalo de  $-5V$  a  $+5V$  indicando a velocidade e a direção de rotação como indicado na Tabela abaixo:

Velocidade e Direção	Tensão de Saída
Velocidade máxima, sentido anti-horário	$+5V$ aprox..
Estacionário	$0V$
Velocidade máxima, sentido horário	$-5V$ aprox.

- Saída do Potenciômetro ( $V_{OU}^T$ ): sinal de tensão analógica variando entre  $-5V$  a  $+5V$  para uma volta completa do eixo de saída. A saída do potenciômetro é mantida artificialmente em  $5V$  por aproximadamente
- *Slotted Disc* ( $P_0$ ): normalmente em nível lógico '1' com um único pulso t.t.l. de lógica '0' gerado a cada revolução completa do eixo de saída.

### 2.3. Modelagem do Sistema

O sistema pode ser representado pela Figura 3 abaixo.

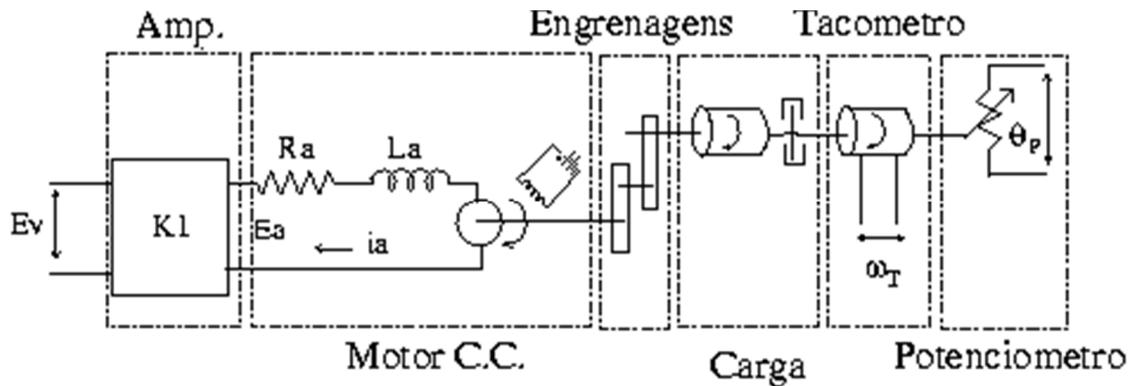


Figura 3. Diagrama esquemático do sistema a ser modelado.

O sistema consiste de um amplificador de tensão, um motor C.C. com um sistema de engrenagens e carga associada, um tacogerador e um potenciômetro. O objetivo da modelagem é estabelecer a função de transferência entre a tensão de entrada  $e_V(t)$  e a velocidade angular fornecida pelo tacômetro  $\omega_T(t)$ , e a função de transferência entre a tensão de entrada  $e_V(t)$  e a posição angular fornecida pelo potenciômetro  $\theta_P(t)$ .

As funções de transferência do amplificador, do tacômetro e do potenciômetro são dadas respectivamente por:

$$G_{AM}^P(s) = K_1 \quad (1)$$

$$G_{TA}^C(s) = K_T \quad (2)$$

$$G_{PO}^T(s) = K_P \quad (3)$$

Para um motor de corrente de campo constante, o torque desenvolvido pelo motor é dado por:

$$T = K_2 i_a \quad (4)$$

Em que  $K_2$  é a constante de torque do motor e  $i_a$  é a corrente da armadura. Se o sinal de corrente  $i_a$  é revertido, o sinal de torque  $T$  também será revertido, o que resultará na reversão da direção de rotação do motor.

Quando a armadura está em rotação, uma tensão proporcional ao produto do fluxo pela velocidade angular  $\omega$  é induzido na armadura. Para um

fluxo constante, a tensão induzida  $e_b$  é diretamente proporcional à velocidade angular  $d\theta/dt$ :

$$e_b = K_3 \frac{d\theta}{dt} = K_3 \omega \quad (5)$$

Em que  $e_b$  é a tensão induzida, também chamada de força contra-eletromotriz;  $K_3$  é a constante de força contra-eletromotriz do motor; e  $\theta$  é o deslocamento angular do eixo de saída do motor.

A velocidade do motor de corrente contínua controlada por armadura é controlada pela tensão de armadura  $e_a$ . A equação diferencial do circuito de armadura é dada por:

$$L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + e_b = e_a \quad (6)$$

Em que  $L_a$  é a indutância da armadura e  $R_a$  é a resistência da armadura.

A equação de equilíbrio de torque no eixo do motor é dada por:

$$J_0 \frac{d^2\theta}{dt^2} + b_0 \frac{d\theta}{dt} = T = K_2 i_a \quad (7)$$

$$\text{ou } J_0 \frac{d\omega}{dt} + b_0 \omega = T = K_2 i_a \quad (8)$$

Em que  $J_0$  é a inércia combinada do motor, carga e engrenagens referida ao eixo do motor e  $b_0$  é o atrito viscoso combinado do motor, carga, e engrenagens referida ao eixo do motor.

Utilizando as Equações (1), (2), (5), (6) e (8), pode-se determinar a função de transferência entre a saída proporcional à velocidade angular fornecida pelo tacogerador  $\omega_T$  e a tensão de entrada  $e_V$ :

$$G_\omega(s) = \frac{\Omega_T(s)}{E_V(s)} = \frac{K_1 K_2 K_T}{(L_a s + R_a)(J_0 s + b_0) + K_2 K_3} \quad (9)$$

Em que  $\Omega_T(s) = \mathcal{L}\{\omega_T(t)\}$ ,  $E_V(s) = \mathcal{L}\{e_V(t)\}$  com  $\mathcal{L}\{.\}$  a Transformada de Laplace.

Utilizando-se as Equações (1), (3), (5), (6) e (7), pode-se determinar a função de transferência entre a saída proporcional à posição angular fornecida pelo potenciômetro  $\theta_p$  e a tensão de entrada  $e_v$ :

$$G_{\theta}(s) = \frac{\Theta_P(s)}{E_V(s)} = \frac{K_1 K_2 K_P}{(L_a s + R_a)(J_0 s + b_0) + K_2 K_3} \quad (10)$$

Em que  $\Theta_P(s) = \mathcal{L}\{\theta_p(t)\}$ .

A Figura 4 apresenta um diagrama de blocos do sistema.

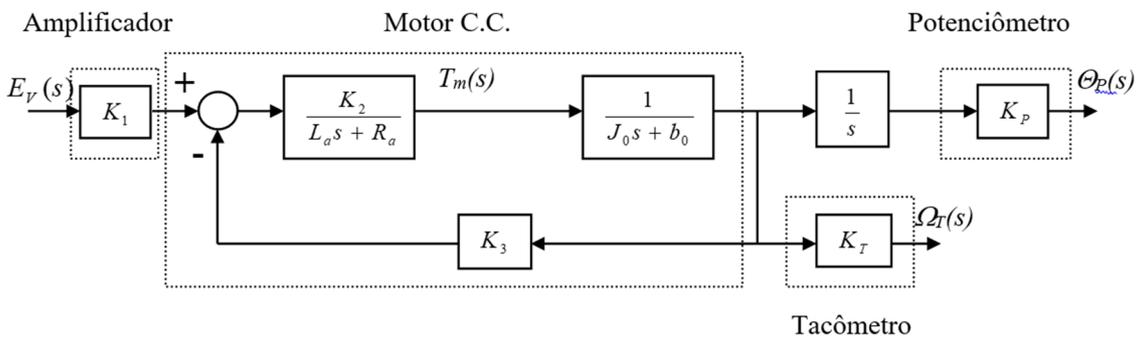


Figura 4. Diagrama de blocos do sistema.

Usualmente, a indutância da armadura  $L_a$  é bastante pequena e pode ser desconsiderada, e as funções de transferência  $G_{\omega}(s)$  e  $G_{\theta}(s)$  podem ser representadas da seguinte forma:

$$G_{\omega}(s) = \frac{\Omega_T(s)}{E_V(s)} = \frac{K_1 K_2 K_T}{R_a (J_0 s + b_0) + K_2 K_3} \quad (11)$$

$$G_{\theta}(s) = \frac{\Theta_P(s)}{E_V(s)} = \frac{K_1 K_2 K_P}{s [R_a (J_0 s + b_0) + K_2 K_3]} \quad (12)$$

As equações acima podem ser rearranjadas, de forma que, para o motor CC, obtemos as seguintes funções de transferência:

$$G_{\omega}(s) = \frac{\Omega_T(s)}{E_V(s)} = \frac{K_{\omega}}{Ts + 1} \quad (13)$$

$$G_{\theta}(s) = \frac{\Theta_P(s)}{E_V(s)} = \frac{K_{\theta}}{s(Ts + 1)} \quad (14)$$

$$K_{\omega} = \frac{K_2 K_T}{R_a b_0 + K_2 K_3}, K_{\theta} = \frac{K_2 K_P}{R_a b_0 + K_2 K_3}, T = \frac{R_a J_0}{R_a b_0 + K_2 K_3} \quad (15)$$

## 2.4. Distúrbios de Torque

Usualmente, o sistema sofre a ação de distúrbios de torque. Esses distúrbios de torque, devem ser considerados para o projeto de um sistema de controle eficiente. A representação do distúrbio de torque  $T_d$  é feita conforme mostra a Figura 5.

O Módulo de Motor de Corrente Contínua MS15 possui um freio magnético (*eddy current brake*) com duas posições. Este freio magnético provoca um torque oposto ao motor CC proporcional à velocidade angular:

$$T_d = K_d \omega(t) \quad (16)$$

Obviamente, esse distúrbio provoca alterações nos parâmetros do sistema.

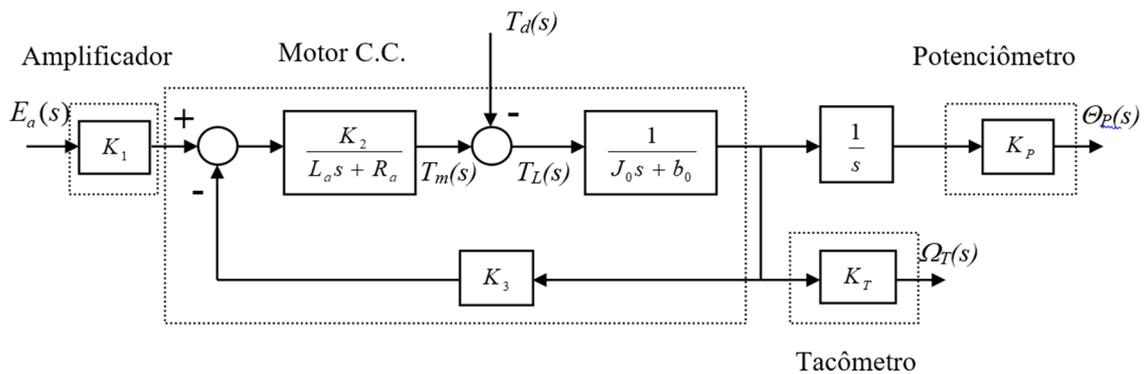


Figura 5. Diagrama de blocos com a representação de distúrbios de torque.

### 3. RESPOSTA TEMPORAL DE SISTEMAS DE 1ª ORDEM

#### 3.1. Sistemas em Tempo Contínuo

Somente como recordação, um sistema de primeira ordem pode ser descrito pela seguinte função de transferência:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = G(s) = \frac{b}{s - a} \quad (17)$$

Em que  $Y(s)$  é a saída do sistema,  $U(s)$  é a entrada do sistema, e  $a$  e  $b$  são coeficientes constantes. O pólo deste sistema está localizado em  $a$  no plano  $s$ . Para um sistema de 1ª ordem é conveniente definir uma constante de tempo e um ganho. A constante de tempo e o ganho do sistema estão relacionados com os coeficientes  $a$  e  $b$ , sendo que a constante de tempo é dada por  $-1/a$  e o ganho por  $-b/a$ . É fácil de observar que os coeficientes  $a$  e  $b$ , ou o ganho e a constante de tempo do sistema bastam para se determinar este sistema de forma única.

Em termos da constante de tempo,  $T$ , e ganho,  $K$ , a função de transferência do sistema é dada por:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = G(s) = \frac{k}{Ts + 1} \quad (18)$$

A equação diferencial equivalente à função de transferência da equação (17) é dada por:

$$\frac{dy(t)}{dt} = ay(t) + bu(t) \quad (19)$$

A resposta temporal desse sistema à uma entrada conhecida  $u(t)$ , com condição inicial  $y_0(t)$ , é dada pela seguinte expressão:

$$y(t) = y_0 e^{at} + \int_0^t e^{a\tau} bu(t - \tau) d\tau \quad (20)$$

Nesta expressão, o primeiro termo do lado direito é a resposta do sistema devido à condição inicial diferente de zero (resposta homogênea) e o segundo termo do lado esquerdo é a resposta forçada do sistema, ou seja, devido à entrada.

É conhecido e também fácil de ser observado pela equação (20) que a estabilidade do sistema está relacionada com o coeficiente  $a$ , ou seja:

$$\begin{cases} a < 0 & \text{sistema estavel} \\ a = 0 & \text{sistema marginalmente estavel} \\ a > 0 & \text{sistema instavel} \end{cases}$$

Se a condição inicial for igual a zero e a entrada for uma degrau unitário, ou seja,  $U(s) = 1/s$ , a resposta temporal deste sistema será dada por:

$$y(t) = \frac{b}{a}(e^{at} - 1) \quad (21)$$

A Figura 6 apresenta a resposta de um sistema de 1ª ordem à uma entrada na forma de degrau unitário.

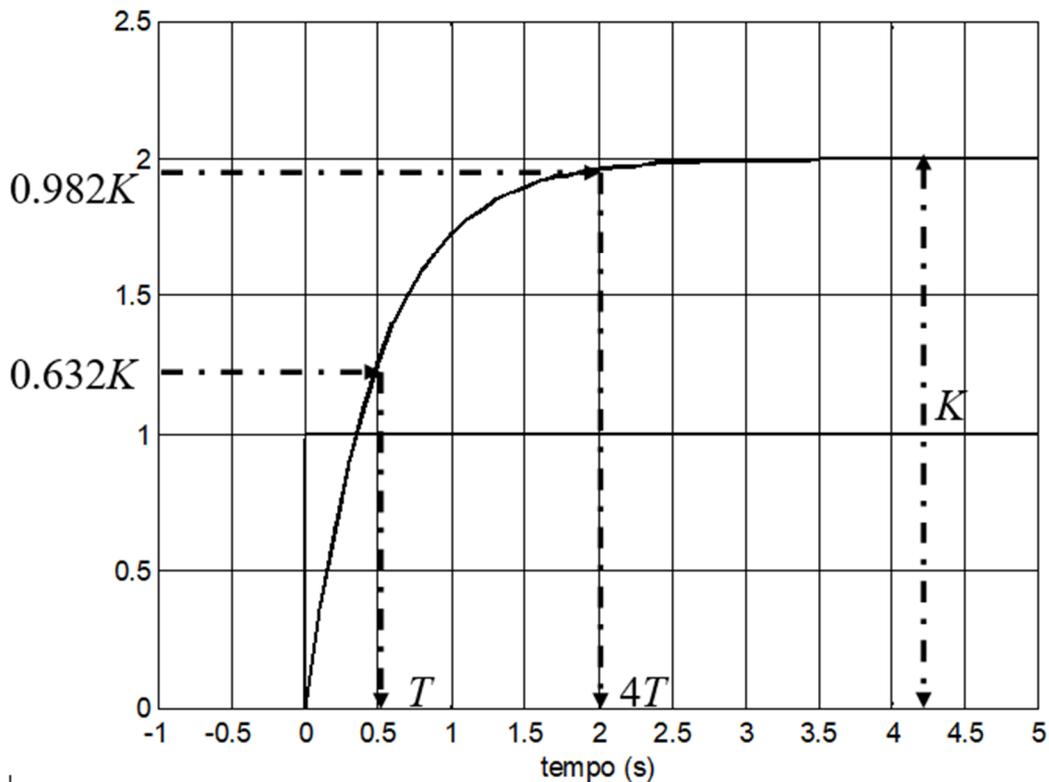


Figura 6. Resposta temporal de um sistema de 1ª ordem devido à uma entrada na forma de degrau.

#### 4. IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS

O processo de identificação de sistemas consiste na abordagem experimental da modelagem de sistemas. O processo de identificação de sistemas incluiu as seguintes etapas:

- Planejamento experimental;
- Seleção da estrutura do modelo;
- Estimativa dos parâmetros;
- Validação.

Nesta experiência você estará identificando o modelo do motor CC descrito na Seção 2 de duas formas diferentes:

1. Utilizando a resposta temporal do sistema em tempo contínuo, a partir do conhecimento do sistema obtido na modelagem do mesmo (Seção 2) é possível calcular as constantes da função de transferência do sistema em tempo contínuo;
2. Utilizando a resposta temporal do sistema amostrado, a partir de uma estrutura do modelo obtida pelo conhecimento do mesmo, ajusta-se um modelo a esta resposta e assim calcula-se os coeficientes da função de transferência em tempo discreto do sistema.

Cada uma destas abordagens tem as suas vantagens e desvantagens. A abordagem em tempo contínuo exige um conhecimento detalhado do sistema e entradas de forma bem específicas. Contudo, os parâmetros identificados têm um significado físico bem definido, permitindo assim uma fácil avaliação do modelo obtido. Além disso, a utilização do modelo pode ser estendida para condições diferentes das utilizadas para a identificação. A abordagem em tempo discreto exige apenas que se conheça a ordem do modelo e tem a grande vantagem de não necessitar de entradas com formas bem definidas. Contudo o significado físico dos parâmetros do modelo obtido é difícil de ser determinado, dificultando, assim, uma avaliação precisa do modelo e exigindo uma validação extensiva do modelo para permitir a sua aplicação em condições diferentes das quais o modelo foi obtido.

#### 4.1. Identificação dos Parâmetros do Motor em Tempo Contínuo

Como visto na Seção 2, a função de transferência entre a tensão de entrada no motor e a velocidade angular do Motor CC pode ser descrita pela seguinte expressão de 1ª ordem:

$$G_{\omega}(s) = \frac{\Omega_T(s)}{E_V(s)} = \frac{K_{\omega}}{Ts + 1} \quad (22)$$

Os valores de  $K_{\omega}$  e  $T$  podem ser obtidos experimentalmente através da análise da resposta a um degrau de amplitude  $A$ , cuja Transformada de Laplace é dada por:

$$E_V(s) = \frac{A}{s} \quad (23)$$

$$\Omega_T(s) = \frac{K_{\omega}}{Ts + 1} \cdot \frac{A}{s} \quad (24)$$

A resposta no tempo para  $\omega_T(t)$  é dada por:

$$\omega_T(t) = AK_{\omega} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \quad (25)$$

Calculando o valor de  $\omega_T(T)$ ,  $\omega_T(2T)$ ,  $\omega_T(3T)$  e  $\omega_T(4T)$  obtém-se:

$$\omega_T(T) = 0,632AK_{\omega}, \omega_T(2T) = 0,865AK_{\omega}, \omega_T(3T) = 0,950AK_{\omega} \text{ e } \omega_T(4T) = 0,982AK_{\omega}$$

Com um degrau de amplitude  $A$  na entrada do sistema, o valor final da saída é igual ao produto  $AK_{\omega}$ . A constante de tempo  $T$  pode ser determinada através da relação  $\omega_T(T) = 0,632AK_{\omega}$  ou pode-se também determinar o valor de  $T$  através do valor de  $\omega_T(t)$  calculado para múltiplos de  $T$ , como por exemplo:  $\omega_T(4T) = 0,982AK_{\omega}$ . A Figura 7 ilustra como obter os parâmetros do motor CC.

Como visto na Seção 2, a função de transferência entre a tensão de entrada e a posição angular do motor CC pode ser dada pela seguinte expressão de 2ª ordem:

$$G_{\theta}(s) = \frac{\Theta(s)}{E_V(s)} = \frac{K_P}{s(Ts + 1)} \quad (26)$$

Os valores de  $K_{\theta}$  e  $T$  podem ser obtidos experimentalmente através da análise da resposta do sistema a um degrau com amplitude  $A$ , ou seja:

$$\Theta_P(s) = \frac{K_P}{s(Ts + 1)} \cdot \frac{A}{s} \quad (27)$$

A resposta no tempo para  $\theta_P(t)$  é dada por:

$$\theta_P(t) = AK_P \left( t - T + Te^{-\frac{t}{T}} \right) \quad (28)$$

Para  $t \rightarrow +\infty$ , ou seja, em regime estacionário, a resposta no tempo pode ser dada por:

$$\theta_P(t) = AK_P(t - T) \quad (29)$$

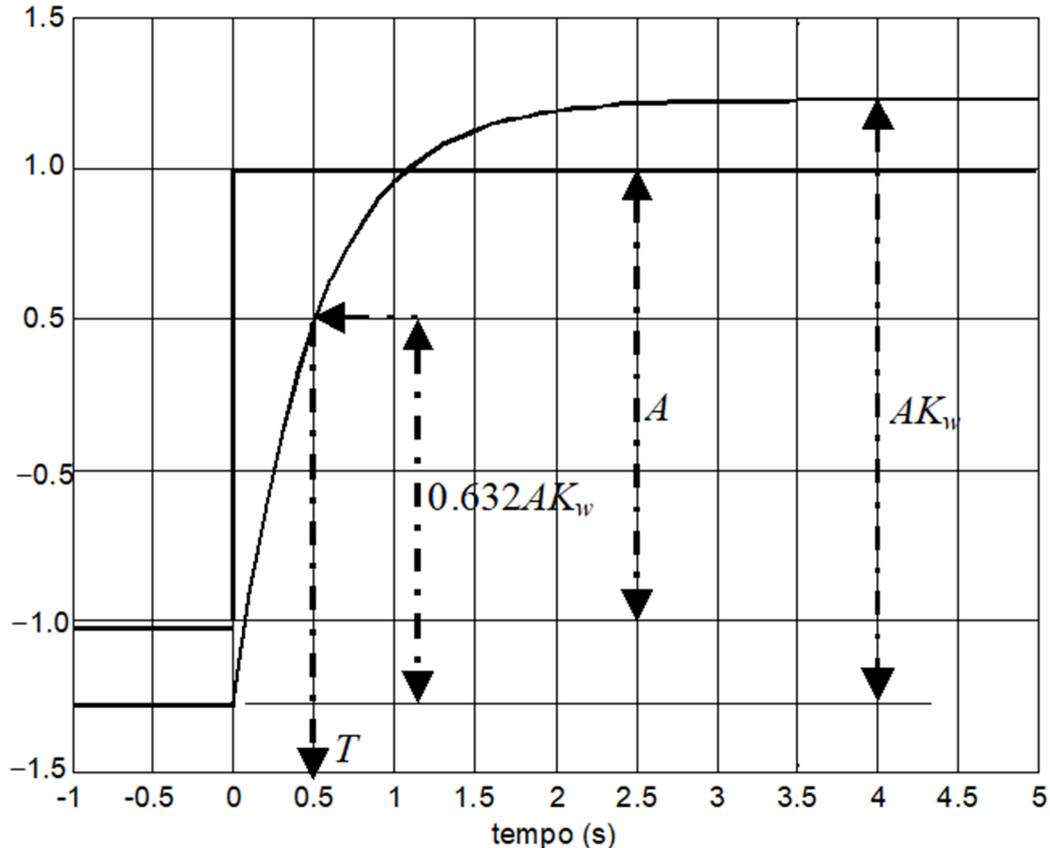


Figura 7. Obtenção dos parâmetros da função de transferência de 1ª ordem do motor CC.

Para se determinar a constante de tempo  $T$ , é necessário calcular para o regime estacionário qual a distância no eixo de tempo, para um mesmo valor de ordenada, entre a função  $\theta_p(t)$  e uma função do tipo dada por:

$$g(t) = AK_p t \quad (30)$$

Note que a função  $g(t)$  e  $\theta_p(t)$  são paralelas para  $t \rightarrow +\infty$ , como mostra a Figura 8. Comparando as Equações (29) e (30) nota-se que:

$$\theta_p(t) = g(t - T) \quad (31)$$

Ou seja, para  $t \rightarrow +\infty$  e para um mesmo valor de ordenada as duas funções estão separadas por um tempo equivalente a  $T$ .

Para se determinar o valor de  $K_p$  pode-se calcular para um determinado instante de tempo,  $t$ , após o transitório atingir o regime estacionário:

$$g(t) - \theta_p(t) = AK_p t - AK_p(t - T) = AK_p T \quad (32)$$

A derivada da curva pode então ser calculada como:

$$\alpha = \frac{AK_p T}{T} = AK_p \quad (33)$$

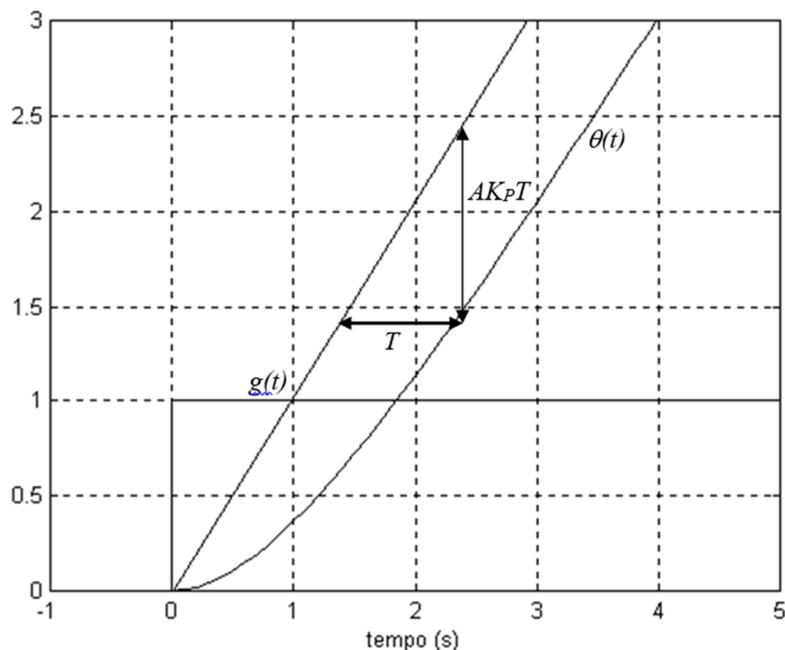


Figura 8. Obtenção dos parâmetros da função de transferência de 2ª ordem do motor CC.

## 5. PARTE EXPERIMENTAL

### 5.1. Identificação do Modelo do Motor CC no Domínio do Tempo Contínuo: Metodologia

Nessa parte da experiência o objetivo será levantar os parâmetros  $K_\omega$ ,  $K_\theta$  e  $T$ , que definem os modelos em tempo contínuo:

$$G_\omega = \frac{K_\omega}{Ts + 1} \text{ e } G_\theta = \frac{K_\theta}{s(Ts + 1)}$$

#### MONTAGEM DO APARATO EXPERIMENTAL

O motor CC e os equipamentos necessários, tais como fonte, gerador de funções e computador, devem ser montados conforme mostra a Figura 9.

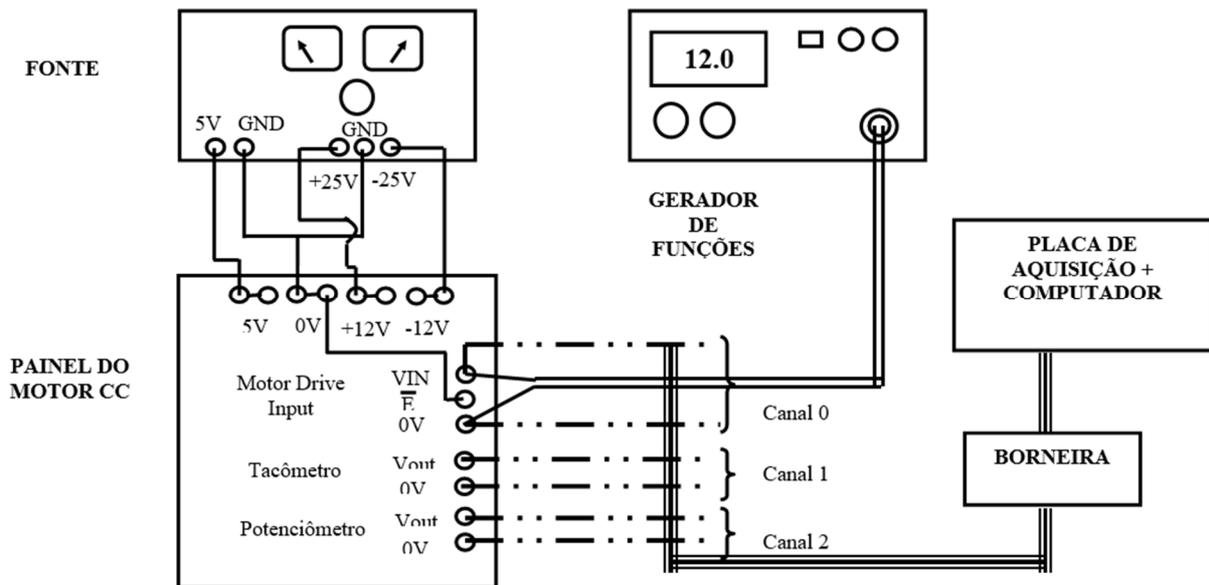


Figura 9. Esquema das conexões elétricas para o experimento.

Como visto, os equipamentos que devem ser utilizados são os seguintes:

1. Microcomputador;
2. Sistema de Aquisição de Dados;
3. Gerador de Funções;
4. Fonte;
5. Módulo de Motor CC.

**OBS: todos os equipamentos já devem estar montados. Caso não estejam, solicite a ajuda do professor.**

#### *SOFTWARE*

Você deve utilizar o software **aquisicao3canaisV2.m**, similar ao utilizado na experiência 1.

#### *CANAIS UTILIZADOS*

Será necessário a utilização de três canais de aquisição:

- CANAL 0: sinal de entrada da planta (saída do gerador de funções);
- CANAL 1: saída do sinal do tacogerador;
- CANAL 2: saída do potenciômetro;

Os dados são armazenados na variável **data** (matriz de 3 colunas).

Coluna 1 = Canal 0

Coluna 2 = Canal 1

Coluna 3 = Canal 2

OBS: No MATLAB matrizes não possuem linha 0 ou coluna 0.

#### *ENSAIO SEM FREIO MAGNÉTICO*

Neste item você deve realizar experimentos para determinar os parâmetros  $K_\omega$ ,  $K_\theta$  e  $T$  injetando uma onda quadrada no motor. Para isso, é muito importante a escolha de três parâmetros:

- A frequência de amostragem;
- A frequência ou período da onda quadrada a ser gerada pelo gerador de funções;
- Amplitude da onda quadrada.

Qual o valor que deve ser escolhido? Obviamente, a frequência da onda quadrada deve ser tal que o tempo equivalente ao meio período seja suficientemente grande para que a resposta do motor ao degrau atinja o regime

estático. A frequência de amostragem deve ser o suficientemente grande para que os pontos adquiridos possam produzir um gráfico adequado. Você pode estabelecer a frequência de amostragem baseado no número de pontos que você deseja para período da onda quadrada.

O sinal produzido pelo tacogrador é bastante consistente de tal forma que os parâmetros  $K_\omega$ , e  $T$  podem ser obtidos a partir do gráfico da velocidade angular fornecida pelo tacômetro de maneira bastante simples. Já o sinal produzido pelo potenciômetro não é totalmente consistente como pode ser observado na Figura 10 onde um exemplo de aquisição de dados do Motor CC é mostrado. Pode-se observar que a constante de tempo  $T$  e o ganho da malha de posição  $K_\theta$  não podem ser determinados de maneira simples através do gráfico do sinal de posição fornecido pelo potenciômetro rotativo. O valor de tensão do potenciômetro rotativo retorna ao valor inicial a cada 360 graus. Desta forma, torna-se necessário realizar uma montagem dos diversos segmentos de reta durante um degrau de entrada para se tornarem um único segmento de reta. Note que o degrau negativo é mais coerente com uma resposta equivalente a um polinômio de 2º Grau.

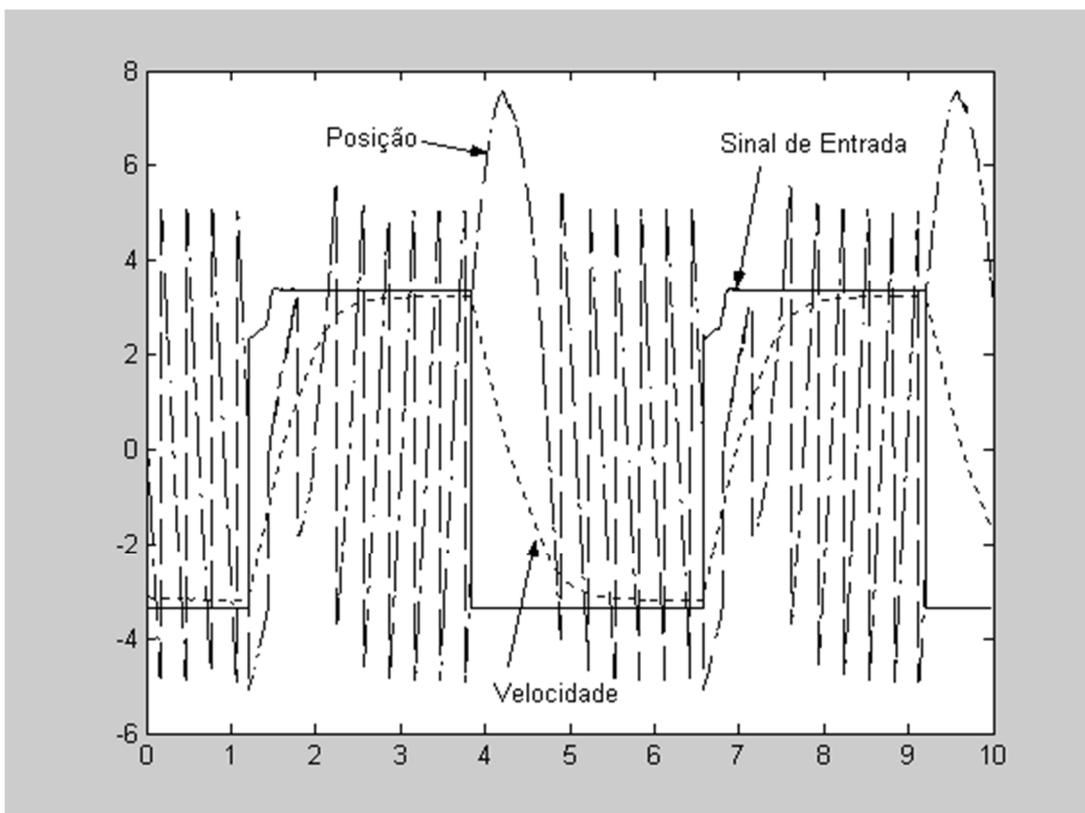


Figura 10. Exemplo de sinais adquiridos do motor CC.

Lembre-se que o método para calcular os ganhos das funções de transferência da velocidade e da posição  $K_\omega$ ,  $K_\theta$  foi desenvolvido na Seção 4.1 utilizando a hipótese de que o sistema é submetido a um degrau de amplitude  $A$ .

### *SIMULAÇÃO*

Após a identificação do modelo você deve realizar simulações para verificar o seu desempenho, ou seja, verificar se o modelo é capaz de fornecer resultados satisfatórios.

Esta simulação será realizada com a mesma tensão de entrada utilizada para gerar os transitórios no sistema real. Assim, utilizando a tensão de entrada no motor amostrada, que deve estar em uma das colunas da matriz de dados *data*, simule o modelo em tempo contínuo para obter a estimativa da velocidade angular. Após isso, faça um gráfico com a velocidade angular calculada pelo modelo e a velocidade angular real amostrada. Para isso você pode usar os seguintes comandos do MATLAB:

```
% Parametros
Kw=1;          % Ganho do sistema
T=0.5;        % Constante de tempo
fa=100;       % Frequencia de amostragem
%
Ta=1/fa;      % Intervalo de amostragem
num=[Kw];    % Coeficientes do polinomio do numerador em ordem
descrescente
den=[T 1];   % Coeficientes do polinomio do denominador
sys=tf(num,den) % Definicao da funcao de transferencia
% Omega(s)/E(s) = Kw/(Ts+1)
%
% data(:,1) - vetor de tensao de entrada (Onda quadrada)
% data(:,2) - vetor de velocidade angular medido
% data(:,3) - vetor de posicao angular
n=length(data); % devolve a maior dimensao da matrix data
t=0:Ta:(n-1)*Ta; % cria uma base de tempo comecando do tempo 0
omegat=lsim(sys,data(:,1),t); % vetor de velocidade angular estimado
% simulacao do sistema considerando o sistema sys1, o vetor de
entradas
% data(:,1) - onda quadrada e a base de tempo dada por t

% grafico da velocidade angular medida e a estimada
plot(t,data(:,2),t,omegat,'o');grid
xlabel('Tempo (s)');
ylabel('Velocidade angular (rad/s)');
legend('Dados experimentais','Resultados do modelo');
```

Esse script pode ser facilmente adaptado para a simulação da posição angular.

## ENSAIO COM FREIO MAGNÉTICO

O módulo MS15 possui um freio magnético (eddy current brake) com duas posições em que o freio está ativo. Com o mecanismo totalmente levantado o freio não possui atividade (mecanismo levantado). Na posição 1 o freio possui atividade parcial e na posição 2 o freio possui atividade máxima (mecanismo totalmente abaixado).

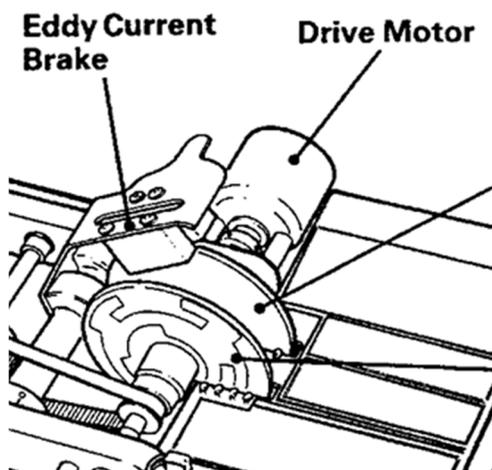


Figure 11 Detalhe do freio magnético.

### 5.2. Roteiro experimental

#### ENSAIOS SEM FREIO MAGNÉTICO

Utilize três diferentes amplitudes de tensão  $A$  para a onda quadrada, por exemplo 1 Volt (i.e. 2 Volts pico a pico), 2 Volts e 3 Volts. Para cada uma dessas amplitudes de tensão  $A$  e estime graficamente os parâmetros  $K_\omega$  e  $T$  para a função de transferência de velocidade  $G_\omega(s)$ . Utilize uma tabela como indicado abaixo.

$A$ (Volts)	$K_\omega$	$T$
1		
2		
3		

Para estimar graficamente você provavelmente precisará utilizar somente uma parte da matriz `data(n1:n2)` contendo alguns ciclos da onda quadrada. Imprima os gráficos utilizados para tais estimativas.

Comente e analise as eventuais discrepâncias de tais estimativas.

Apresente em um mesmo gráfico as curvas simuladas e amostradas da velocidade do motor para cada um dos valores de amplitude  $A$ . Comente e analise as diferenças entre os resultados da simulação e os dados experimentais.

Para os mesmos conjunto de dados utilizados para a função de transferência de velocidade  $G_\omega(s)$  estimar os parâmetros  $K_\theta$  e  $T$  da função de transferência de posição  $G_\theta(s)$ . Utilize uma tabela como indicado abaixo.

$A$ (Volts)	$G_\theta(s)$	$T$
1		
2		
3		

Para estimar graficamente os parâmetros será útil utilizar régua e transferidor para traçar retas paralelas. Note que o ciclo negativo da onda quadrada possui uma melhor situação para a estimativa pois o trecho transitório se aproxima bastante de uma função de 2ª. ordem.

Imprima os gráficos utilizados para tais estimativas. Comente e analise as eventuais discrepâncias de tais estimativas.

Apresente em um mesmo gráfico as curvas simuladas e amostradas da posição do motor para cada um dos valores de amplitude  $A$ . Comente e analise as diferenças entre os resultados da simulação e os dados experimentais.

#### ENSAIOS COM FREIO MAGNÉTICO

Para as duas posições ativas do freio magnético estimar graficamente os parâmetros  $K_\omega$  e  $T$  para a função de transferência de velocidade  $G_\omega(s)$ . Utilizar

uma amplitude de tensão  $A = 3Volts$  (6Volts pico a pico). Utilize uma tabela como indicado abaixo.

Posição do freio	$K_{\omega}$	$T$
1		
2		

Imprima os gráficos utilizados para tais estimativas.

Comente e analise os resultados obtidos.

### Observações:

- A partir da Exp 2 todos os resultados obtidos e conjunto de dados utilizados devem ser guardados pois as experiências seguintes dependem dessas informações. Você deve Scanear (através de algum aplicativo de celular) ou tirar fotos do relatório de cada aula. Armazenar relatório e dados na nuvem USP.
- Anotar no relatório o no. do motor utilizado. Em todas as experiências você deve utilizar o mesmo motor.