

## Experiência 4

# Controle no Domínio da Frequência – Compensador I-Avanço –

## Introdução

O projeto no domínio da frequência é interessante para processos complexos, em que um modelo paramétrico (polos, zeros e ganho) não pode ser facilmente obtido. Neste caso é prático obter a resposta em frequência. Para obter a resposta no domínio  $\omega$  (diagrama de Bode), basta aplicar sinais senoidais e medir módulo e fase em regime permanente.

Características “difíceis” de modelar, como o atraso e dinâmicas rápidas desprezadas no modelo paramétrico (e.g., filtro passa baixas do kit impressora) são adquiridas *implicitamente*. Ruídos de medida e sinais de perturbação, prejudicam, naturalmente, esta (e qualquer outra) metodologia experimental. Sistemas instáveis ou criticamente estáveis, não podem caracterizados diretamente. É necessário estabilizá-los antes, fechando a malha, como ilustrado na Fig. 1. Medem-se os sinais senoidais em  $u$  e em  $y$  para obter  $G(j\omega)$ . A Figura 2 ilustra a diferença entre um diagrama de Bode teórico e o correspondente diagrama de Bode obtido experimentalmente do kit impressora. Apenas a Margem de Fase e o Coeficiente de erro são relevantes para o projeto.

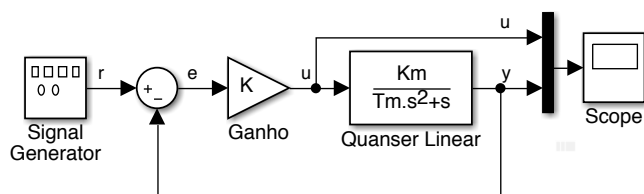


Fig. 1 – Operação em Malha Fechada para obtenção da resposta em frequência  $Y(s)/U(s)$ .

**Obs:** Como a obtenção *experimental* de  $G(j\omega)$  é demorada e o objetivo deste experimento é o projeto do controlador, será utilizado o diagrama de bode obtido de  $G_l(s)$  e  $G_r(s)$  dos kits lineares e rotacionais da Quanser (ver seção 2).

## 1 - Objetivo

O objetivo deste experimento é projetar um controlador no domínio da frequência para que especificações de Margem de Fase (MF) e Erro em Regime Permanente sejam atendidas. Os kits lineares e rotacional da Quanser serão utilizados no experimento. O controlador I-Avanço será implementado em Simulink e através da interface Quarc será feita a conexão com o processo real.

**Especificações de projeto** ( $p=l$ , processo linear;  $p=r$ , processo rotacional):

- Controle em malha fechada da velocidade do servo linear/rotacional, ( $x_d$  na Fig.3);
- Erro de velocidade do processo “aumentado”  $K_c G_p(s)/s$ ,  $e_{ss} \leq 0,0125$ ;
- Margem de Fase =  $85^\circ$ .

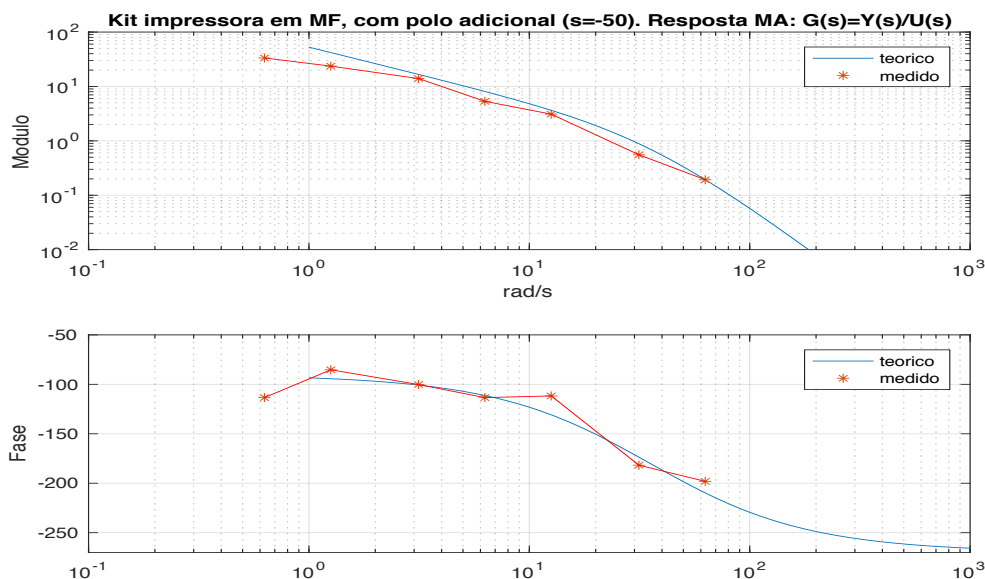


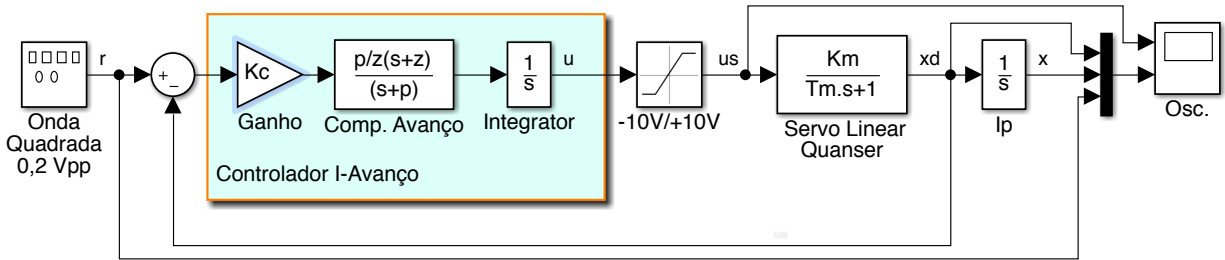
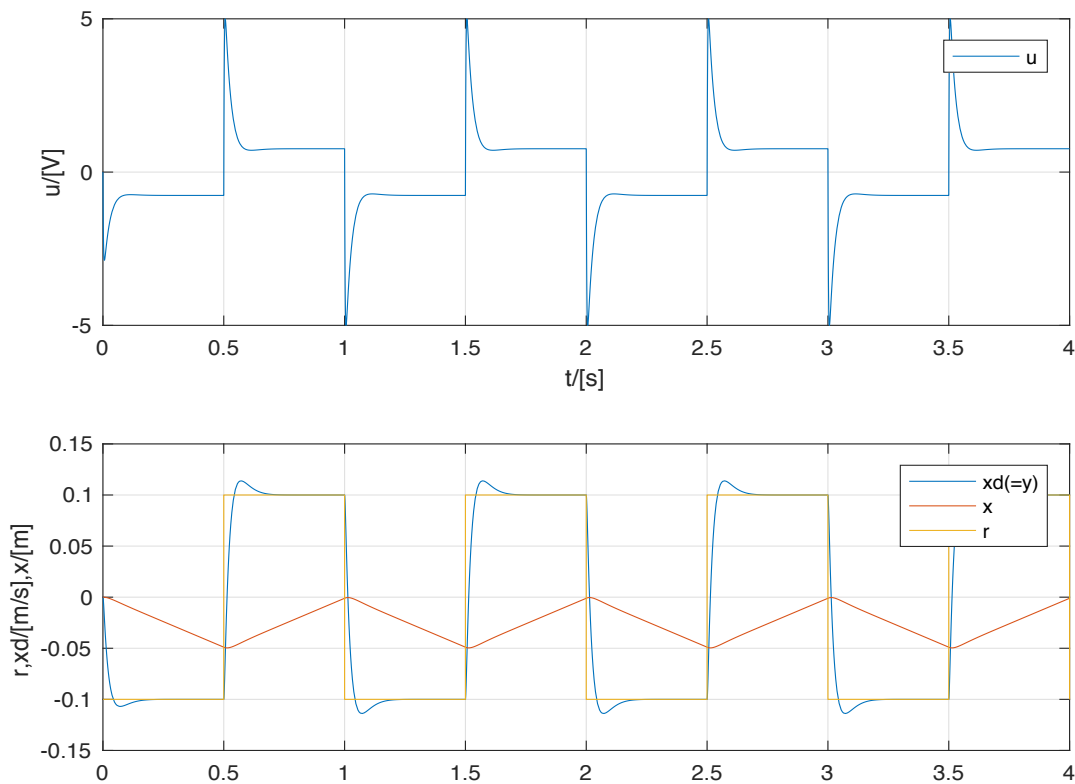
Fig. 2 – Comparação de diagrama de Bode teórico e experimental (Apenas ilustrativo - não será utilizado no LabCDin4). Notar a dificuldade (SNR) de se adquirir sinais em baixas frequências (o ganho é muito alto  $\Rightarrow u \downarrow$ ) e em altas frequências (o ganho é muito baixo  $\Rightarrow y \downarrow$ ).

## 2 - Controle de velocidade do Servo Linear Quanser<sup>©</sup>

Neste experimento a variável controlada será a velocidade do servo linear/rotacional da empresa Quanser<sup>©</sup>. O canal Integral do compensador garante seguimento com erro nulo da velocidade de referência, enquanto a rede em avanço melhora a margem de fase, reduzindo o sobrepasso percentual e aumentando a banda passante. O projeto do compensador em avanço deverá ser feito no domínio- $\omega$  já considerando o integrador. Trace para tanto o diagrama de Bode de  $G_p(s)/s$ , ( $p=l$  ou  $r$ , respectivamente) a partir das seguintes funções fornecidas pela Quanser:

$$\text{Linear:} \quad G_l(s) = \frac{K_l}{\tau_l s + 1}; \quad K_l = 0,13134; \quad \tau_l = 0,08163.$$

$$\text{Rotacional:} \quad G_r(s) = \frac{K_r}{\tau_r s + 1}; \quad K_r = 0,28; \quad \tau_r = 0,065.$$

Fig. 3 – Controle I-avanço da velocidade do servo linear da Quanser<sup>©</sup>.Fig. 4 – Simulação do Controle I-avanço da velocidade do servo linear da Quanser<sup>©</sup>.

### 3 - Pré-Relatório

Utilizando o diagrama de Bode  $G_p(s)/s$ , projete o compensador em avanço  $D_{av}(s) = K_c \frac{p}{z} \frac{s+z}{s+p}$ .

- 1) Ajuste o ganho  $K_c$  para atender  $e_{ss}$ . Simule o kit só com o controlador Proporcional ( $K_c$ ).
- 2) Calcule o avanço de fase para que  $MF = 85^\circ$ . Acrescente uma tolerância de  $5^\circ$ .
- 3) Obtenha a frequência  $\omega_m$ , a frequência central da rede em avanço. Procedimento: Busque a posição no diagrama de Bode em que o ganho do compensador zera a queda em ganho do processo (produzindo assim 0 dB, a posição em que se mede MG e  $\omega_m$ ).
- 4) Calcule a posição do zero e do polo do compensador em avanço.
- 5) Ajuste o ganho da rede em avanço (p/z) para que não se altere  $e_{ss}$  obtido em 1)
- 6) Simule o kit com controle I-avanço. Em particular, verificar se não há saturação de  $us$ .

## 4 - Procedimento experimental

Os seguintes procedimentos deverão ser seguidos neste experimento:

- 1) Conecte o kit linear (rotacional) conforme instruções da Quanser, controlador P ( $K_c$ ).
- 2) Altere o diagrama de blocos, para que se salve, também, a posição do carro/angular.
- 3) Salve as formas de onda, controlador P ( $K_c$ ). (structure with time no Osciloscópio).
- 4) Implemente o controlador I-avanço projetado em Simulink.
- 5) Verifique a resposta do sistema e compare com a resposta simulada.
- 6) Salve as formas de onda, controlador I-Avanço.

Para agilizar a realização do experimento, utilizem scripts MATLAB com os cálculos de projeto. Assim, se houver necessidade, os cálculos podem ser rapidamente refeitos. Esta é, por exemplo, a situação, caso ocorra saturação significativa de  $u$ .

## 5 - Relatório

Lembre-se de incluir:

- Gráficos dos sinais adquiridos.
- Projeto e valores calculados no pré-relatório.
- Preencha a tabela 1 e compare criticamente os valores medidos e calculados.

Tabela 1 – Comparação dos controladores projetado e obtido experimentalmente.

	Controlador			r to y (r quadrada) - Simulação					r to y (r quad.) - Experimento				
Projeto	$K_c$	$z$	$p$	$M_p$	$t_p$	$t_{s2\%}$	$e_{ss}$	$u_{\max}$	$M_p$	$t_p$	$t_{s2\%}$	$e_{ss}$	$u_{\max}$
P													
I-Avanço													

Questões:

- Por que não fazer o controle de posição linear/rotacional dos kits Quanser?
- Na simulação a posição do carro segue uma onda triangular. O que acontece no experimento? Por quê? (Nota-se algum “drift”?).
- Todo o processamento digital envolvido no kit Quanser produz um atraso. Se este fosse significativo que efeito haveria em relação ao sobrepasso,  $M_p$ ?