Engenharia de Controle e Automação

Controle Preditivo

Prof. Dr.
Paulo J. D. O. Evald

Prof. Dr.
Paulo J. D. O. Evald

Centro de Engenharias
Sala 211

paulo.evald@ufpel.edu.br

Objetivos da aula:

- Receding Horizon Control
  - Formulação;
  - Implementação;
  - Simulação.

Receding Horizon Control

Embora o vetor de parâmetro ótimo ΔU contenha as ações de controle $\Delta u(k)$, $\Delta u(k+1)$, $\Delta u(k+2)$, . . ., $\Delta u(k+N_c-1)$, com o princípio do *Receding Horizon Control (RHC)*, implementa-se apenas a primeira amostra desta sequência, ou seja, $\Delta u(k)$;

No próximo período de amostragem, a medida mais recente é tomada para formar o vetor de estado $x(k+1)$ para cálculo da nova sequência do sinal de controle;

Este procedimento é repetido em tempo real com intuito de otimizar a ação de controle baseado na estimação do comportamento do sistema em malha fechada.

Receding Horizon Control

Lembrando que

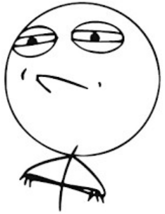
$$\Delta U = (\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} \Phi^T (R_s - F x(k_i))$$

e

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$$

Receding Horizon Control

Simulação



Receding Horizon Control

Implementar um RHC para a seguinte planta discreta

$$x_m(k+1) = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} x_m(k) + \begin{bmatrix} 0.5 \\ 1 \end{bmatrix} u(k)$$
$$y(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} x_m(k).$$

Considerando um horizonte de controle Nc = 4, um horizonte de predição Np = 20 e rw= 0,1;

Assuma que as condições iniciais são nulas e a referência é um degrau unitário;

Em seguida, altere rw para 20 e 200 e avalie o impacto na resposta do sistema.

Receding Horizon Control

```
% Planta
Ap = [ 1   1;  0   1 ];
Bp = [ 0.5;  1 ];
Cp = [ 1   0 ];
Dp = 0;

% Parâmetros do RHC
Np = 20;
Nc = 4;
rw = 0.1;
```

```
% Modelo em espaço de estados aumentado
[ Phi_Phi, Phi_F, Phi_R, B_e ] = mpcgain(Ap, Bp, Cp, Nc, Np);
[n_lin, n_col ] = size(B_e); % Para salvar ordem do modelo aumentado
xm = [ 0; 0 ];        % Condição inicial do sistema
Xf = [ 0; 0; 0 ];     % Variável de realimentação de estados aumentada
N_amostras = 100;              % Número de amostras
R = ones( N_amostras, 1 );   % Referência
u(1) = 0;     % Para ter continuidade no plot
y(1) = 0;     % Para ter continuidade no plot
r(1) = 0;     % Para ter continuidade no plot
```

Receding Horizon Control

% No tempo de amostragem k, o vetor ΔU é calculado usando a referência r(k) e o vetor de estado Xf. Então, Δu(k) é tomado como o primeiro elemento de ΔU e u(k) = u(k − 1) + Δu(k).

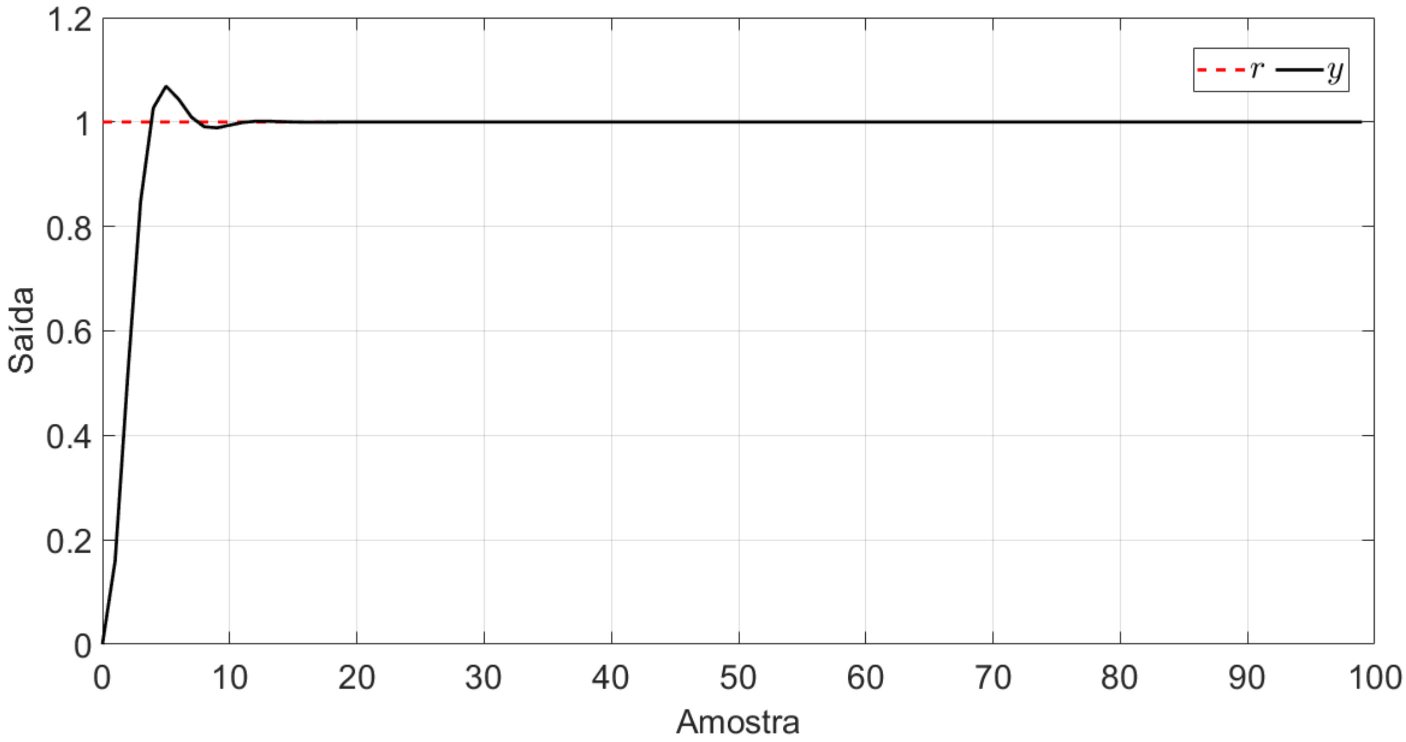
```
for k = 2 : N_amostras

    r(k) = 1;       % Referência
    R_barra = rw*eye(Nc,Nc);
    DeltaU = inv( Phi_Phi + R_barra )*( Phi_R*r(k) – Phi_F*Xf );      % Predição de controle
    deltau = DeltaU(1,1);          % Implementa apenas a primeira ação de controle predita
    u(k) = u(k-1) + deltau;        % Ação de controle
```

Receding Horizon Control

% Os estados e a saída da planta são simulados usando o sinal de controle gerado. A variável de estado usada no mecanismo de feedback é atualizada como Xf.

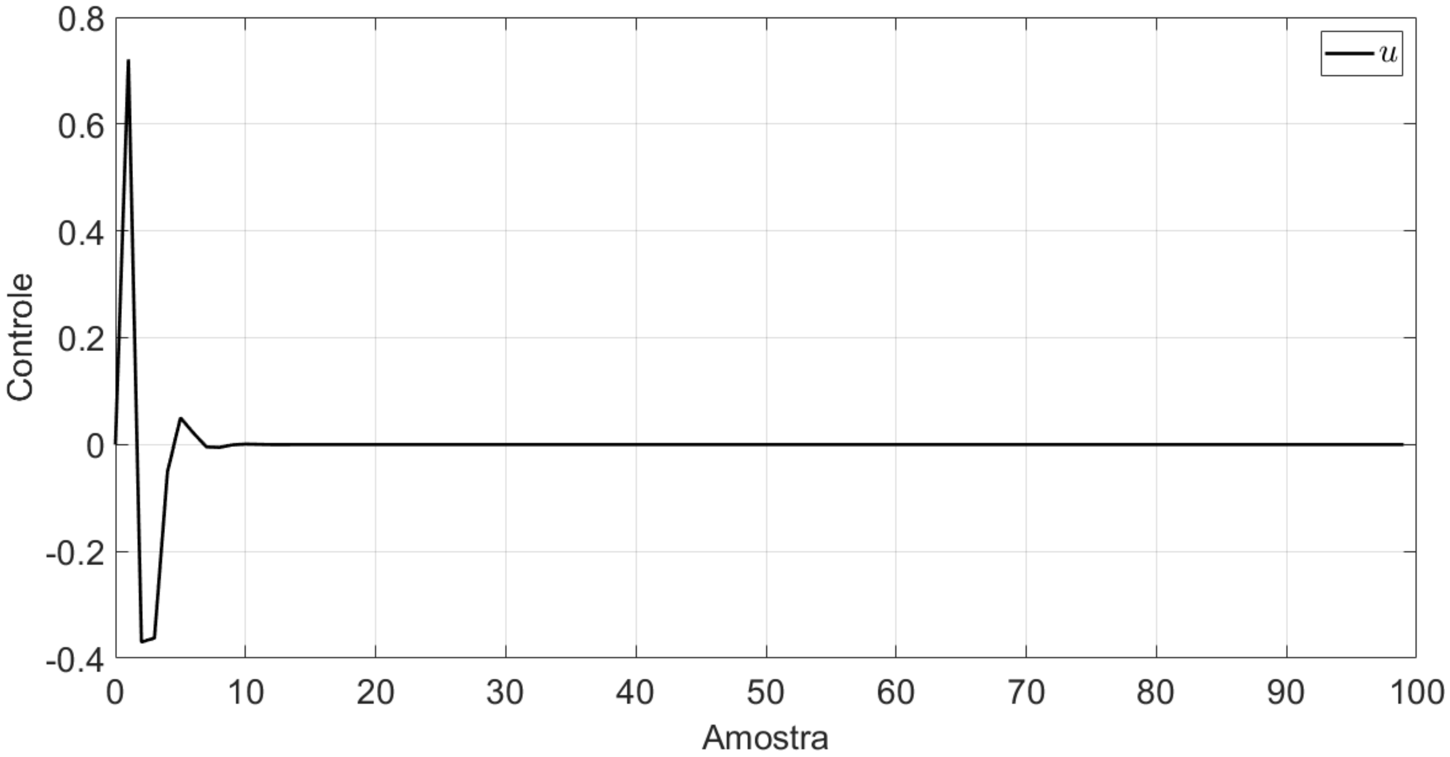
```
    xm(1:2,k) = Ap*xm(1:2,k-1) + Bp*u(k);   % Note que a planta em questão já é discreta
    y(k) = Cp*xm(1:2,k);                     % Logo, não se aplica o método de Euler

    Xf = [ xm(1:2,k) - xm(1:2,k-1);  y(k) ];  % Mecanismo de feedback
end
```

Receding Horizon Control



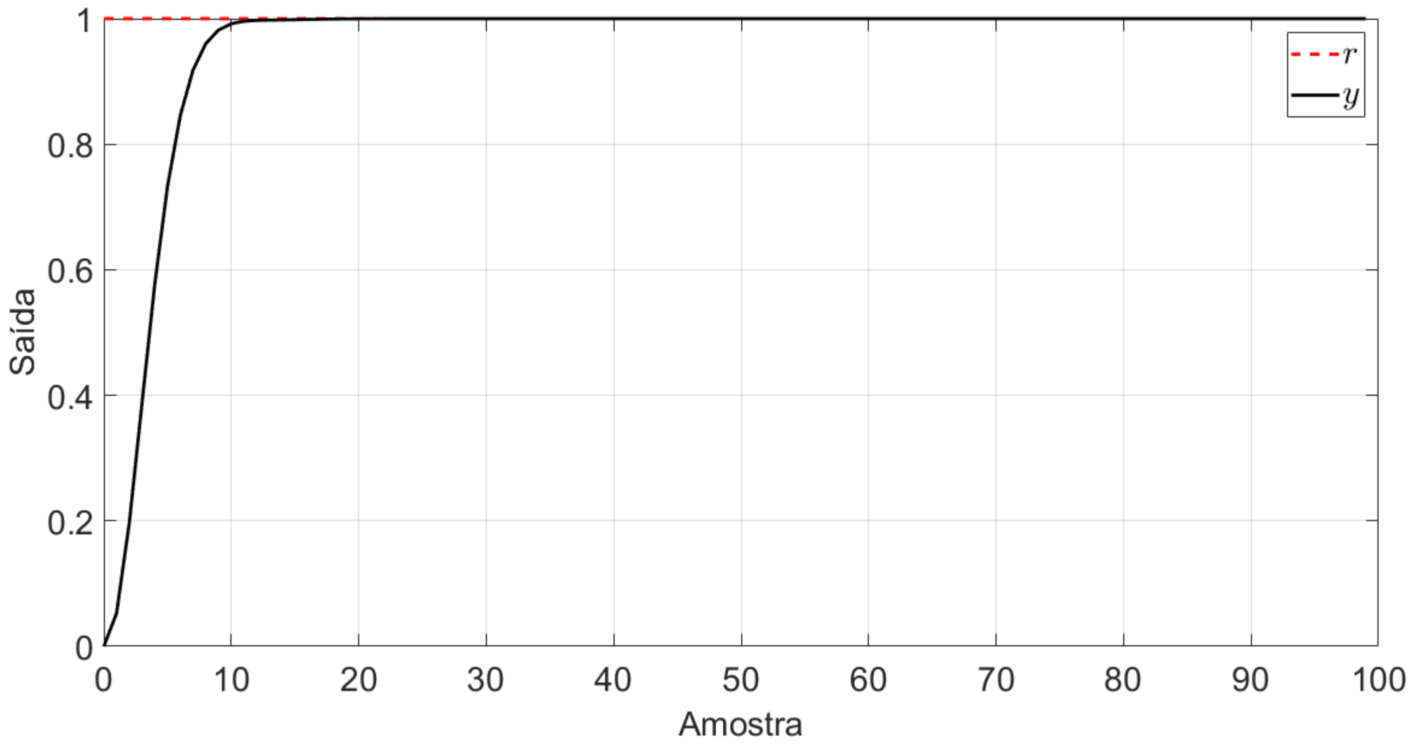
rw = 0,1

Receding Horizon Control



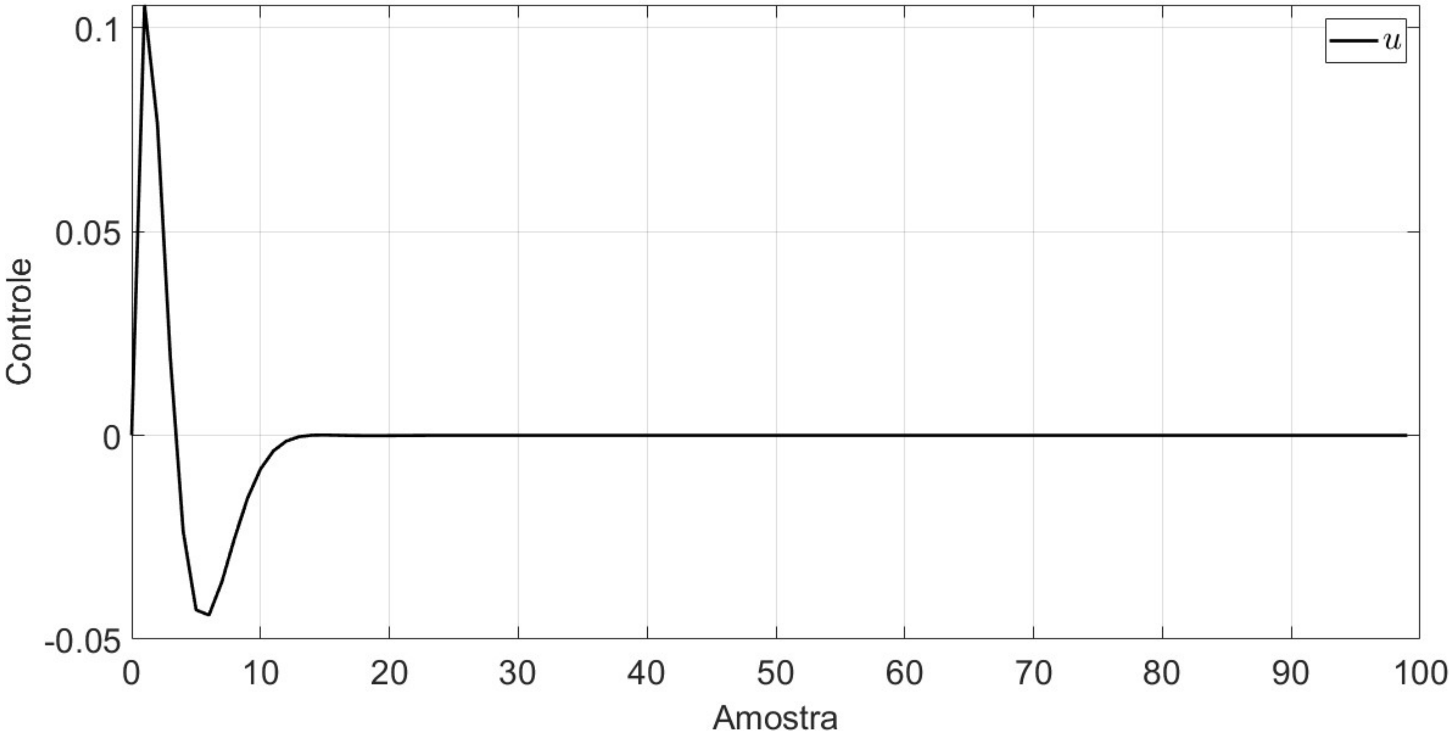
rw = 0,1

Receding Horizon Control



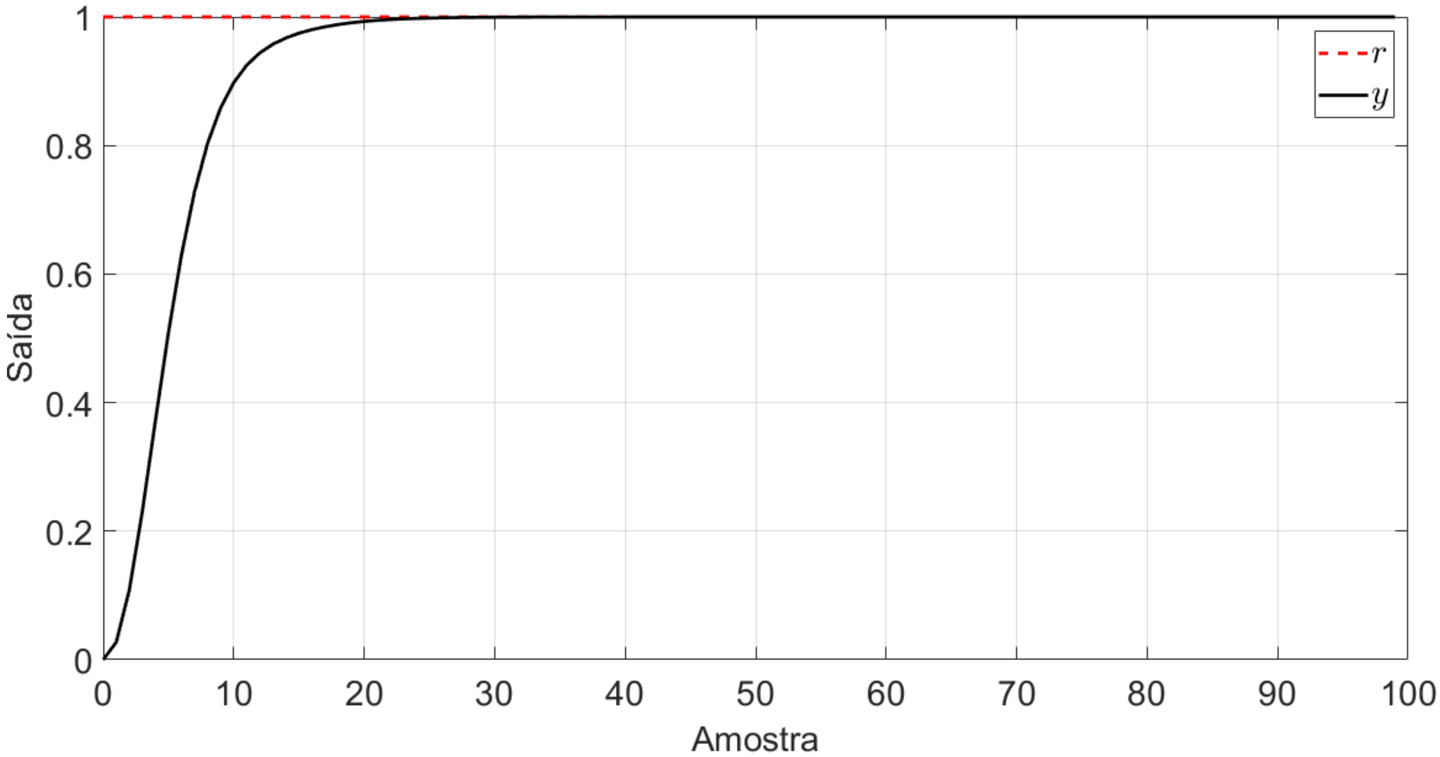
rw = 20

Receding Horizon Control



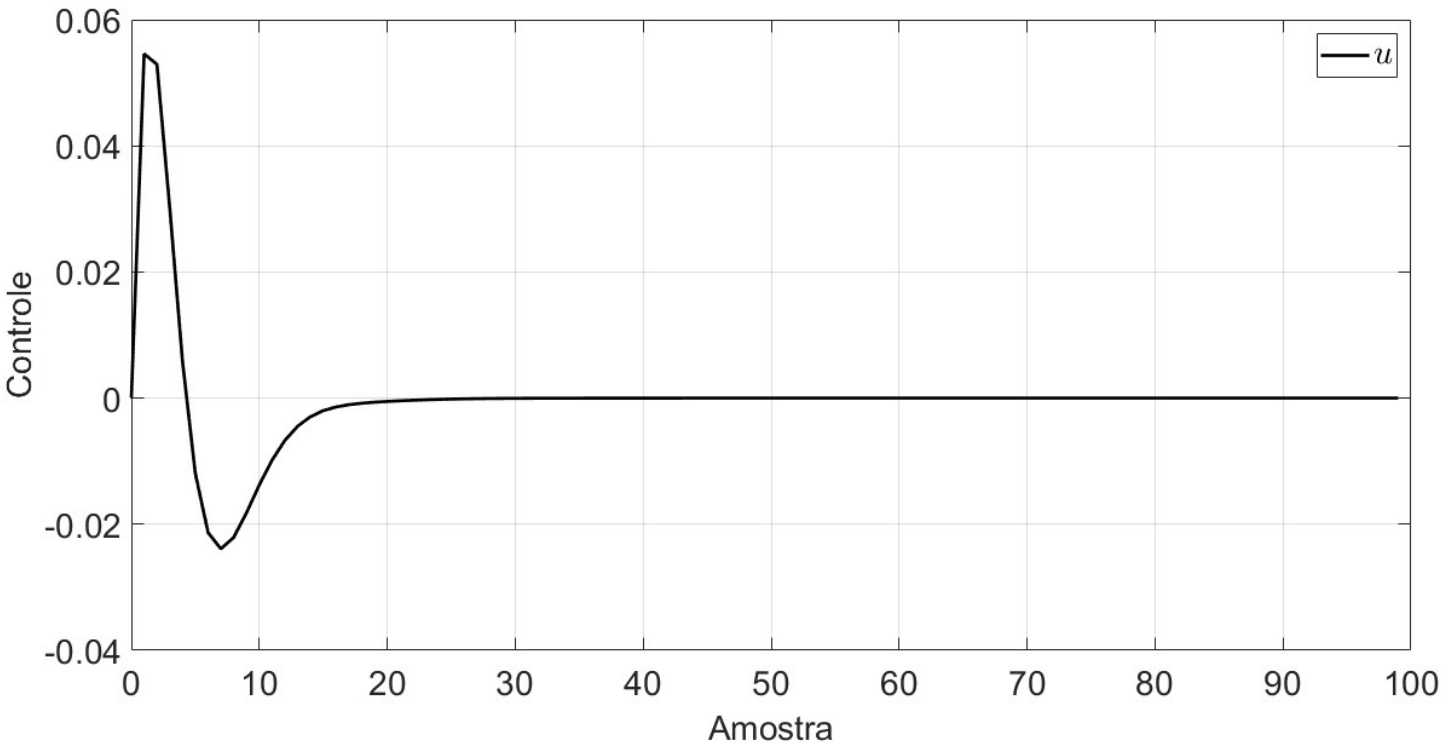
rw = 20

Receding Horizon Control



rw = 200

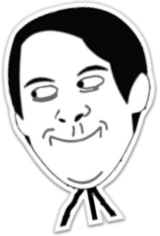
Receding Horizon Control



rw = 200

Receding Horizon Control

Prática 1



Receding Horizon Control

Projete um RHC para o seguinte sistema

$$x_m(k+1) = ax_m(k) + bu(k)$$
$$y(k) = x_m(k),$$

onde a = 0,8 and b = 0,1.

A condição inicial é $x(ki)$ = [0,1]^T e $u(1)$ = 0;

Varie a ponderação de r_w , N_c e N_p. Compare os resultados obtidos.

Receding Horizon Control

Prática 2

Receding Horizon Control

Projete um RHC para um motor DC, cujo modelo contínuo é

$$\frac{\omega}{V_a} = \frac{K_t K_v / L_a B}{s^2 + s(B/J + R_a/L_a) + [(R_a B + K_t K_v)/L_a J]}$$

$B = 1.5\text{x}10^{-4}$ Nms/rad % Atrito mecânico

$J = 2\text{x}10^{-5}$ kgm^3 % Constante de inércia

$R_a = 0.125\ \Omega$ % Resistência da armadura

$L_a = 10$ mH % Indutância de armadura

$K_t = 0.05$ % Constante de torque do motor

$K_v = 0.05$ % Constante de tensão do motor

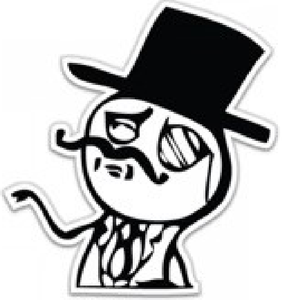
Frequência de amostragem: 1 kHz

Referência: seno com amplitude 2 e frequência 1 Hz

Obs.: Tensão máxima (u) = 5 V.

Receding Horizon Control

Prática 3



Receding Horizon Control

Projete um RHC para o controle de potência do núcleo no reator de água pressurizada estações de energia nuclear descrito no artigo:

WANG, Guoxu et al. **State-space model predictive control method for core power control in pressurized water reactor nuclear power stations**. Nuclear Engineering and Technology, v. 49, n. 1, p. 134-140, 2017.

<u>Obs</u>.: utilize um tempo de discretização de Ts = 1/10 s.

Próxima aula:

Estimação de estados

Filtro de Kalman

Teoria + Simulações

(aula no laboratório de informática)

Bibliografia Básica

NISE, N. S., **Engenharia de sistemas de controle**, 5ª Edição, LTC, 2009.

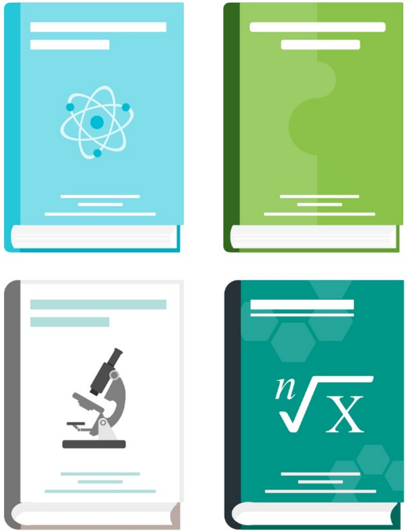
OGATA, K., **Engenharia de controle moderno**, 5ª Edição, Pearson, 2011.

DORF, R. C.; BISHOP, R. H., **Sistemas de controle modernos**, 11ª Edição, LTC, 2009.

SEBORG, D. E.; EDGAR, T. F.; MELLICHAMP, D. A.; DOYLE, F. J., **Process dynamics and control**, 3ª Edition, John Wiley & Sons, 2010.

BAZANELLA, A. S.; GOMES da SILVA Jr., J. M., **Sistemas de controle: princípios e métodos de projeto**, 1ª Edição, Editora UFRGS, 2005.

CHEN, C. T., **Linear system theory and design**, 3ª Edição, Oxford University Press, 1999.



Bibliografia Complementar

CAMACHO E. F. Camacho; BORDONS C. A. Bordons. **Model Predictive Control in the Process Industry**. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. 1997.

BORRELLI, F., BEMPORAD, A., MORARI, M. **Predictive Control for Linear and Hybrid Systems**. Cambridge: Cambridge University Press. 2017.