Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos - PMR

Aula 7 – Controle Adaptativo

Prof. Eduardo A. Tannuri

PMR 5014

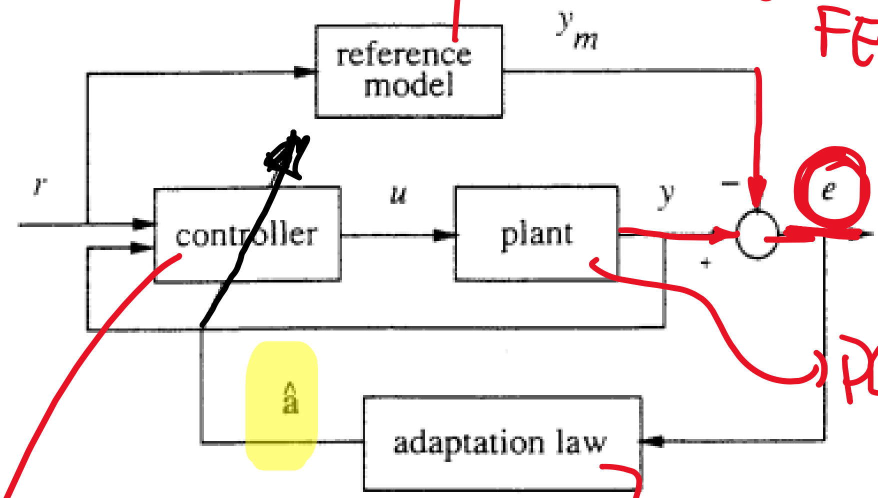
Controle Não Linear Aplicado a Sistemas Mecânicos e Mecatrônicos

CAP 8 LIVRO

MODEL REFERENCE

ADAPTIVE CONTROL

MODELO IDEAL
SISTEMA MALHA
FECHADA

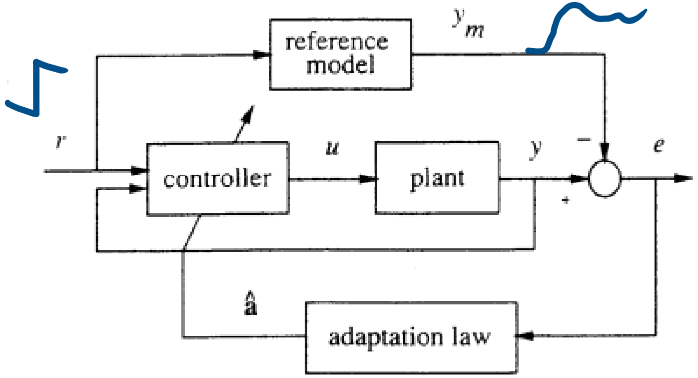


â --- estimated parameters

PLANTA COM ESTRUTURA
MODELO CONHECIDA

AJUSTA OS
GANHOS DE
CONTROLE

PARAMETRIZADO, _
PARAMETROS AJUSTÁVEIS
SE A PLANTA FOSSE CONHECIDA,
GARANTIRIA TRACKING PERFEITO
MODELO REFERÊNCIA



â --- estimated parameters

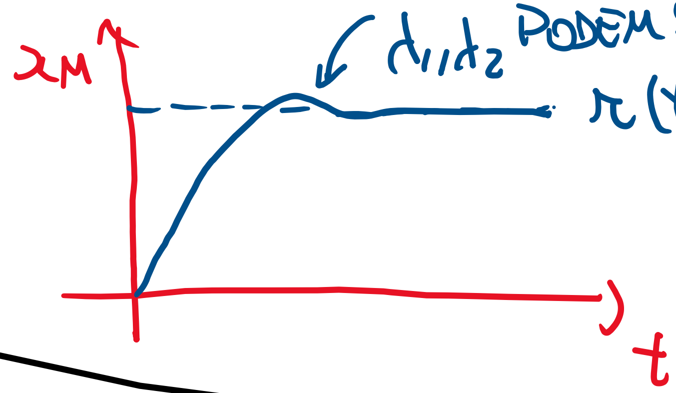
PLANTA: $\boxed{m \cdot \ddot{x} = u}$

↳ NÃO CONHECIDA

SET POINT

M.R: $\boxed{\ddot{x}_M + \lambda_1 \dot{x}_M + \lambda_2 x_M = \lambda_r \cdot r(t)}$

OBS: se $\lambda_2 = \lambda_r$



λ_1, λ_2 PODEM SER AJUSTADOS P/ A CURVA DESEJADA

SE m FOSSE CONHECIDO:

$$u = m \cdot (\ddot{x}_M - 2\lambda\dot{\tilde{x}} - \lambda^2 \tilde{x})$$

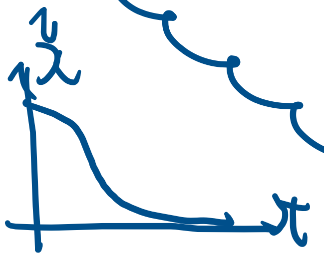
COM $\tilde{x} = x - x_M$

POIS:

MALHA FECHADA $\tilde{x} \to 0$

$$\cancel{m}\ddot{x} = \cancel{m}(\ddot{x}_M - 2\lambda\dot{\tilde{x}} - \lambda^2\tilde{x})$$

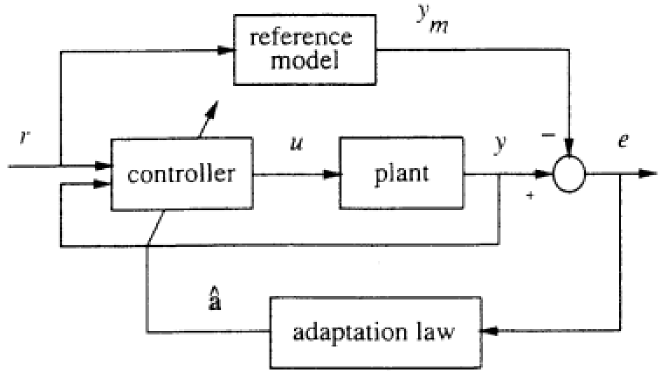
$$\ddot{\tilde{x}} + 2\lambda\dot{\tilde{x}} + \lambda^2\tilde{x} = 0 \to$$



MAS m NÃO É CONHECIDO

$$\boxed{u = \hat{m}(\ddot{x}_M - 2\lambda\dot{\tilde{x}} - \lambda^2\tilde{x})}$$

$\hat{m}$ = ESTIMATIVA m



$\hat{a}$ --- estimated parameters

EM MALHA FECHADA

$$m\ddot{x} = \hat{m}\left(\ddot{x}_m - 2\lambda\dot{\tilde{x}} - \lambda^2\tilde{x}\right)$$

SENDO $\tilde{m} = \hat{m} - m$, CHEGAMOS A

$$m\dot{s} + \lambda m s = \tilde{m} v$$

COM

$s = \dot{\tilde{x}} + \lambda\tilde{x}$ ⟶ MEDIDA ERRO TRACKING

$v = \ddot{x}_m - 2\lambda\dot{\tilde{x}} - \lambda^2\tilde{x}$

↳ S É LIGADA AO ERRO PARAMÉTRICO $\tilde{m}$ POR UM FILTRO ESTÁVEL

VAMOS INTRODUZIR UMA LEI DE ADAPTAÇÃO

$$\boxed{\dot{\hat{m}} = -\gamma . v . s}$$

NÃO LINEARIDADE

$$V = \frac{1}{2}\left[m s^2 + \frac{1}{\gamma}\tilde{m}^2\right]$$

P.D. $\tilde{m}, \tilde{s} > 0$

$$\dot{V} = \frac{1}{2}\left[2ms\dot{s} + \frac{2}{\gamma} . \tilde{m}\dot{\tilde{m}}\right]$$

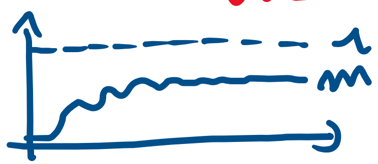
$$\dot{\tilde{m}} = \dot{\hat{m}} - \dot{m} \cong \dot{\hat{m}}$$

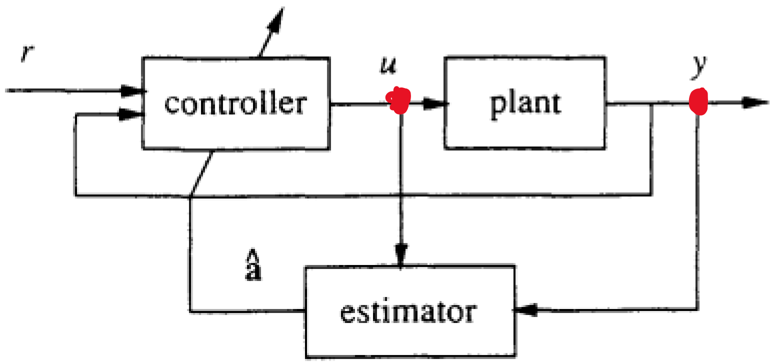
(HIPÓTESE m É LENTAMENTE VARIÁVEL, $\dot{m} \cong 0$)

⋮

$\dot{V} = -\lambda . m . s^2 < 0$ SND (ESTÁVEL LYAP.)

↳ $\begin{cases} s \to 0 \\ \tilde{m} \text{ É BOUNDED} \end{cases}$





â --- estimated parameters

SELF-TUNING CONTROLLER

ESTIMADOR OU MODEL IDENTIFICATION) BASEADO NA RELAÇÃO $u \to y$ PLANTA ESTIMA PARÂMETROS $\hat{a}$

CONTROLLER) SE ATUALIZA BASEADO EM $\hat{a}$

STC

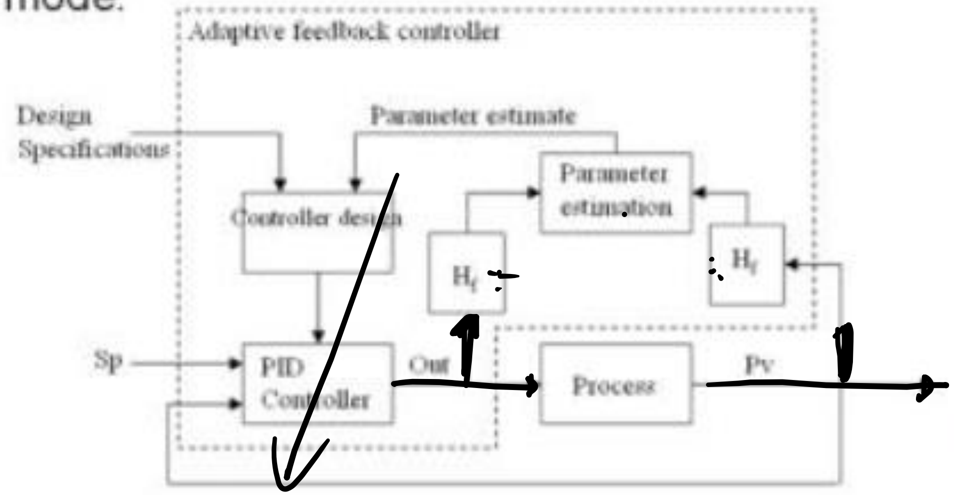
MÍNIMOS QUADRAD.
GRADIENTE

$\longleftrightarrow$

PID
LQR
LQG
H_∞

IDENTIFICAÇÃO CONTROLE

- Adaptation of the control parameters can be used when the dynamic changes are slow in comparison with the main process dynamics!
- A variety of rule sets defines when the Out and Pv signals can be used for adaptation and then the parameter estimate is focused around the frequency gained during the auto-tuning. Parameter estimation is done using Least-Squares methods.
- Adaptation runs continuously and an extensive set of rules are implemented to safe-guard against condition when Out and Pv does not contain useful modelling information contents or the controller is in manual mode.



$m\ddot{x} = u$

ALOCAÇÃO POLOS $(-\lambda i - \lambda)$

$u = \hat{m}(\ddot{x}_M - 2\lambda\dot{\tilde{x}} - \lambda^2\tilde{x})$

$\tilde{x} = x - x_M$

↳ x_M É VALOR SET POINT

- ESTIMAR m (IDENTIFICAÇÃO)

Ⓐ $\cancel{\hat{m} = \frac{u}{\ddot{x}}}$ ← MUITO RUIDO
NÃO TEM HISTÓRICO

Ⓑ MÍNIMOS QUADRADOS

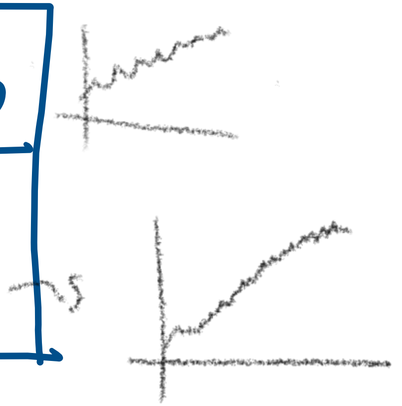
Estimar $\hat{m}$ / $J = \int_0^t e^2(\tau)\,d\tau$ SEJA MÍNIMO

ONDE $e(\tau) = \hat{m}(\tau).\ddot{x}(\tau) - u(\tau)$

$$J = \int_0^t \left((\hat{m}\ddot{x})^2 - 2\hat{m}\ddot{x}u + u^2\right).d\tau$$

$$\frac{dJ}{d\hat{m}} = 0 \Rightarrow \int_0^t \cancel{2}\hat{m}\ddot{x}^2\,d\tau - \int_0^t \cancel{2}\ddot{x}u\,d\tau = 0$$

$$\boxed{\hat{m} = \frac{\int \ddot{x}u\,d\tau}{\int \ddot{x}^2\,d\tau}}$$

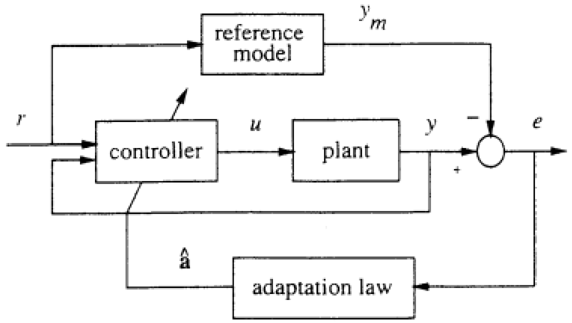


EX SIST. 1º ORDEM MRAC

$$\begin{cases} \dot{y} = -a_p y + b_p \cdot u \\ \dot{y}_M = -a_M y_M + b_M r \end{cases}$$

- a_p, b_p NÃO CONHECIDOS
- SINAL (b_p) CONHECIDO

$a_M > 0$ (ESTÁVEL)
$a_M = b_M$ p/ $y_M \to r$
a_M, b_M CONHECIDOS



$\hat{a}$ --- estimated parameters

$$\boxed{u = \hat{a}_r \cdot r + \hat{a}_y \cdot y}$$

CASO IDEAL

$$a_y^* = \frac{a_p - a_M}{b_p}$$

$$a_r^* = \frac{b_M}{b_p}$$

NÃO CONHEÇO!!!

POIS EM MALHA FECHADA CASO IDEAL:

$$\dot{y} = -a_p \cdot y + b_p \cdot \left(\frac{b_M}{b_p} \cdot r + \frac{a_p - a_M}{b_p} \cdot y \right) = -a_M y + b_M r$$

PLANTA MF = MR

$\hat{a}_r \to a_r^*$
$\hat{a}_y \to a_y^*$ } OBTER LEI DE ADAPTAÇÃO P/ GARANTIR CONVERG.

$z = y - y_m$ = ERRO ACOMPANHAMENTO

$\dot{z} = \dot{y} - \dot{y}_m$

$\dot{z} = -a_p \cdot y + b_p \cdot u + a_m y_m - b_m \cdot r$

$\dot{z} = -a_p \cdot y + b_p(\hat{a}_r r + \hat{a}_y y) + a_m y - b_m r$

$$\dot{z} = -a_m \underbrace{(y - y_m)}_{z} + (\underbrace{-a_p - a_m}_{-a_y^* \cdot b_p} + b_p \hat{a}_y) y + (\underbrace{b_p \hat{a}_r - b_m}_{a_r^* \cdot b_p}) \cdot r$$

$\dot{z} = -a_m \cdot z + b_p \cdot (\hat{a}_y - a_y^*) y + b_p (\hat{a}_r - a_r^*) r$

$$\boxed{\dot{z} = -a_m z + b_p \cdot (\tilde{a}_y y + \tilde{a}_r \cdot r)}$$

→ DINÂMICA ERRO z ESTÁVEL E EXCITADA PELO ERRO PARAMÉTRICO $\tilde{a}_y$ e $\tilde{a}_r$

$\tilde{a}_y = \hat{a}_y - a_y^*$

$\tilde{a}_r = \hat{a}_r - a_r^*$

$$\dot{z} = -a_m . z + b_p . (\hat{a}_y - a_y^*) y + b_p (\hat{a}_r - a_r^*) r$$

$$\boxed{\dot{z} = -a_m z + b_p . (\tilde{a}_y y + \tilde{a}_r . r)}$$

$\downarrow$

LEI DE ADAPTAÇÃO

$$\begin{cases} \dot{\hat{a}}_r = -\mathrm{sgn}(b_p) . \gamma \, z . r \\ \dot{\hat{a}}_y = -\mathrm{sgn}(b_p) \gamma z . y \end{cases}$$

$$V = \frac{1}{2} z^2 + \frac{1}{2\gamma} . |b_p| . (\tilde{a}_r^2 + \tilde{a}_y^2) \quad \text{P.D.}$$

$$\dot{V} = -a_m . z^2 \quad \text{S.N.D.}$$

$$\hookrightarrow \begin{cases} z \to 0 \\ \tilde{a}_r, \tilde{a}_y \text{ LIMITADOS} \end{cases}$$

EX) . $\dot{y} = -\frac{1}{\tau} . y + K . u$ FORNO

$\tau = 600s$

$K = 1{,}2$

$u = [0; 1]$

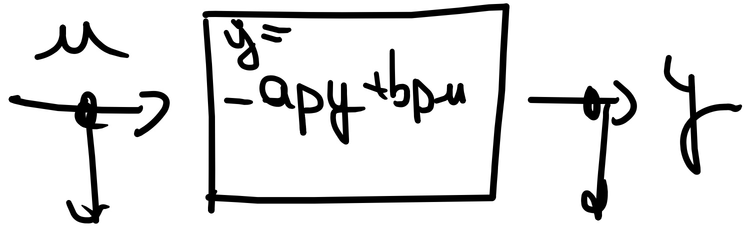
$\dot{y}_m = -\frac{1}{300} y_m + \frac{1}{300} . r$

STC

$$\dot{y} = -a_p y + b_p u$$

a_p, b_p NÃO CONHECIDOS

b_p SINAL CONHECIDO



IDENTIFICAR a_p, b_p BASEADO NA MEDIDA DE y e u

TRUQUE

$$s.Y = -a_p.Y + b_p.U$$

$$(s+d_f)Y = (-a_p + d_f).Y + b_p.U$$

$$Y = (-a_p + d_f).Y_f + b_p.U_f$$

COM $Y_f = \dfrac{Y}{s+d_f}$ $\quad U_f = \dfrac{U}{s+d_f}$

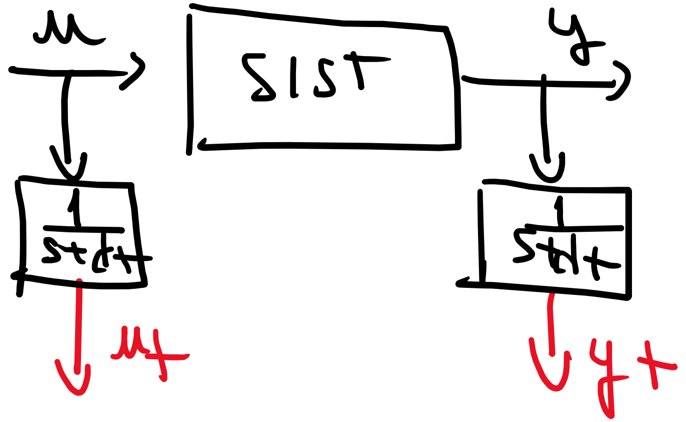
$$y = \begin{pmatrix} y_f & u_f \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_f - a_p \\ b_p \end{pmatrix}$$

$$y = \underset{\sim}{x}^T . \underset{\sim}{P}$$

$$\underset{\sim}{x} \rightarrow \begin{pmatrix} y_f \\ u_f \end{pmatrix} \qquad \underset{\sim}{P} \rightarrow \begin{pmatrix} d_f - a_p \\ b_p \end{pmatrix}$$

$$y = x^T \cdot p$$

$x \rightarrow \begin{pmatrix} y_f \\ u_f \end{pmatrix}$ ↳ $\begin{pmatrix} d_f - a_p \\ b_p \end{pmatrix}$



$$\hat{y} = x^T \cdot \hat{p}$$

$$\tilde{y} = \hat{y} - y = x^T\hat{p} - x^T \cdot p = x^T \cdot \tilde{p}$$

↳ erro parâmetros

$$\dot{\hat{p}} = -\frac{\alpha}{2} \cdot \frac{\partial \tilde{y}^2}{\partial \hat{p}}$$

$\hat{p}$ VAI BUSCANDO DIREÇÃO CONTRÁRIA AO CRESC. ERRO

$$\dot{\hat{p}} = -\frac{\alpha}{2} \cdot 2\tilde{y}\,\hat{p}$$

$$\boxed{\dot{\hat{p}} = -\alpha \cdot \tilde{y} \cdot \hat{p}}$$

$$\tilde{y} = x^T \cdot \tilde{p}$$

↳ VÁRIOS MÉTODOS - MÍNIMOS QUAD.

$\boxed{\text{- GRADIENTE}}$

CONTROLE → PRINCIPIO EQUIVALENCÍA A CERTEZA

$$u = \hat{a}_y \cdot y + \hat{a}_r \cdot r$$

OBJETIVO : $t_{RESP} = \frac{1}{\gamma}$

$$\dot{y}_{ideal} = \frac{1}{\gamma} \cdot \bar{y}_{ideal} + \frac{1}{\gamma} r$$

$$\dot{a}_y^{ideal} = \frac{-1/\gamma + \hat{a}_p}{\hat{b}_p}$$

$$\bar{a}_r^{ideal} = \frac{1}{\gamma \hat{b}_p}$$