



# Controle por Modo Deslizante e suas Aplicações

José Paulo V. S. da Cunha ★

<sup>1</sup> Departamento de Eletrônica e Telecomunicações

Faculdade de Engenharia

Universidade do Estado do Rio de Janeiro

UFF, Niterói, RJ, 8 de dezembro de 2016

# Organização



1. Introdução
2. Exemplo motivador:
  - (a) Controle linear
  - (b) Controle a estrutura variável
3. Fenômeno *chattering*
4. SMC baseado em observador
5. SMC para sistemas com atraso
6. Aplicações
7. Conclusão

# Introdução



- ▶ Aplicações do controle automático:
  - ▷ aeroespaciais;
  - ▷ robótica;
  - ▷ eletrodomésticos;
  - ▷ processos industriais;
  - ▷ sistemas elétricos;
  - ▷ sistemas biomédicos;
  - ▷ etc.
  
- ▶ Benefícios do controle automático:
  - ▷ melhor desempenho transitório;
  - ▷ melhor desempenho em regime permanente;
  - ▷ reduz efeitos de incertezas e perturbações.

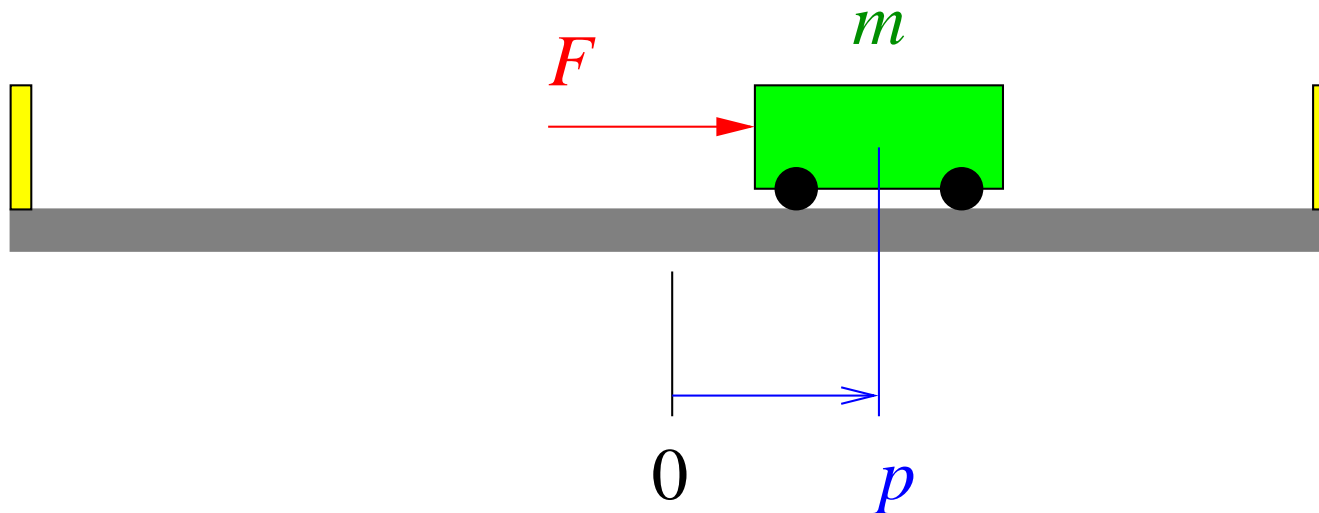
# Introdução



- ▶ Algumas estratégias de controle:
  - ▷ lineares: PIDs, realimentação de estado, etc;
  - ▷ lineares robustos:  $H_\infty$ , QFT, etc;
  - ▷ adaptativo;
  - ▷ neural;
  - ▷ nebuloso;
  - ▷ controle por aprendizado;
  - ▷ controle por modo deslizante, *sliding mode control*, **SMC**  
ou
  - ▷ controle a estrutura variável, *variable structure control*,  
**VSC** e ...
  - ▷ *vudu*.

# Exemplo Motivador

- ▶ Sistema mecânico:



- ▶ Modelo dinâmico baseado no duplo integrador:

$$\frac{d^2 p}{dt^2} = \frac{1}{m} F$$

# Exemplo Motivador

- ▶ Modelo no espaço de estado:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \end{bmatrix} F ,$$
$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} x ,$$

no qual:

- ▶ Estado:  $x := \begin{bmatrix} p \\ \dot{p} \end{bmatrix}$  ,
- ▶ Entrada:  $u := \begin{bmatrix} F \end{bmatrix}$  ,
- ▶ Saída:  $y := \begin{bmatrix} p \end{bmatrix}$  .

# Exemplo Motivador

- ▶ Controle linear:
  - ▷ proporcional: sem amortecimento;
  - ▷ proporcional + derivativo (PD): amortece oscilações;
  - ▷ proporcional + integral + derivativo (PID): elimina perturbações.
- ▶ Controle PD equivale à realimentação de estado:

$$u(t) = K_p p_{ref}(t) - Kx(t),$$

com matriz de ganhos  $K := \begin{bmatrix} K_p & K_d \end{bmatrix}$ .

# Exemplo Motivador

- ▶ Controle a estrutura variável:
  - ▷ usa realimentação de estado;
  - ▷ amortece oscilações;
  - ▷ rejeita perturbações;
  - ▷ imune a incertezas paramétricas.

- ▶ Leis de controle:

$$u = \begin{cases} u^+(x, t), & \text{se } \sigma(x) > 0, \\ u^-(x, t), & \text{se } \sigma(x) < 0, \end{cases}$$

ou

$$u = -\rho(x, t) \operatorname{sgn}(\sigma(x)).$$



# Exemplo Motivador

- ▶ Superfície de deslizamento:

$$\sigma(x) = Sx = 0.$$

- ▶ Neste caso:

$$\sigma(x) = \dot{p} + \lambda p.$$

- ▶ Quando  $\sigma(x) = 0, \forall t \geq t_1 \geq 0$ , então trajetória obedece a equação diferencial que independente dos parâmetros do objeto controlado:

$$p(t) = e^{-\lambda(t-t_1)} p(t_1), \quad \forall t \geq t_1 \geq 0,$$

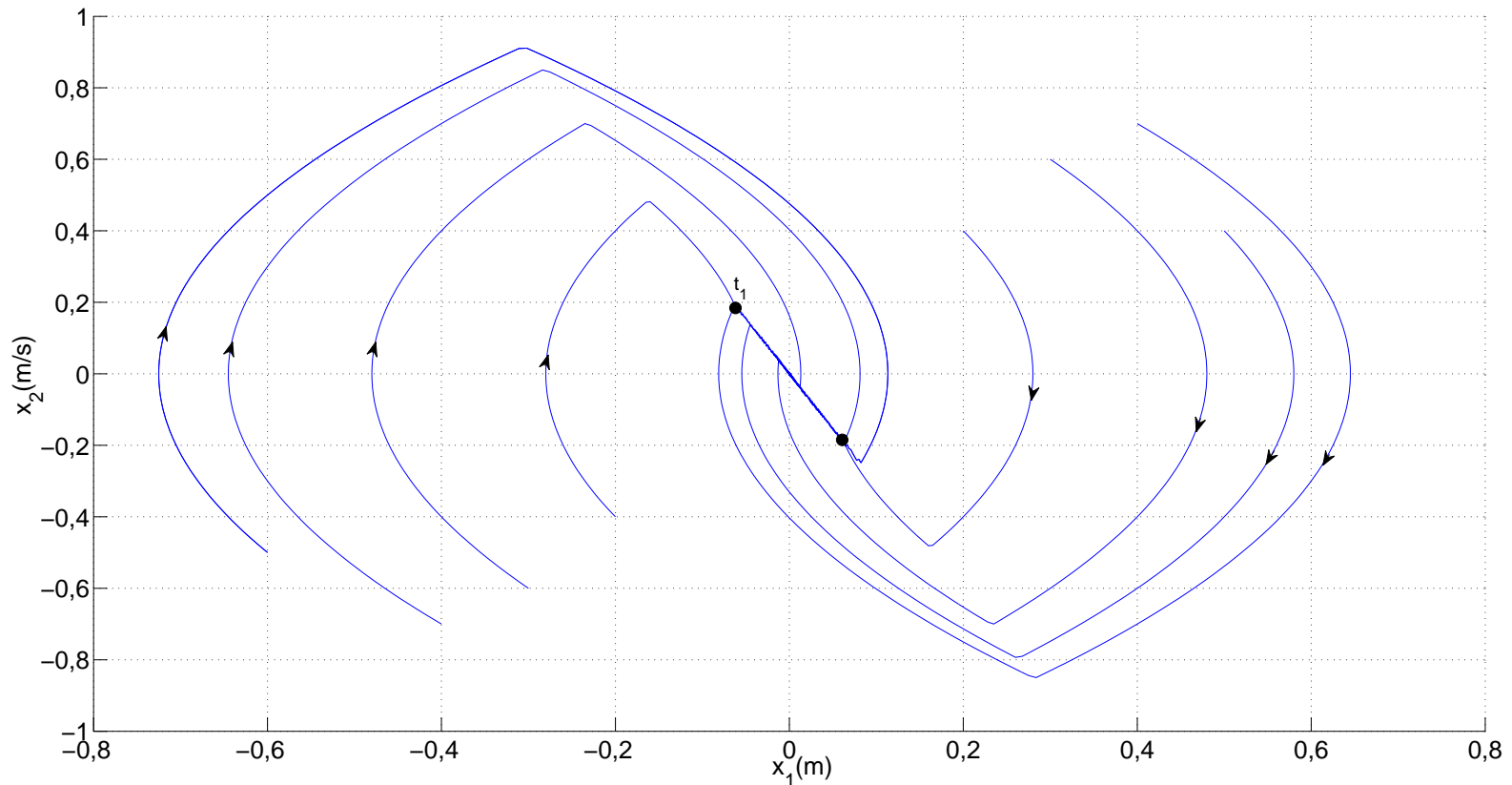
- ▶ Isto é **invariância!**

# Exemplo Motivador



► Plano de fase:

$$u = -\text{sgn}(\sigma(x)), \quad \sigma(x) = x_1 + \frac{1}{3}x_2.$$



# Fenômeno *Chattering*



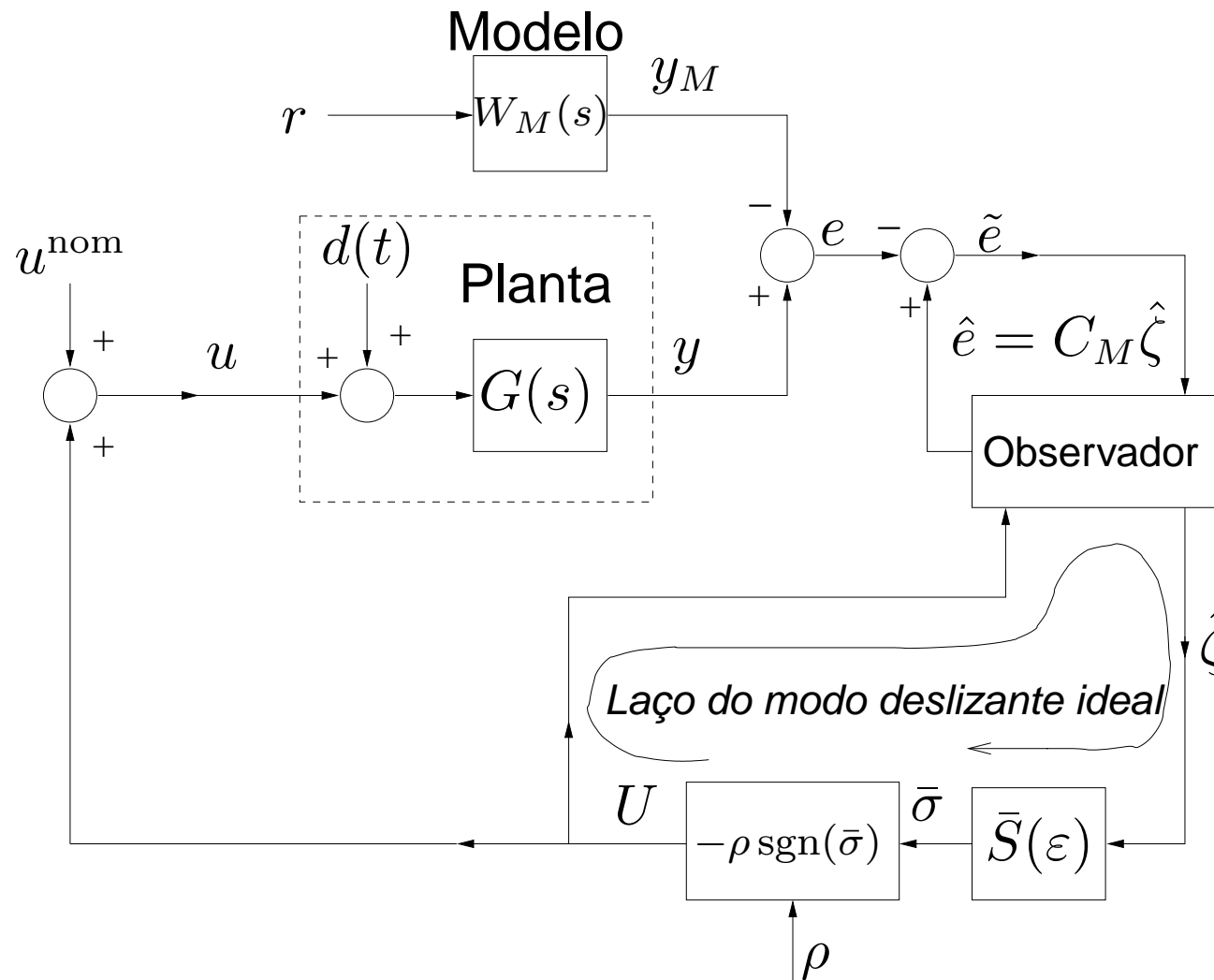
- ▶ Modo deslizante ideal: chaveamento em frequência infinita.
- ▶ *Chattering*:
  - ▷ Chaveamento em frequência finita se deve a imperfeições:
    - ★ atrasos;
    - ★ histerese;
    - ★ etc.
  - ▷ Pode causar:
    - ★ perda de energia;
    - ★ desgaste de atuadores;
    - ★ ruído;
    - ★ erro de rastreamento;
    - ★ outras perdas de desempenho.
- ▶ Há remédios: (Utkin, Guldner & Shi 2009).

# SMC Baseado em Observador

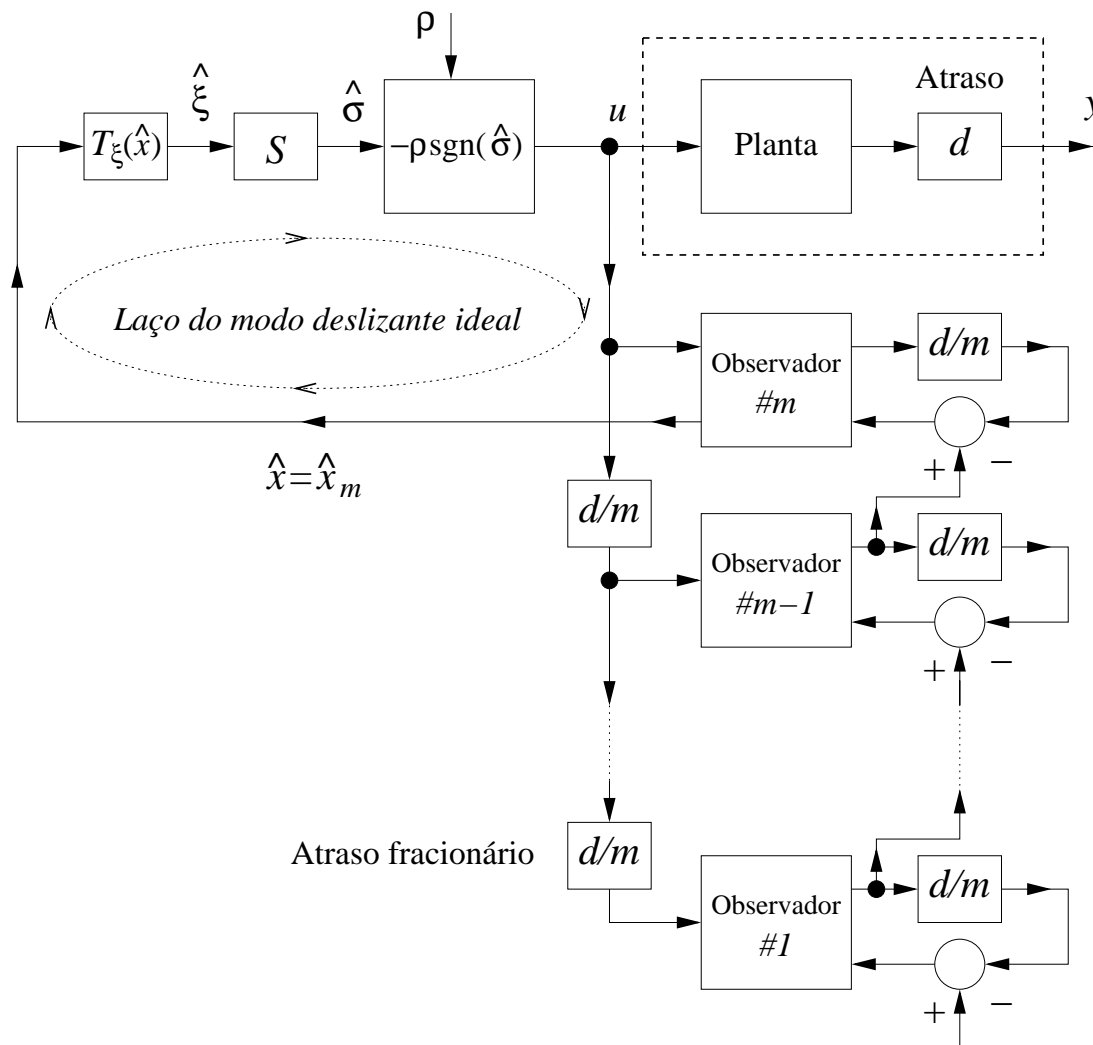


- ▶ Observador de estado para evitar *chattering* em VSC (Utkin et al. 2009)
- ▶ SMC por realimentação de saída:
  - ▷ *Variable structure model-reference adaptive control* (VS-MRAC) (Hsu, Araújo & Costa 1994);
  - ▷ Observador de alto ganho (HGO) robusto a incertezas para VSC por realimentação de saída (Cunha, Costa, Lizarralde & Hsu 2009);
  - ▷ Diferenciadores exatos (Shtessel, Edwards, Fridman & Levant 2014, Hsu, Nunes, Oliveira, Peixoto, Cunha, Costa & Lizarralde 2011) ...
- ▶ SMC para sistemas com atraso longo: observadores em cascata (Coutinho, Oliveira & Cunha 2014).

# SMC Baseado em Observador



# SMC para Sistemas com Atraso

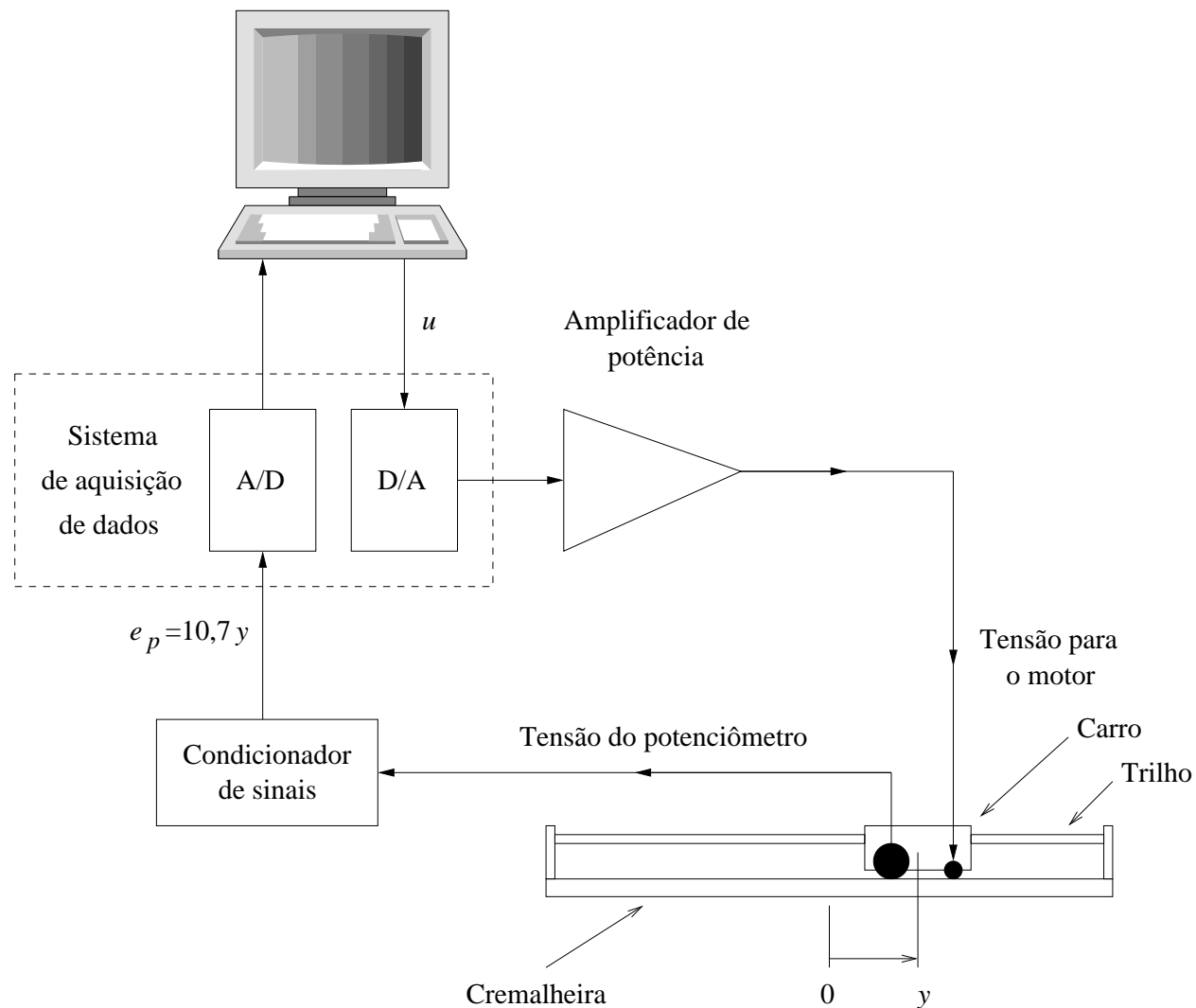


# Aplicações



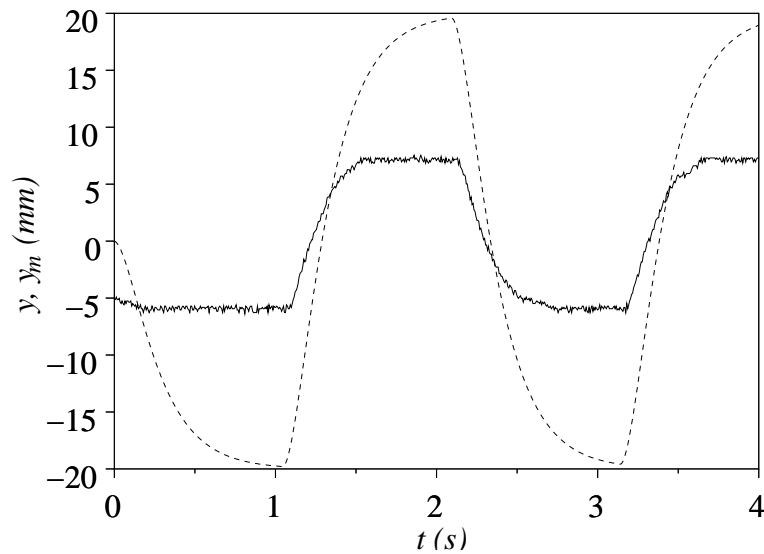
1. Experimentos com VSC + HGO
2. Controle de impedância/admitância:
  - ▶ Exemplo: controle de admitância
3. Controle de sistemas navais:
  - ▶ Controle de um USV

# Experimentos com VSC + HGO

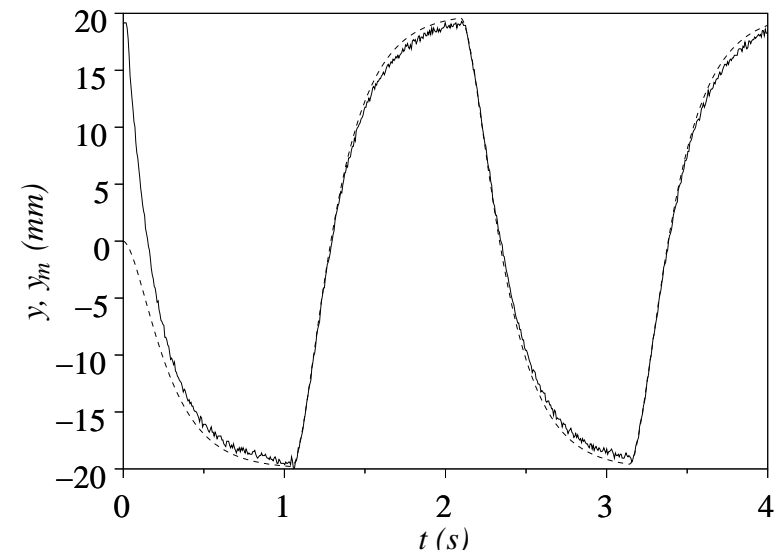




# Experimentos com VSC + HGO

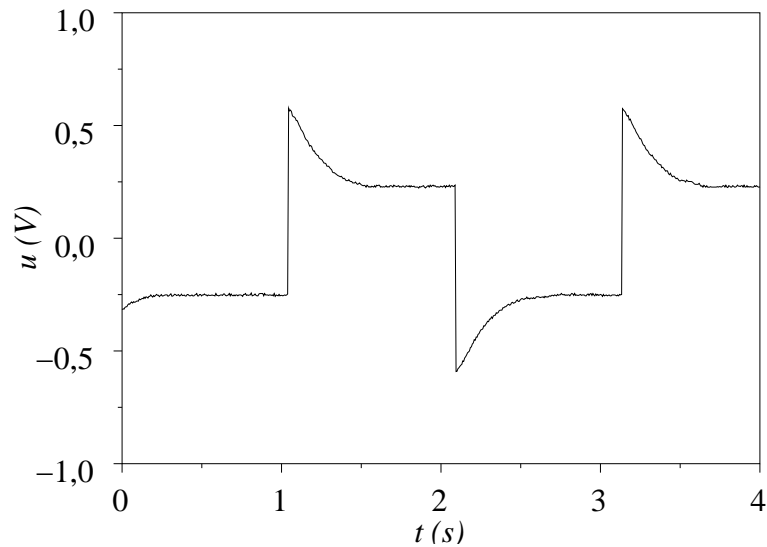


**Linear**

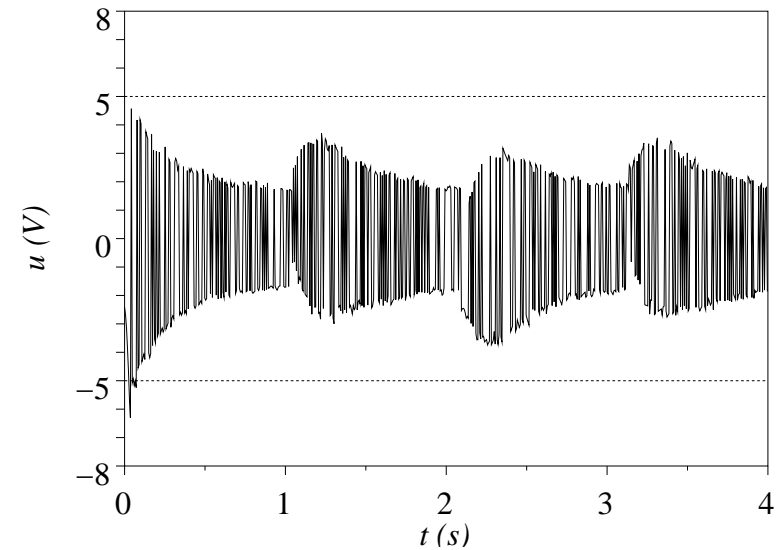


**HGO + VSC**

# Experimentos com VSC + HGO



**Linear**

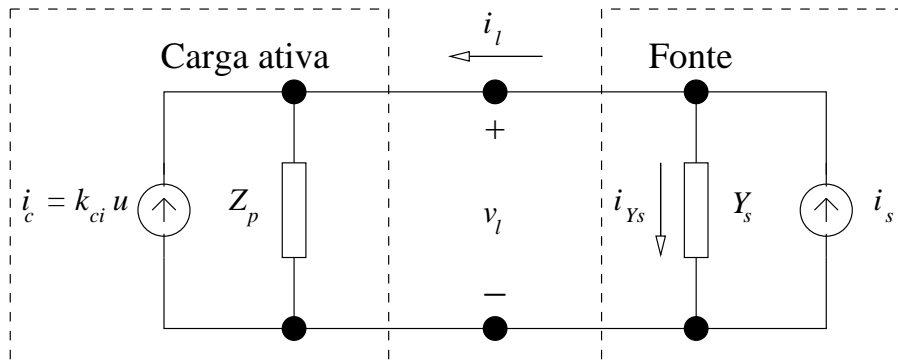


**HGO + VSC**

# Controle de Impedância/Admitância

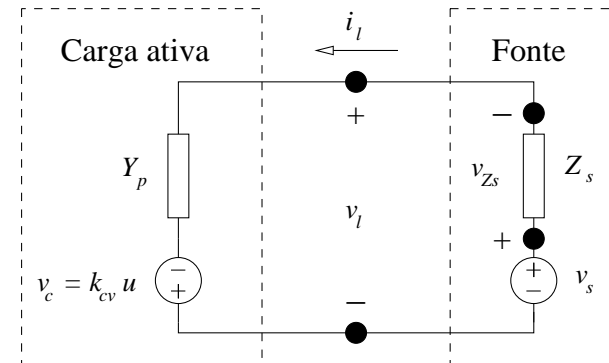


- ▶ Controle de impedância/admitância de carga ativa (Cunha & Costa 2016)
- ▶ Especificada por modelo de referência
- ▶ Admite-se polos instáveis e zeros de fase não-mínima



**Controle de impedância:**

$$Z_l(s) = \frac{v_l(s)}{i_l(s)}$$



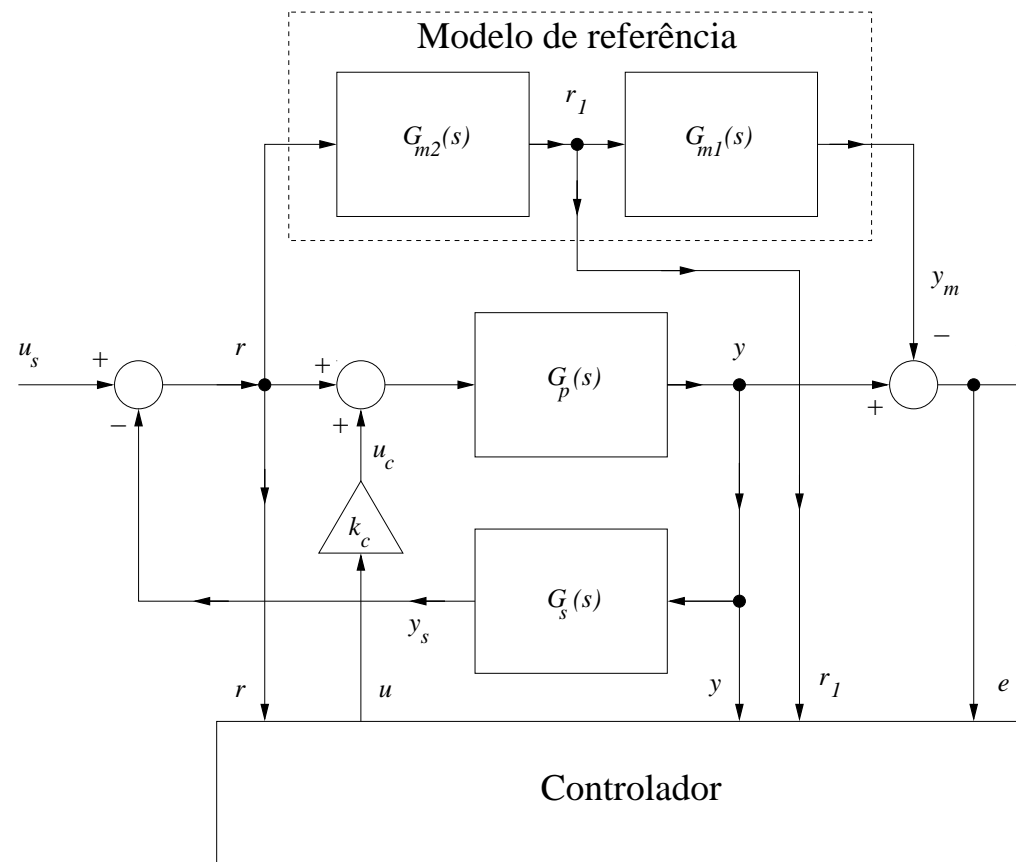
**Controle de admitância:**

$$Y_l(s) = \frac{i_l(s)}{v_l(s)}$$

# Controle de Impedância/Admitância



- ▶ Controle por modelo de referência:  $G_m(s) = G_{m1}(s)G_{m2}(s)$



# Controle de Impedância/Admitância



- ▶ Controle adaptativo por modelo de referência (MRAC):

$$u(t) = \theta^T(t)\omega(t)$$

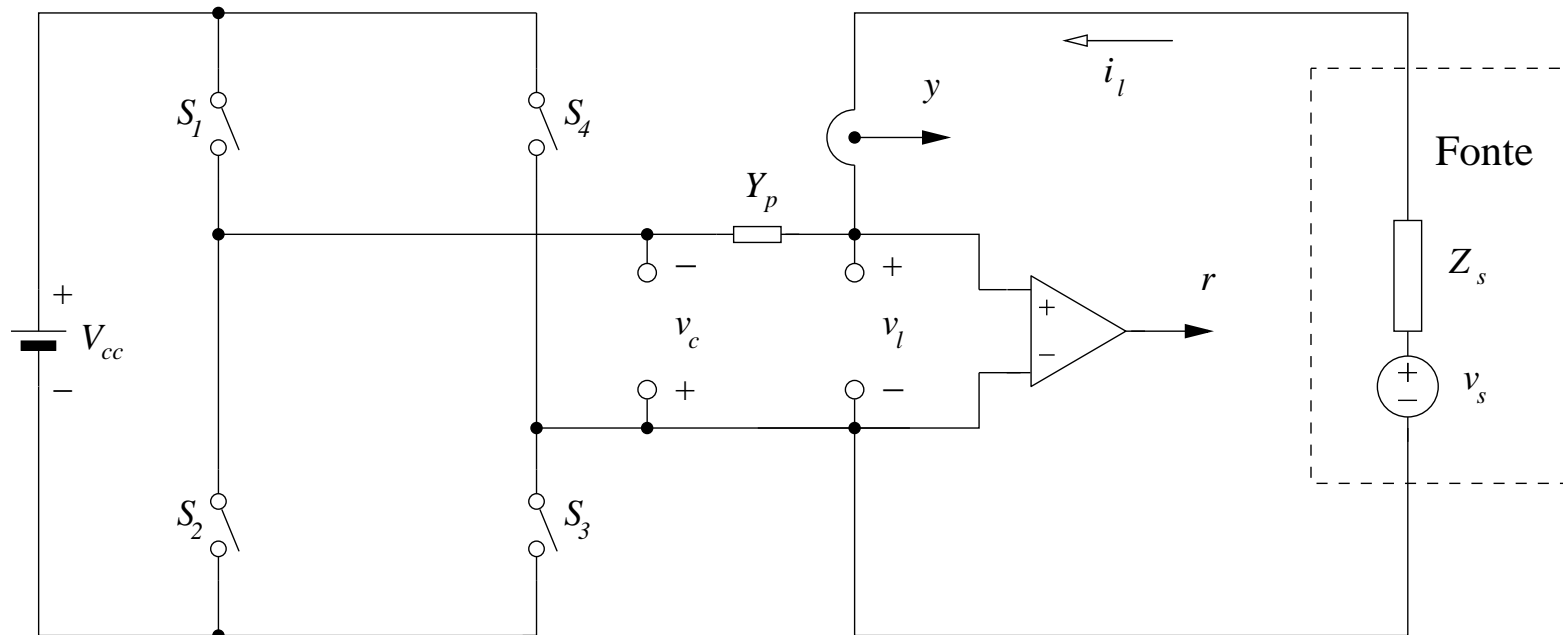
$$\dot{\theta}(t) = \Gamma e(t)\omega(t)$$

- ▶ Controle a estrutura variável por modelo de referência (VS-MRAC):

$$u = -\rho(t) \operatorname{sgn}(e)$$

# Controle de Impedância/Admitância

- ▶ Carga ativa realizada por ponte-H:

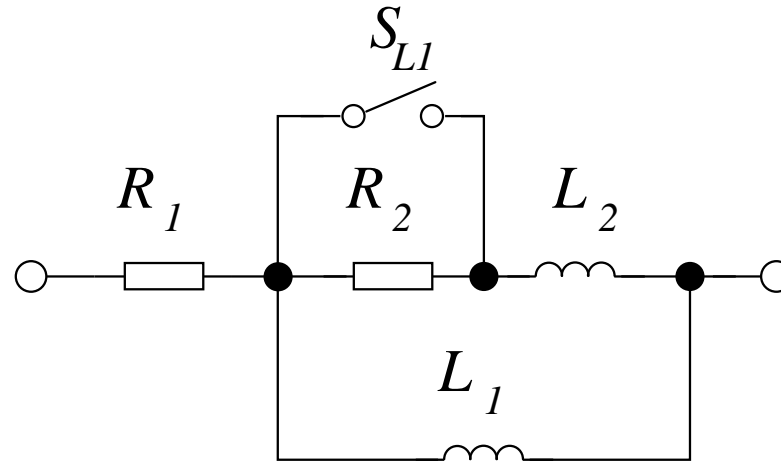


- ▶ MRAC: sinal de controle PWM
- ▶ VS-MRAC: aciona diretamente as chaves

# Exemplo: Controle de Admitância



► Carga passiva:



► Modelo de referência:

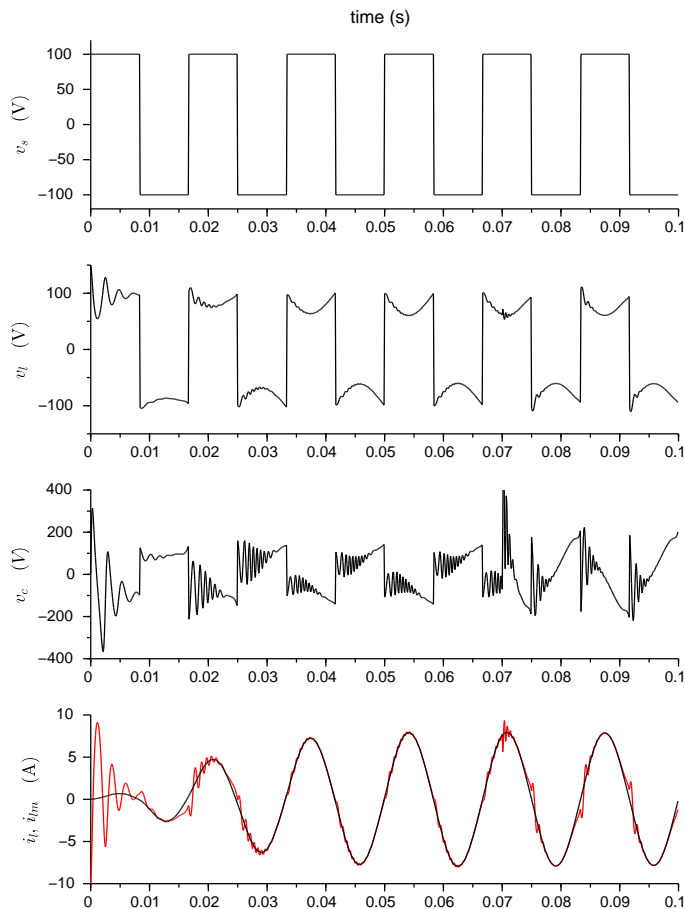
$$G_{m2}(s) = k_m \frac{s^2(s + 2\pi f_c)}{[s^2 + 2\zeta(2\pi f_r)s + (2\pi f_r)^2]^2}$$

$$G_{m1}(s) = \frac{1}{s + 2\pi f_c}$$

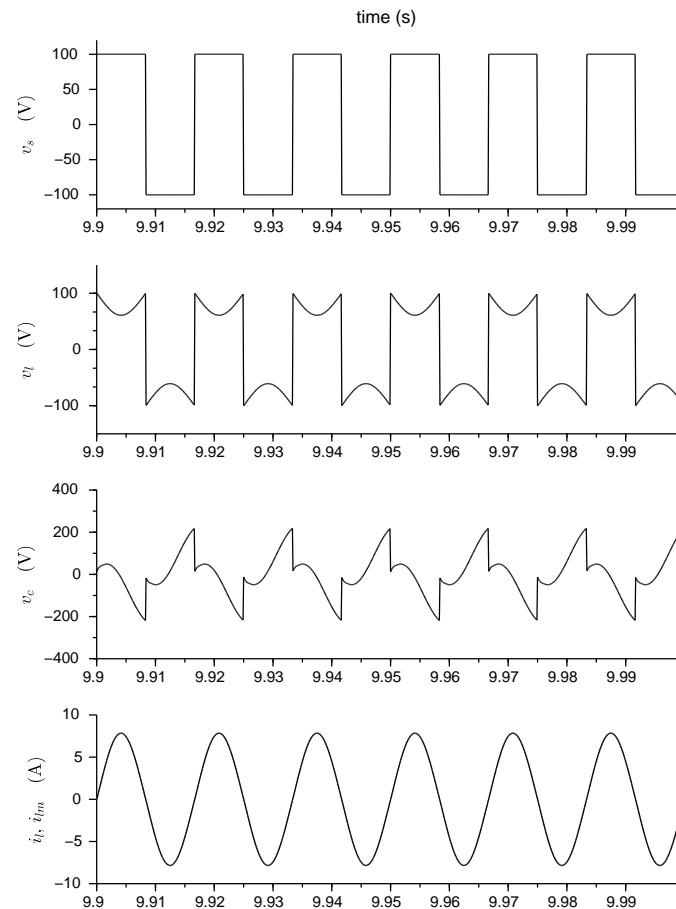
▷  $\zeta = 0.2$ ,  $f_r = 60 \text{ Hz}$ ,  $k_m = 2 \text{ kS rad}^2 \text{ s}^2$

▷  $f_c = 300 \text{ Hz}$

# Exemplo: Controle de Admitância



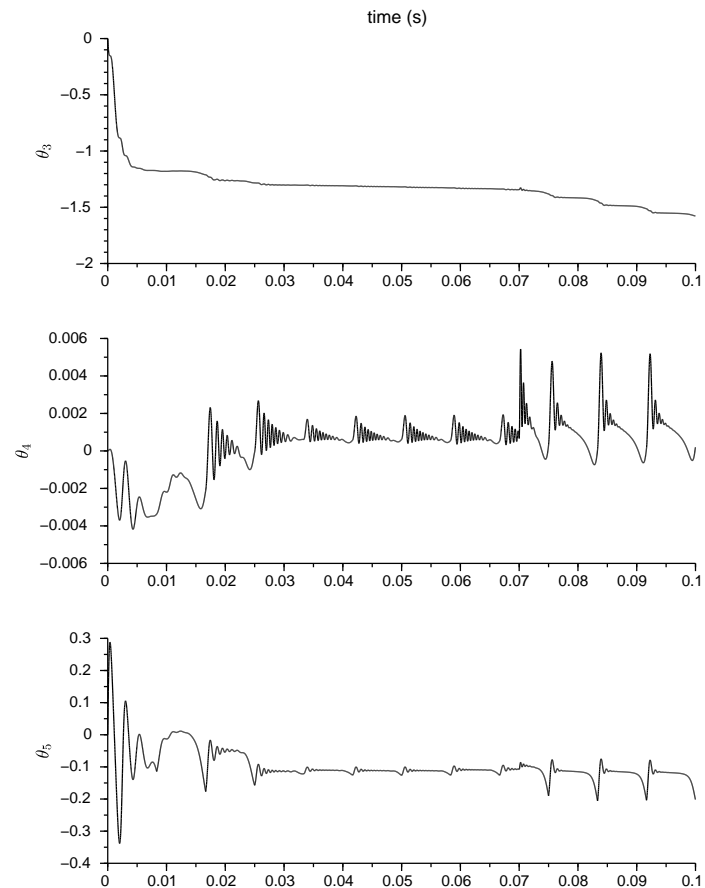
**Transitório dos sinais do MRAC**



**Sinais do MRAC em regime**

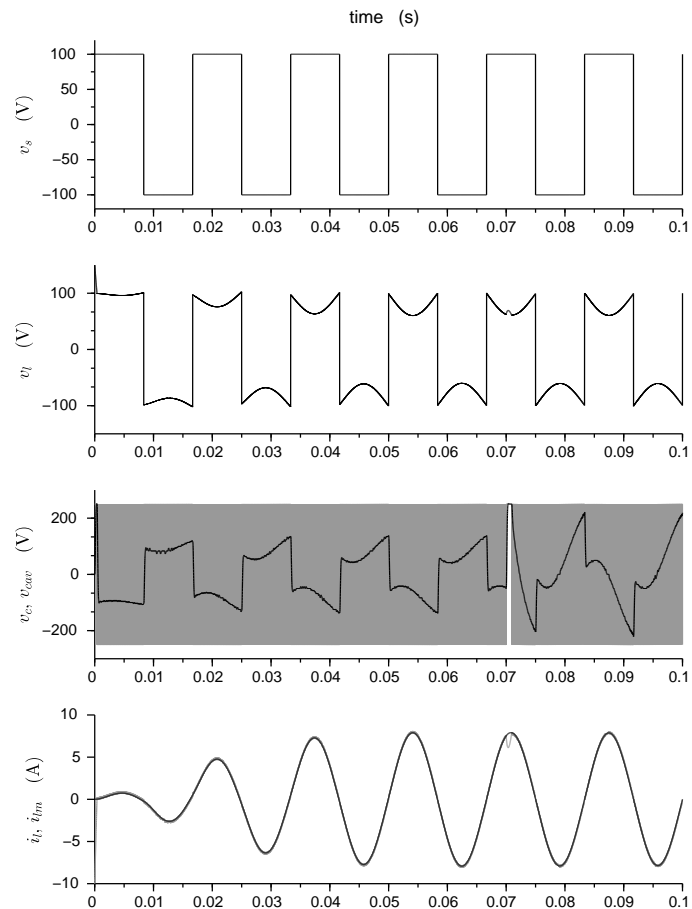


# Exemplo: Controle de Admitância



## Parâmetros do MRAC

# Exemplo: Controle de Admitância



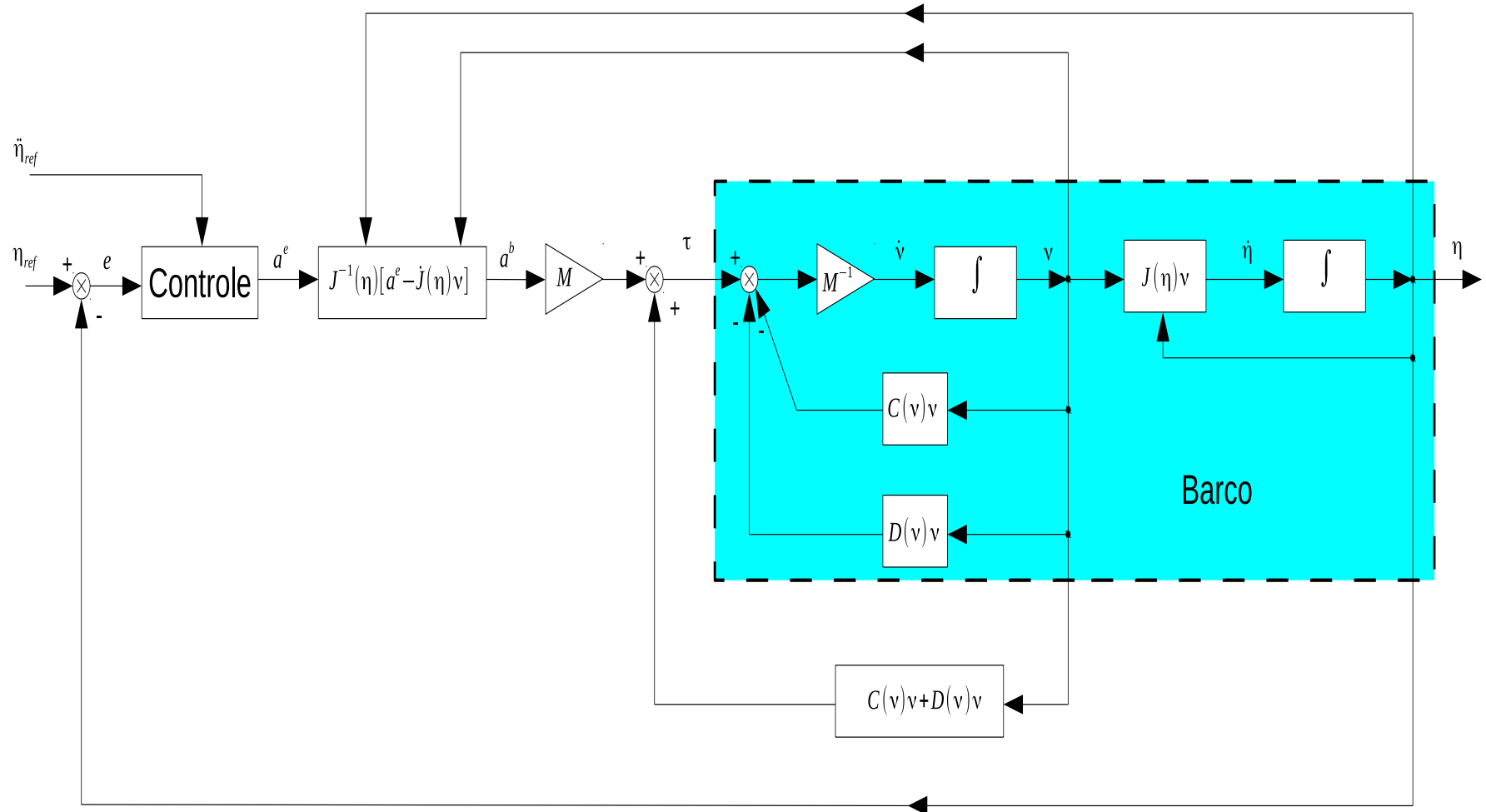
**Sinais do VSMRAC**

# Controle de Sistemas Navais



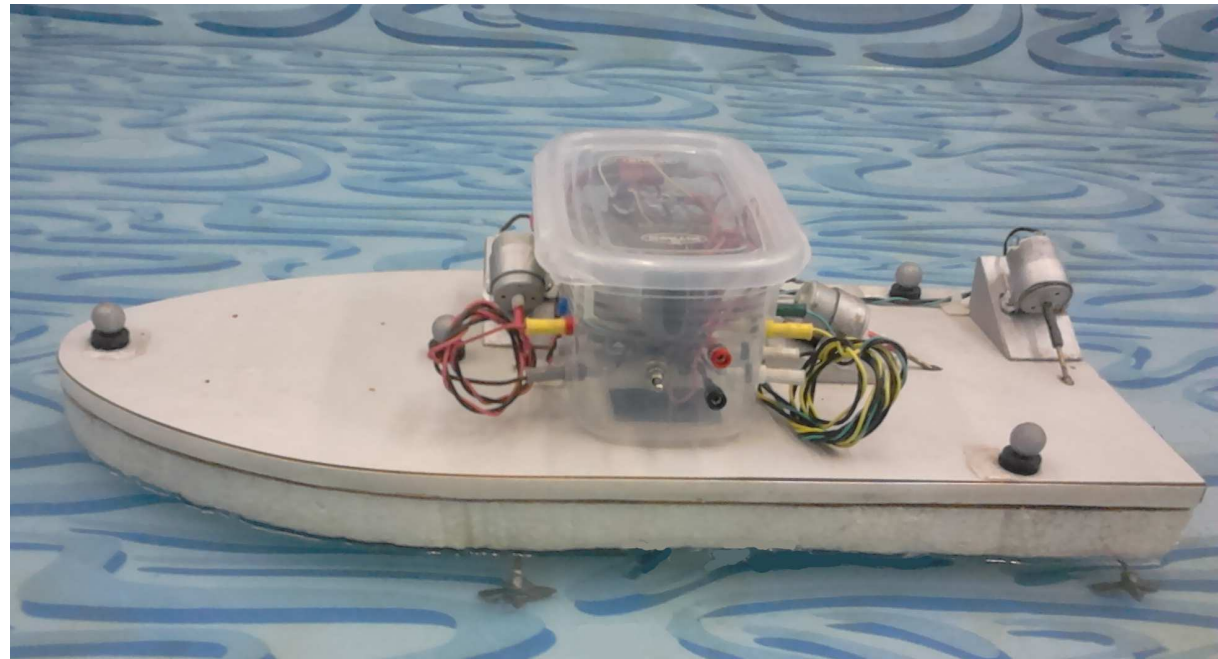
- ▶ Características dos sistemas navais:
  - ▷ Modelo hidrodinâmico muito incerto;
  - ▷ Grandes variações de parâmetros (ex.: carga);
  - ▷ Perturbações ambientais: correntezas, ondas, ventos.
- ▶ SMC bastante vantajoso!
- ▶ Aplicações:
  - ▷ VS-MRAC para robôs submarinos (ROVs) (Cunha, Costa & Hsu 1995)
  - ▷ VSC para rumo (Arruda 2012)
  - ▷ VSC para rastreamento de trajetória de veículos de superfície não tripulados (USVs) (Rosario & Cunha 2016)

# Controle de um USV



# Controle de um USV

- ▶ Barco:
  - ▷ Velocidade máxima: 0,26 m/s ;
  - ▷ Comprimento: 0,48 m ;
  - ▷ Massa: 1,3 kg .

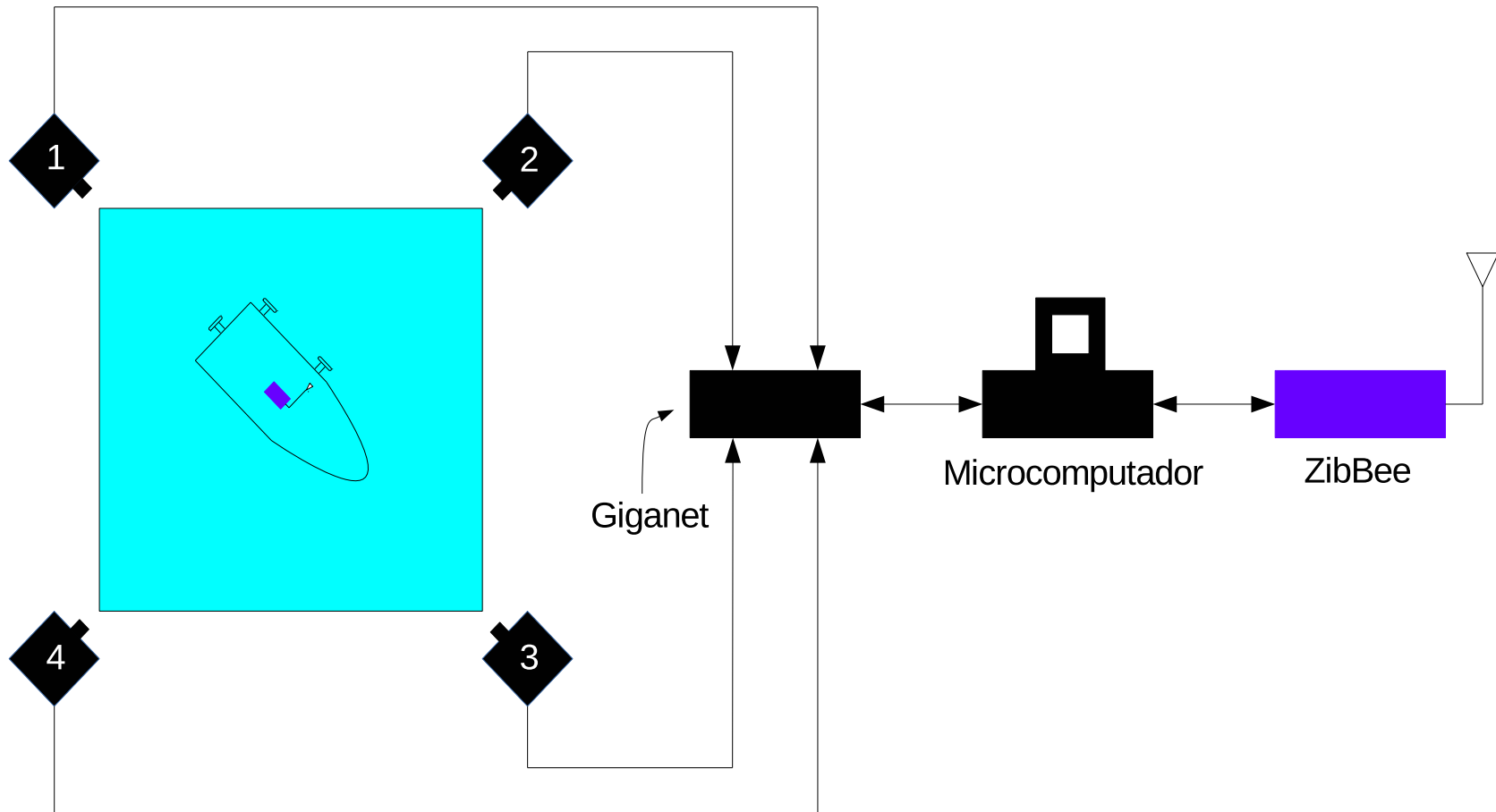


# Controle de um USV

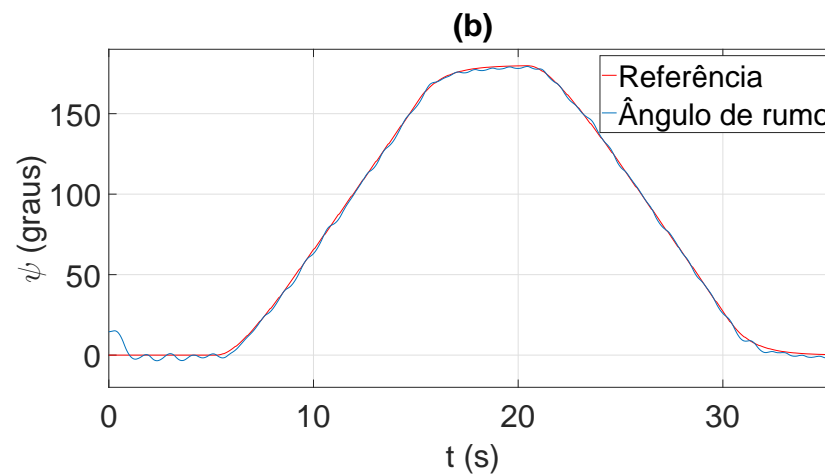
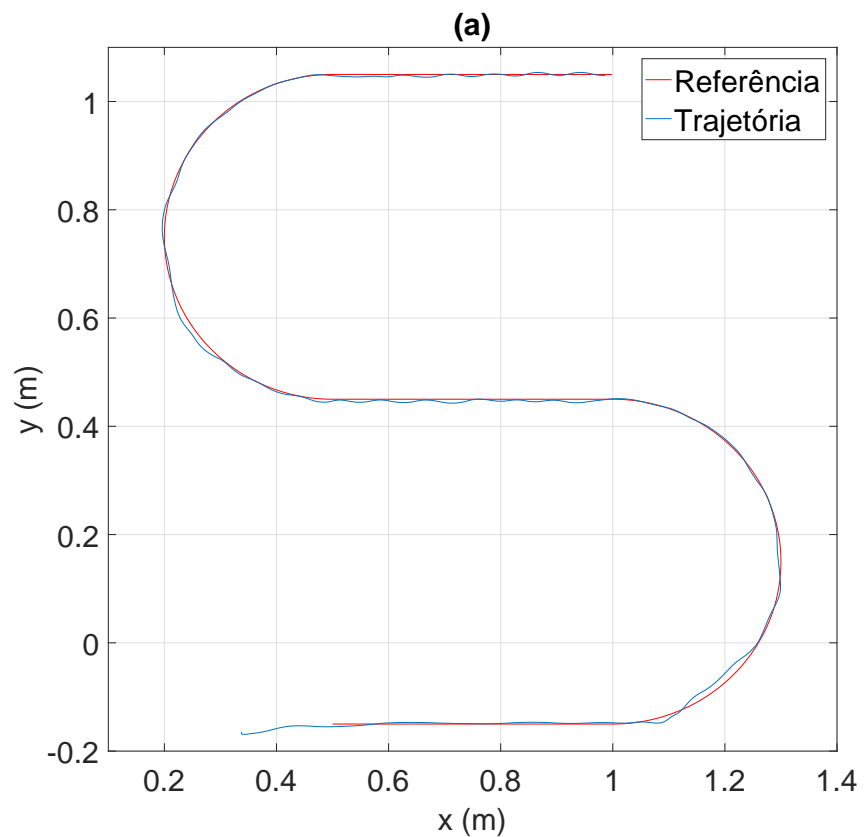


- ▶ Posição medida pelo sistema Vicon MX:
  - ▷ Quatro câmeras;
  - ▷ Frequência de amostragem até 1 kHz e precisão de 1 mm;
  - ▷ Unidade de processamento é ligada ao computador via Ethernet;
  - ▷ *Software* Vicon Tracker processa as imagens;
  - ▷ Usa LEDs praticamente infravermelhos, luz é refletida em marcadores esféricos fixados no barco;
  - ▷ *Kit* de desenvolvimento integrado ao MATLAB.
- ▶ Microcontrolador Arduino aciona motores do barco;
- ▶ Comunicação sem fio ZigBee;
- ▶ Taxa de amostragem limitada a 30 Hz pelo ZigBee.

# Controle de um USV



# Experimentos com USV





# Conclusão



- ▶ Controle por modo deslizante adequado a:
  - ▷ sistemas com parâmetros incertos;
  - ▷ sistemas sujeitos a perturbações;
  - ▷ invariância garante bom desempenho.
  
- ▶ Controle a estrutura variável:
  - ▷ adequado a atuadores chaveados (ex.: válvulas solenóides, eletrônica de potência);
  - ▷ simplicidade de implementação.
  
- ▶ Problemas:
  - ▷ chaveamentos em alta frequência;
  - ▷ *chattering*;
  - ▷ muito sensível a ruído de medição.

# Bibliografia Sugerida

- ▶ Livro clássico: (Utkin 1978).
- ▶ Referências mais atuais: (Utkin 1992), (Edwards & Spurgeon 1998) e (Utkin et al. 2009).
- ▶ Livro com técnicas mais recentes: (Shtessel et al. 2014).

# Referências

Arruda, J. W. O. (2012), ‘Controle automático de rumo de uma embarcação de superfície não tripulada’, Projeto de Graduação em Engenharia Eletrônica — UERJ, Rio de Janeiro. Disponível em <http://www.lee.uerj.br/~jpaulo/trabalhos-orientados.html>.

Coutinho, C. L., Oliveira, T. R. & Cunha, J. P. V. S. (2014), ‘Output-feedback sliding-mode control via cascade observers for global stabilisation of a class of nonlinear systems with output time delay’, *Int. J. Contr.* **87**(11), 2327–2337.

# Referências

- Cunha, J. P. V. S. & Costa, R. R. (2016), ‘Model-reference impedance and admittance control of linear systems’, *Int. J. Adaptive Contr. Signal Process.* **30**(8–10), 1317–1332.
- Cunha, J. P. V. S., Costa, R. R. & Hsu, L. (1995), ‘Design of a high performance variable structure position control of ROV’s’, *IEEE J. Oceanic Eng.* **20**(1), 42–55.
- Cunha, J. P. V. S., Costa, R. R., Lizarralde, F. & Hsu, L. (2009), ‘Peaking free variable structure control of uncertain linear systems based on a high-gain observer’, *Automatica* **45**(5), 1156–1164.

# Referências

Edwards, C. & Spurgeon, S. K. (1998), *Sliding Mode Control: Theory and Applications*, Taylor & Francis Ltd., London.

Hsu, L., Araújo, A. D. & Costa, R. R. (1994), 'Analysis and design of I/O based variable structure adaptive control', *IEEE Trans. Aut. Contr.* **39**(1), 4–21.

Hsu, L., Nunes, E. V. L., Oliveira, T. R., Peixoto, A. J., Cunha, J. P. V. S., Costa, R. R. & Lizarralde, F. (2011), Output feedback sliding mode control approaches using observers and/or differentiators, *in* L. Fridman, J. Moreno & R. Iriarte, eds, 'Sliding Modes after their First Decade of the 21st Century: State of the Art', Springer-Verlag, pp. 269–292.

# Referências

- Rosario, R. V. C. & Cunha, J. P. V. S. (2016), Experimentos de rastreamento de trajetória de uma embarcação de superfície utilizando linearização por realimentação e controle a estrutura variável, *in* 'Anais do XXI Congresso Brasileiro de Automática', Vitória – ES.
- Shtessel, Y., Edwards, C., Fridman, L. & Levant, A. (2014), *Sliding Mode Control and Observation*, Springer, New York.
- Utkin, V., Guldner, J. & Shi, J. (2009), *Sliding Mode Control in Electro-Mechanical Systems*, 2<sup>nd</sup> edn, CRC Press, Boca Raton.

# Referências

- Utkin, V. I. (1978), *Sliding Modes and Their Application in Variable Structure Systems*, MIR Publishers, Moscow.
- Utkin, V. I. (1992), *Sliding Modes in Control and Optimization*, Springer-Verlag.

# Contato



- ▶ *Homepage:* <http://www.lee.uerj.br/~jpaulo>
- ▶ *E-mail:* [jpaulo@ieee.org](mailto:jpaulo@ieee.org)
- ▶ *Telefone:* 0xx-21-2334-0027