

SEM5950 - SEM0586

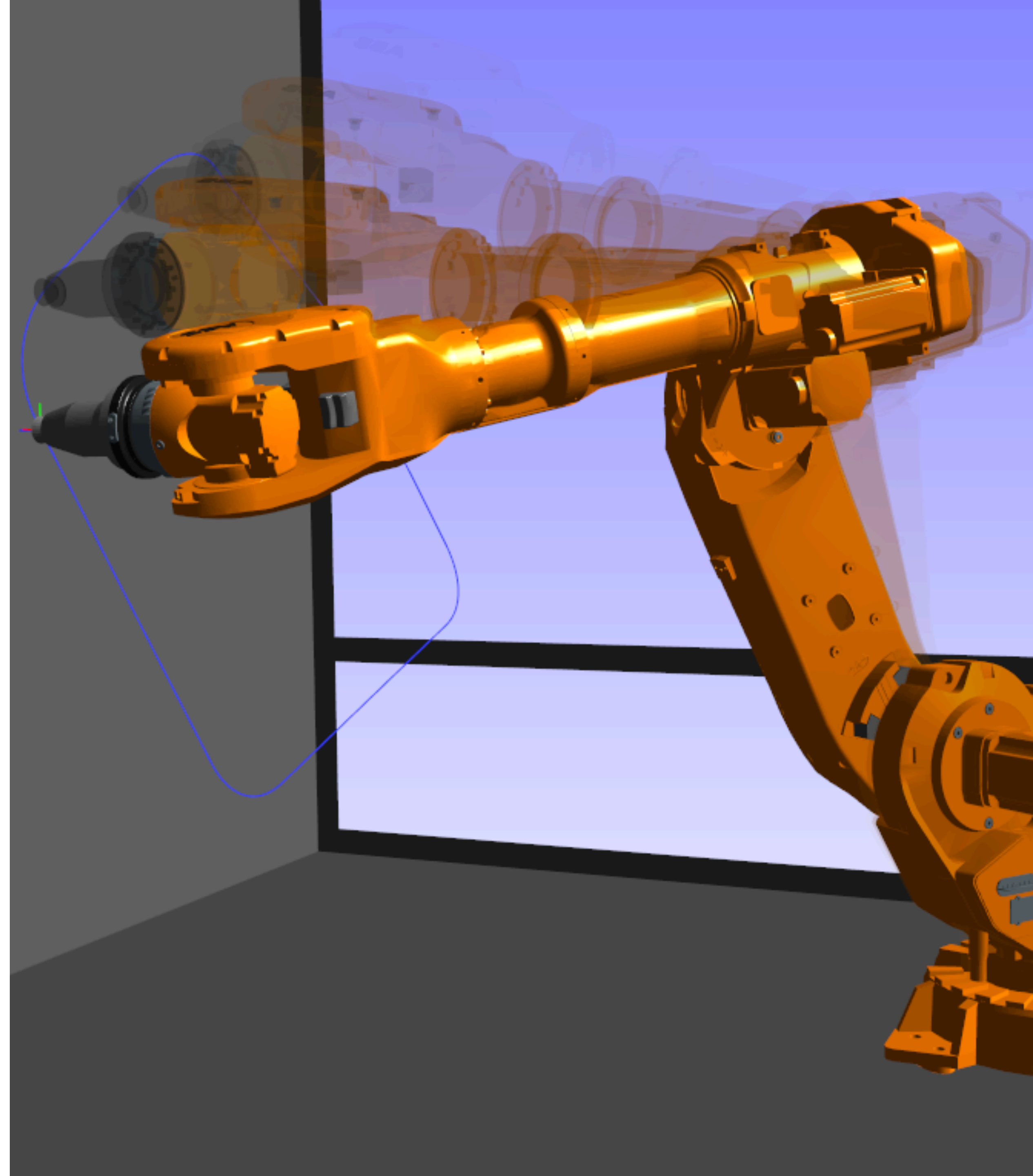
Legged Robots

Aula #3: Controle por dinâmica inversa

Prof. Dr. Thiago Boaventura
tboaventura@usp.br



São Carlos, 04/09/20



A photograph showing two technicians in a field setting. One technician on the left is wearing a black t-shirt, blue jeans, and yellow safety glasses, leaning over a motorcycle. The other technician on the right is wearing a black t-shirt, blue jeans, a black cap, and large black headphones, also leaning over the motorcycle. The motorcycle is equipped with various sensors and cables. The background is a grassy field with some trees and a building in the distance. The text 'Controlle Dinámico!' is overlaid in a large, stylized, hand-drawn font.

Controlle Dinámico!

Boston Dynamics

Conteúdo



- Controle feedforward
- Realimentação linearizante
- Dinâmica de corpos rígidos

Revisão



- DI em espaço de juntas
- DI em espaço cartesiano

Dinâmica
inversa



- Take-home messages
- Bibliografia

Conclusão

Conteúdo



- **Controle feedforward**
- Realimentação linearizante
- Dinâmica de corpos rígidos

Revisão

Dinâmica
Inversa

Conclusão

Malha aberta vs. Malha fechada

Revisão



Sistema de controle que **não** utiliza **realimentação**



Sistema de controle que **utiliza realimentação**



Dinâmica Inversa

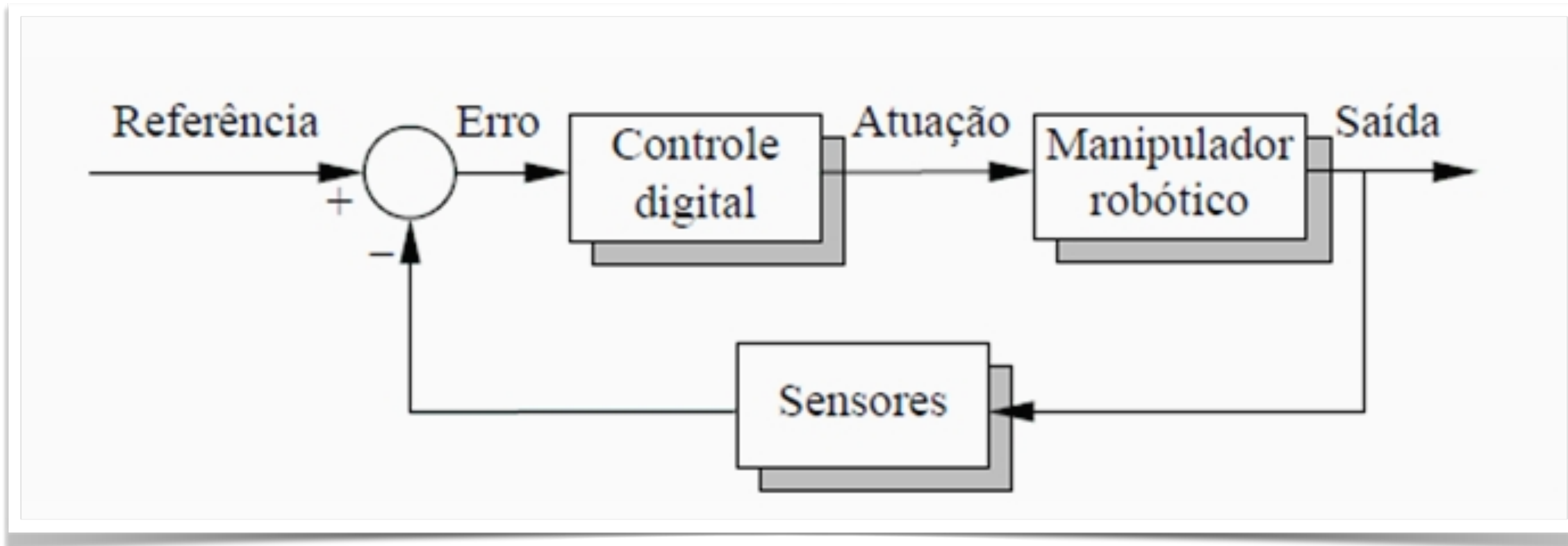
Conclusão

Sistemas realimentados

Revisão

Dinâmica Inversa

Conclusão



Sistemas realimentados em cascata

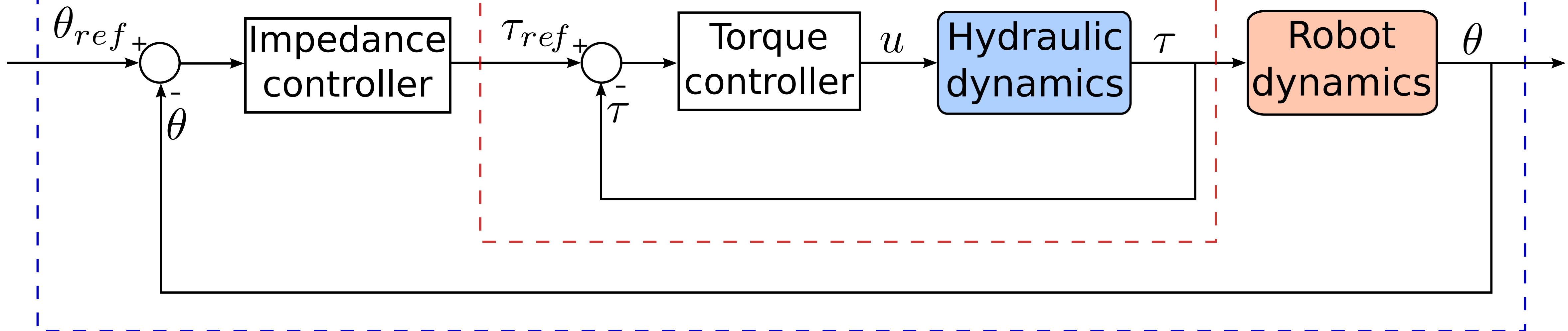
Revisão

Dinâmica Inversa

Conclusão

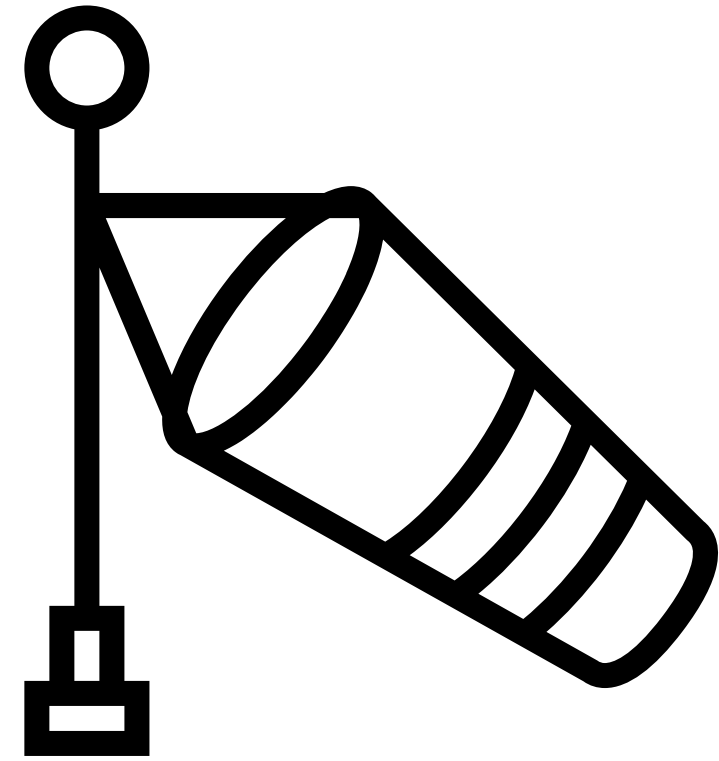
Outer Impedance Loop

Inner Torque Loop



Controladores feedforward

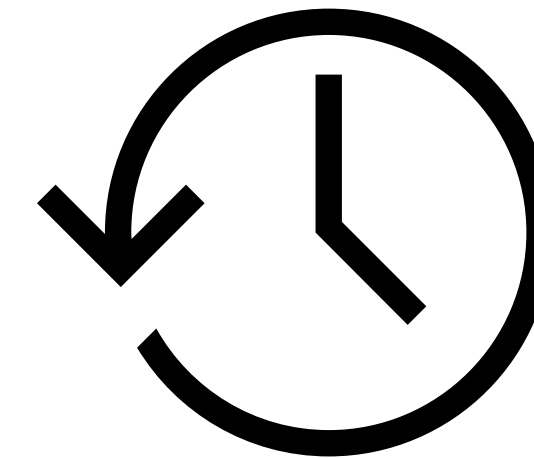
Revisão



Visa **minimizar**
erros de
seguimento
da **variável controlada**

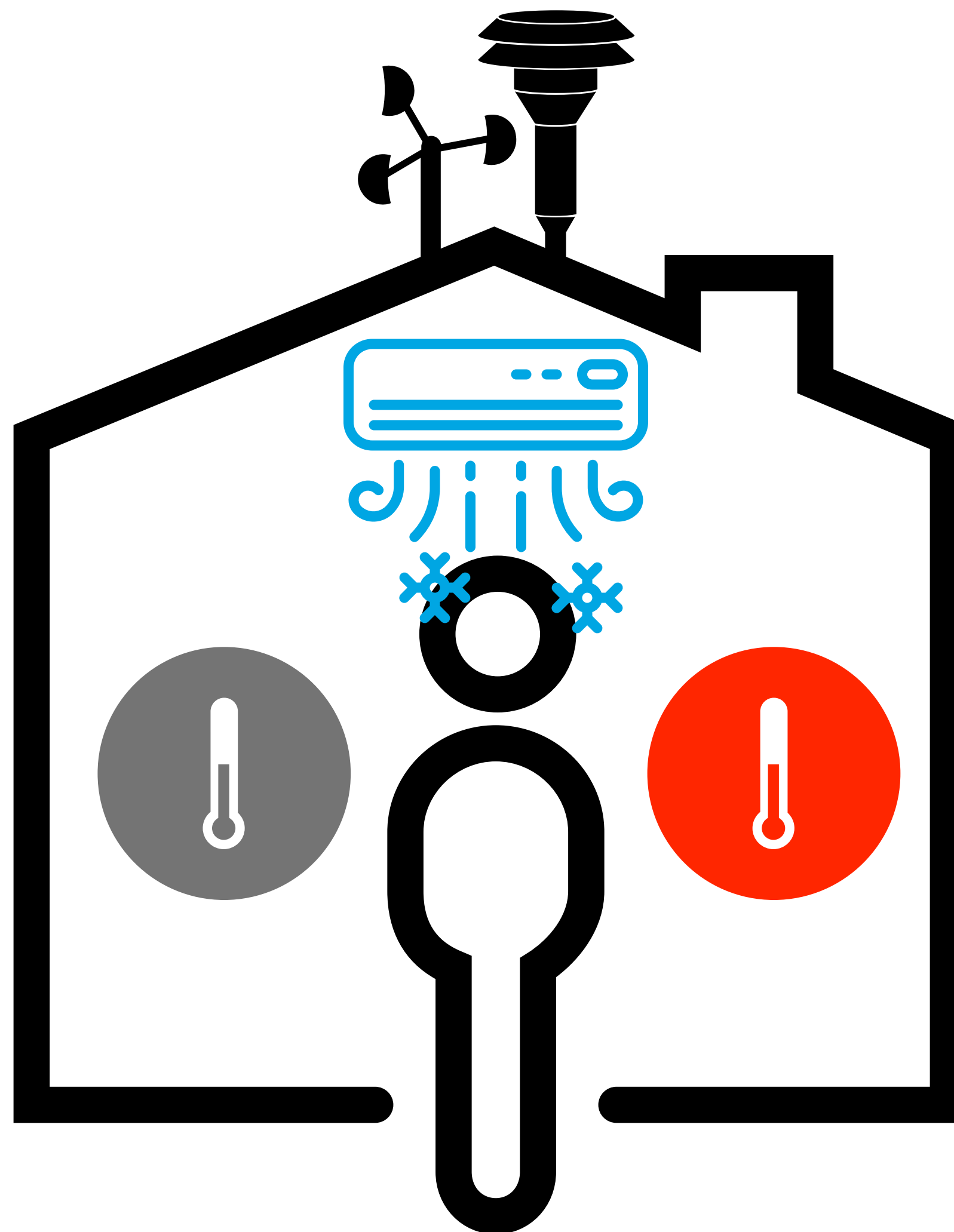
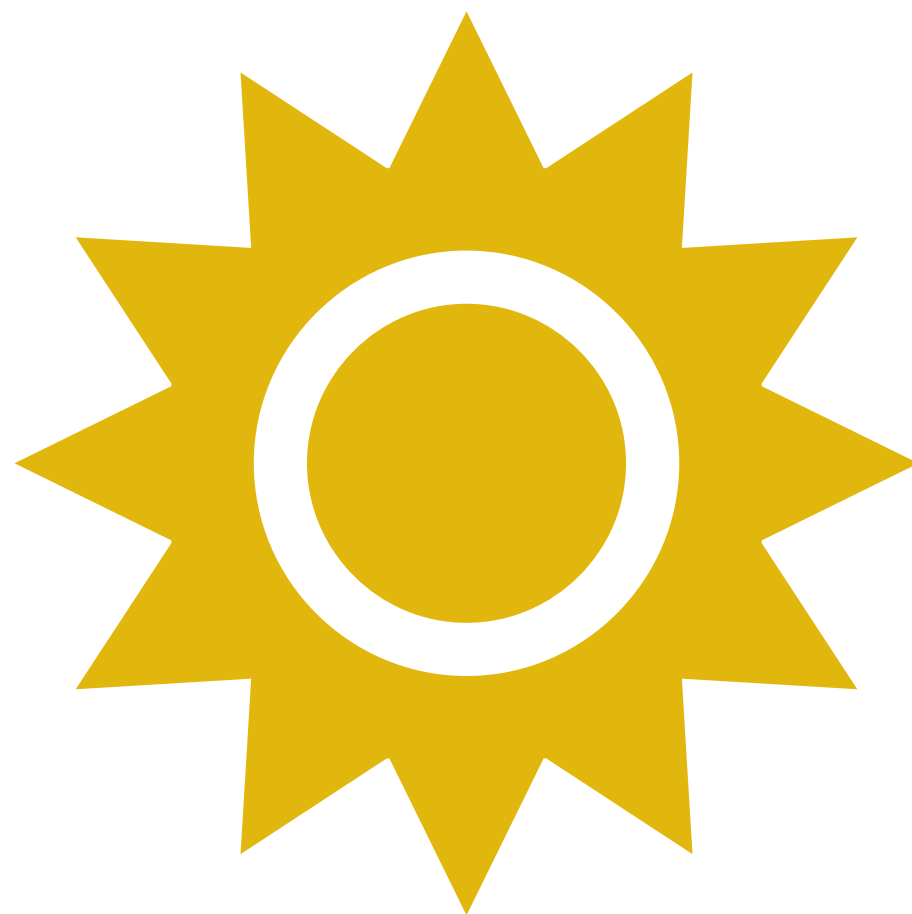
Dinâmica
Inversa

Agindo de maneira
antecipatória



Conclusão

Controladores feedforward



Revisão

Dinâmica Inversa

Conclusão

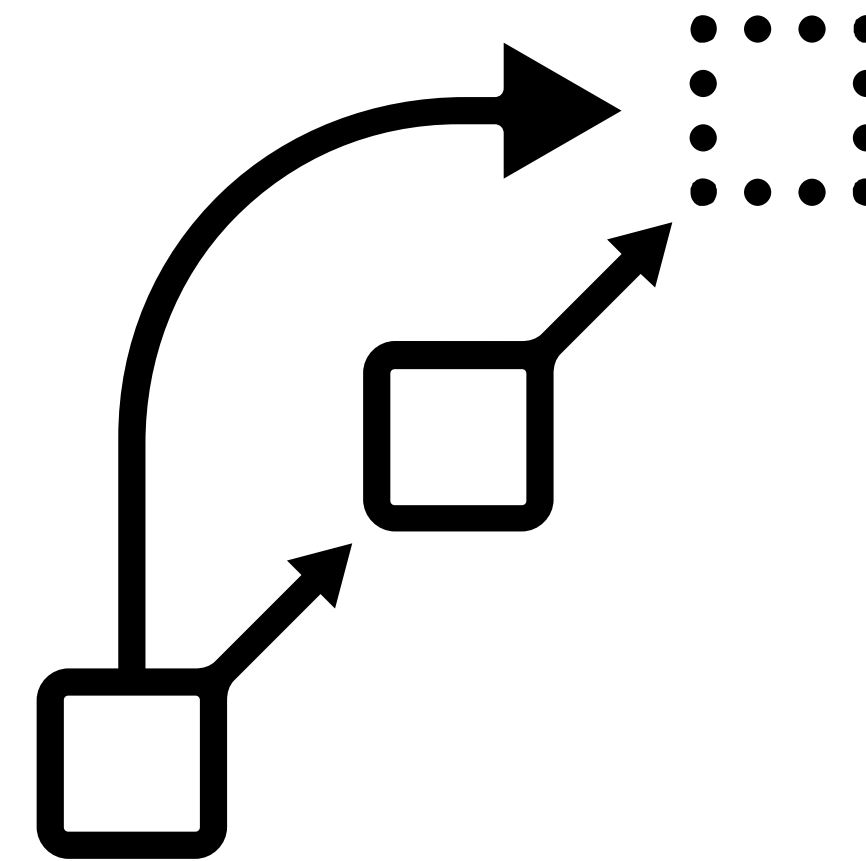
Controladores feedforward

Revisão

Também chamado de:

Controle
antecipatório

Alimentação direta



Dinâmica
Inversa

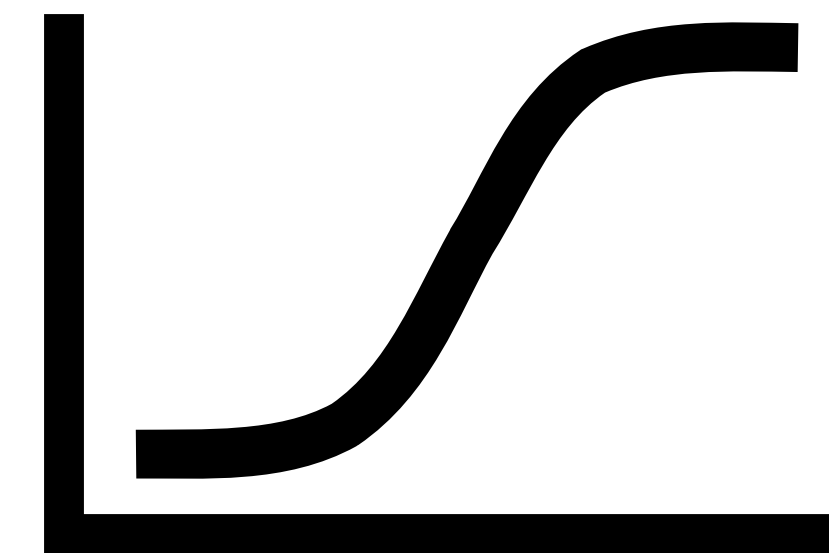
Conclusão

Controladores feedforward

Revisão



Distúrbios



Referência

Dinâmica
Inversa

Conclusão

Controladores feedforward

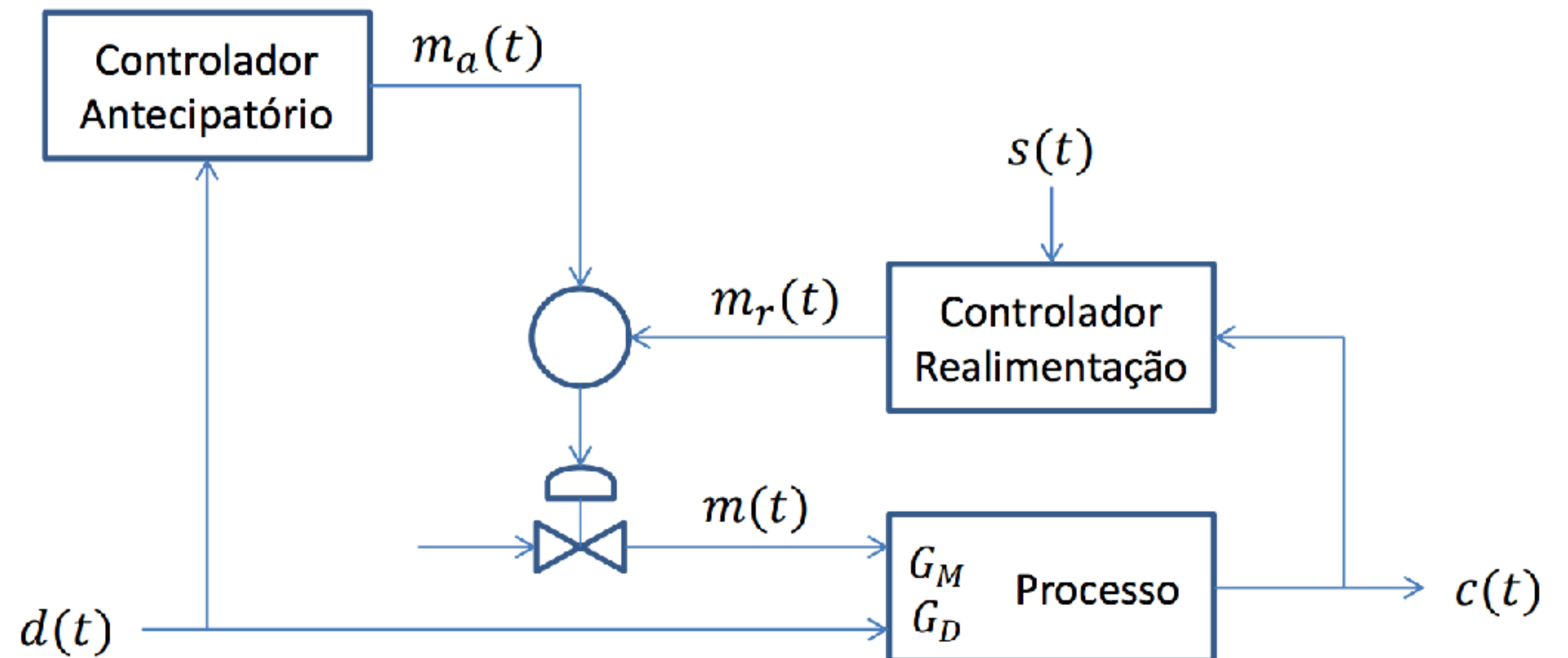
Revisão



Distúrbios

Dinâmica Inversa

Conclusão

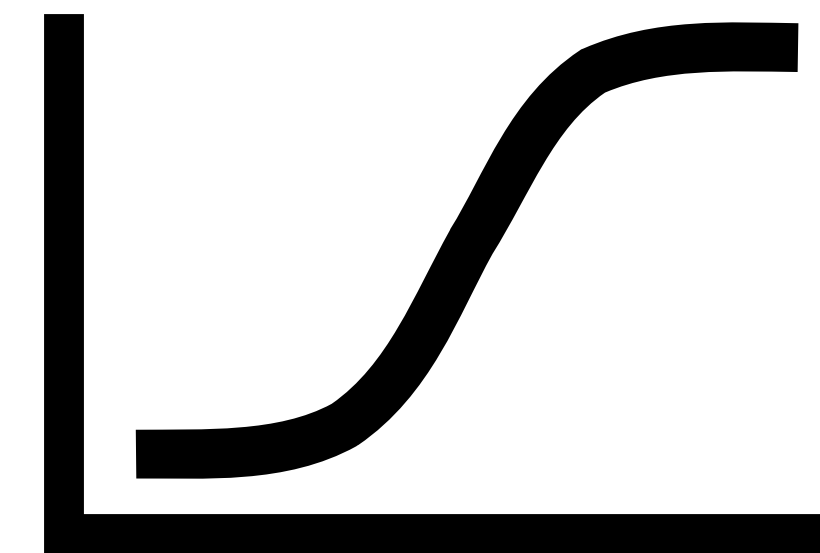
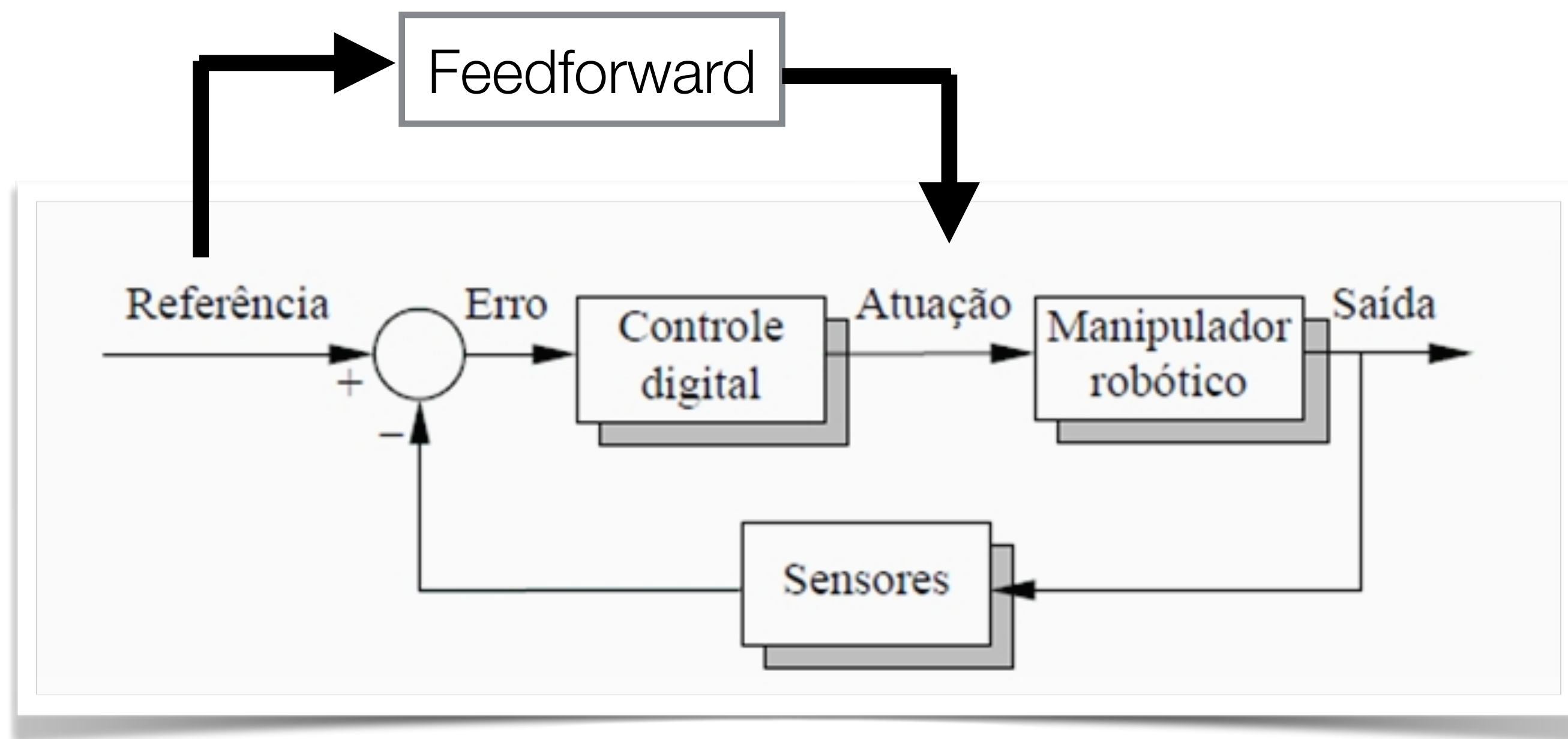


Controladores feedforward

Revisão

Dinâmica Inversa

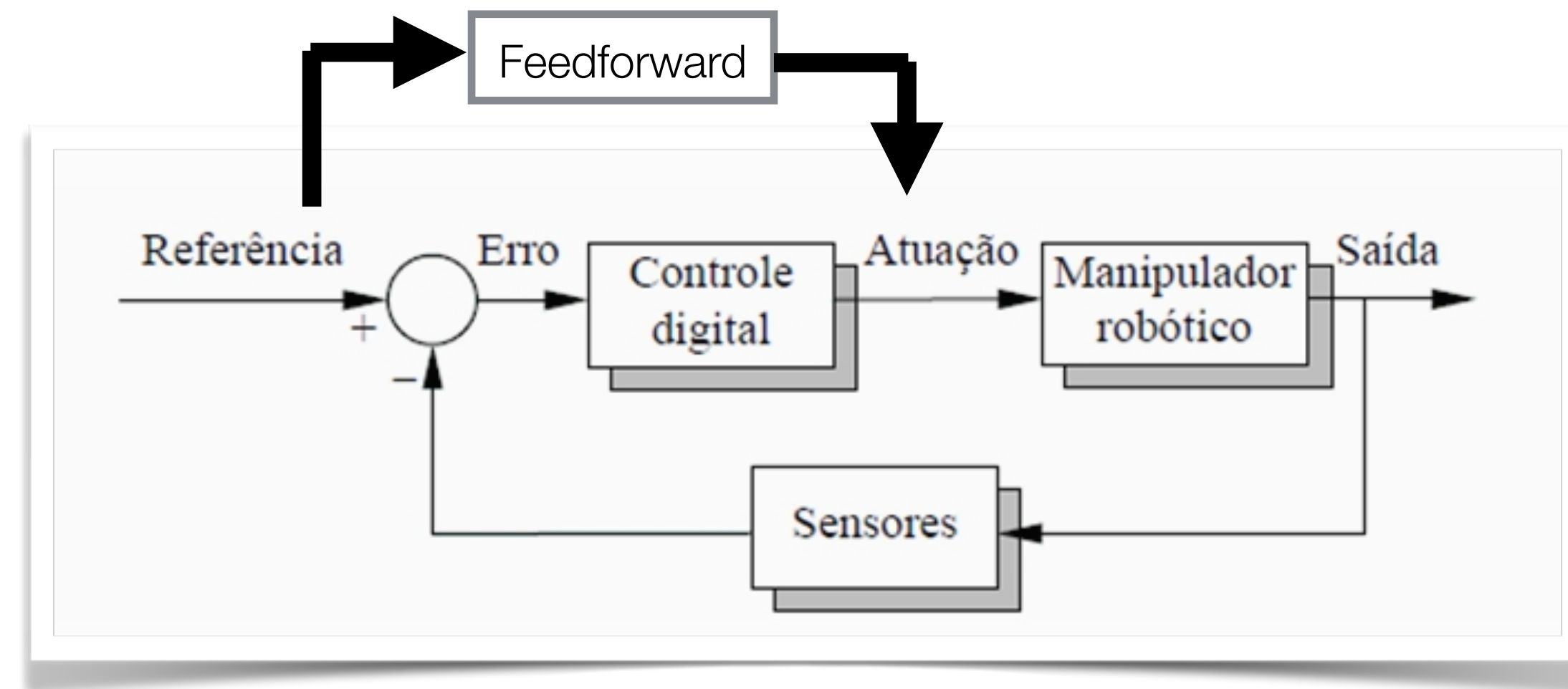
Conclusão



Referência

Controladores feedforward

Revisão



controlador de **malha aberta**



exige **conhecimento** da **dinâmica** do processo

Conclusão

Conteúdo



- Controle feedforward
- **Realimentação linearizante**
- Dinâmica de corpos rígidos

Revisão

Dinâmica
Inversa

Conclusão

Realimentação linearizante da saída

Revisão

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u$$

$$u_{FL} = \frac{1}{g(x)} (v - f(x))$$


$$\dot{x} = v$$

Dinâmica
Inversa

Conclusão

Realimentação linearizante da saída

Revisão

$$\dot{x} = v$$


$$v = \dot{x}_{ref} + K_p(x_{ref} - x)$$

$$\dot{x} = \dot{x}_{ref} + K_p(x_{ref} - x)$$

$$e = x_{ref} - x$$

$$\dot{e} + K_p e = 0$$

Dinâmica
Inversa

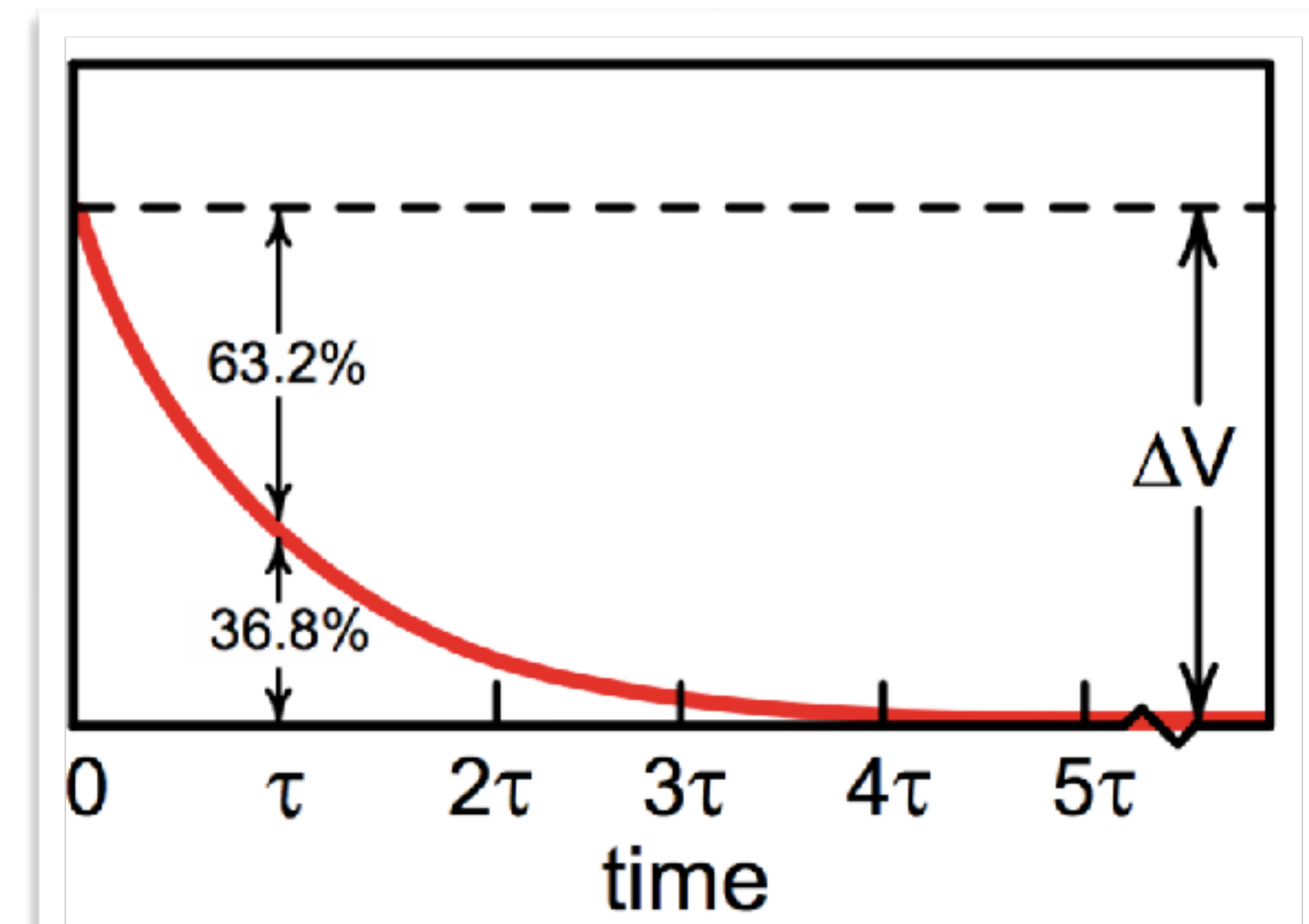
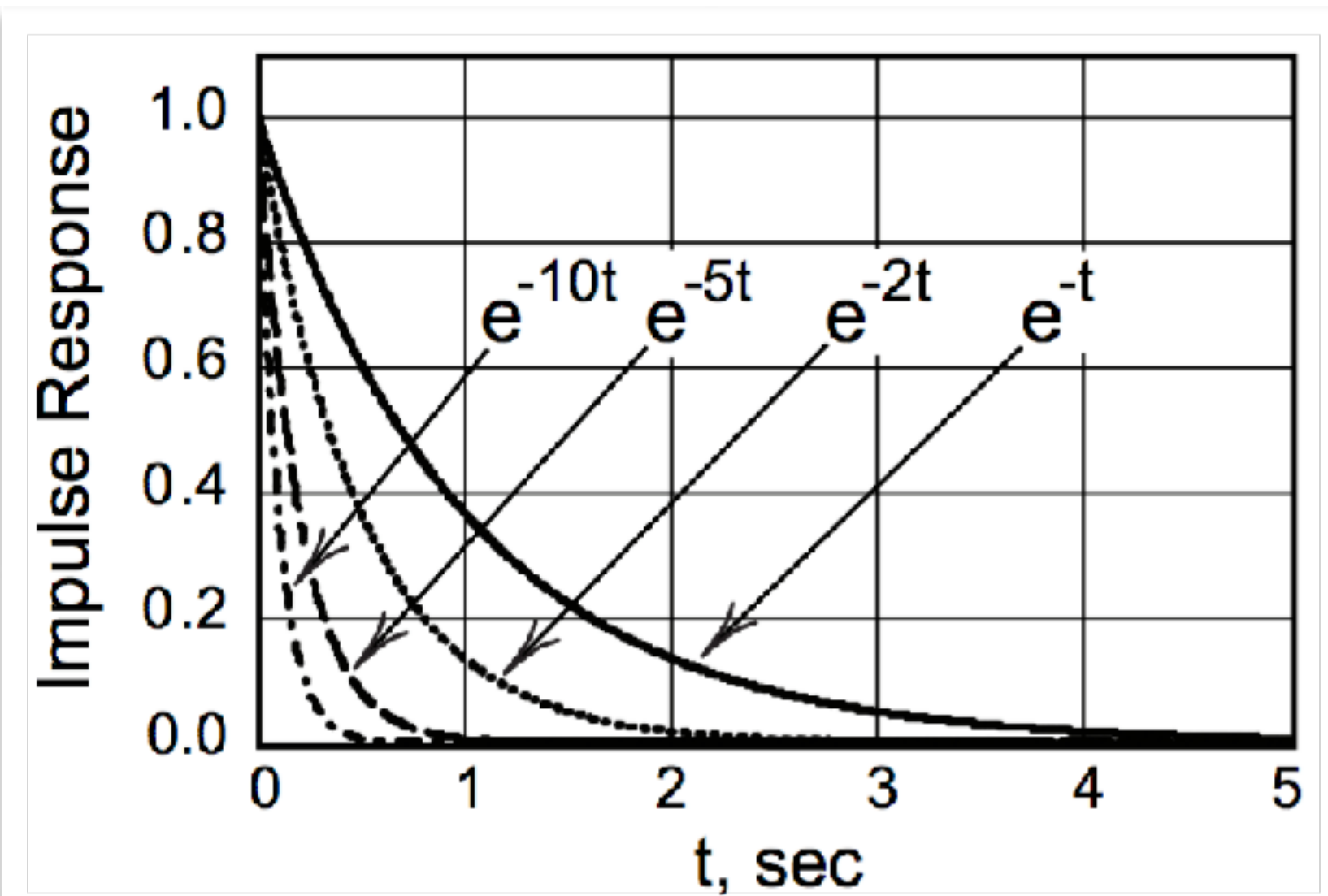
Conclusão

Realimentação linearizante da saída

Revisão

$$\dot{e} + K_p e = 0$$

$$\tau = \frac{1}{K_p}$$



Dinâmica Inversa

Conclusão

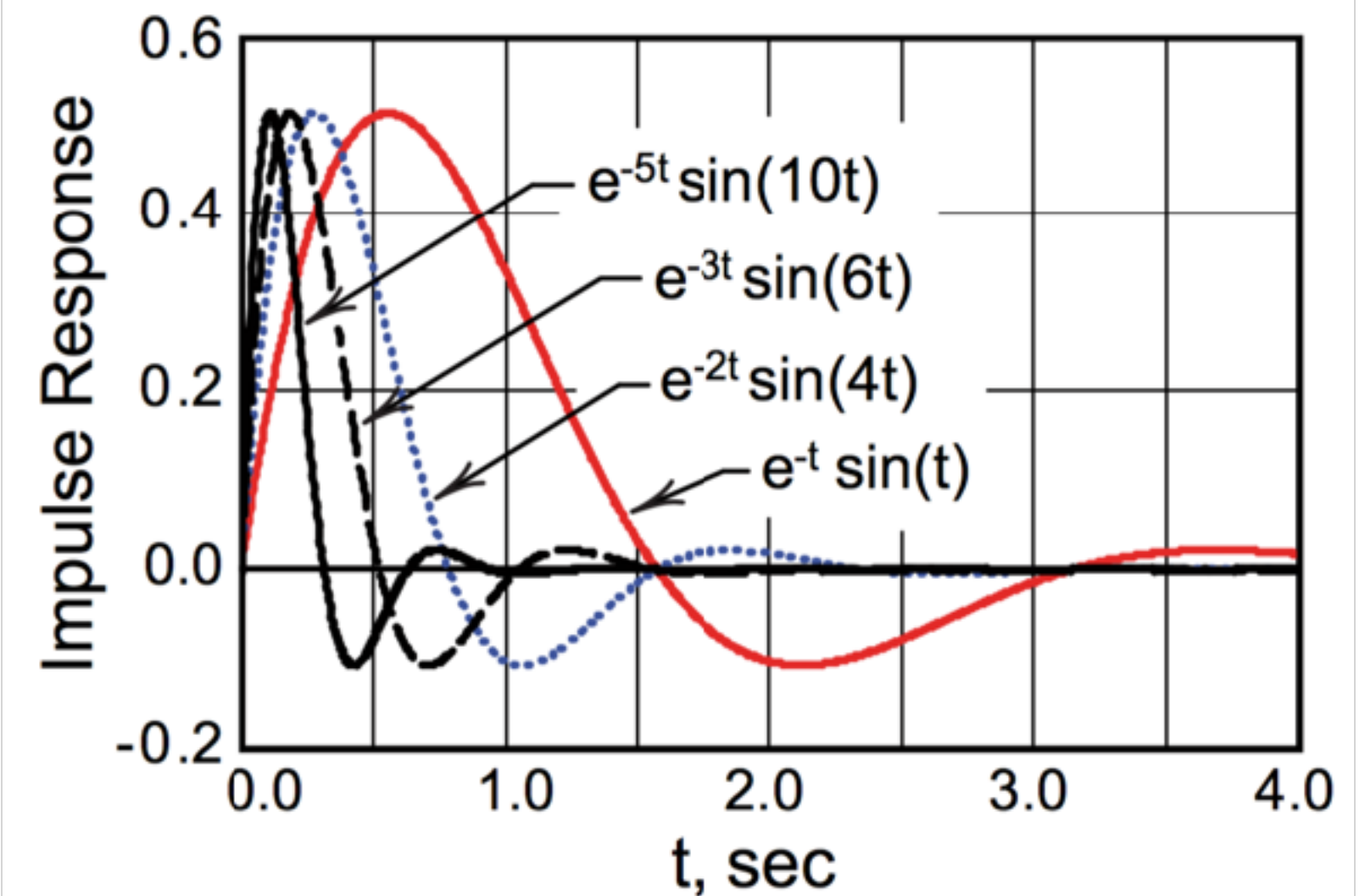
Realimentação linearizante da saída

Revisão

$$\dot{x} = v$$

$$v = \dot{x}_{ref} + K_p e + K_i \int e$$

$$\ddot{e} + K_p \dot{e} + K_i e = 0$$



Dinâmica Inversa

Conclusão

Conteúdo



- Controle feedforward
- Realimentação linearizante
- **Dinâmica de corpos rígidos**

Revisão

Dinâmica
Inversa

Conclusão

Dinâmica de corpo rígido

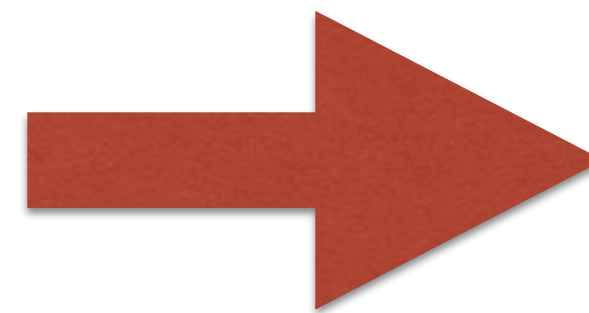
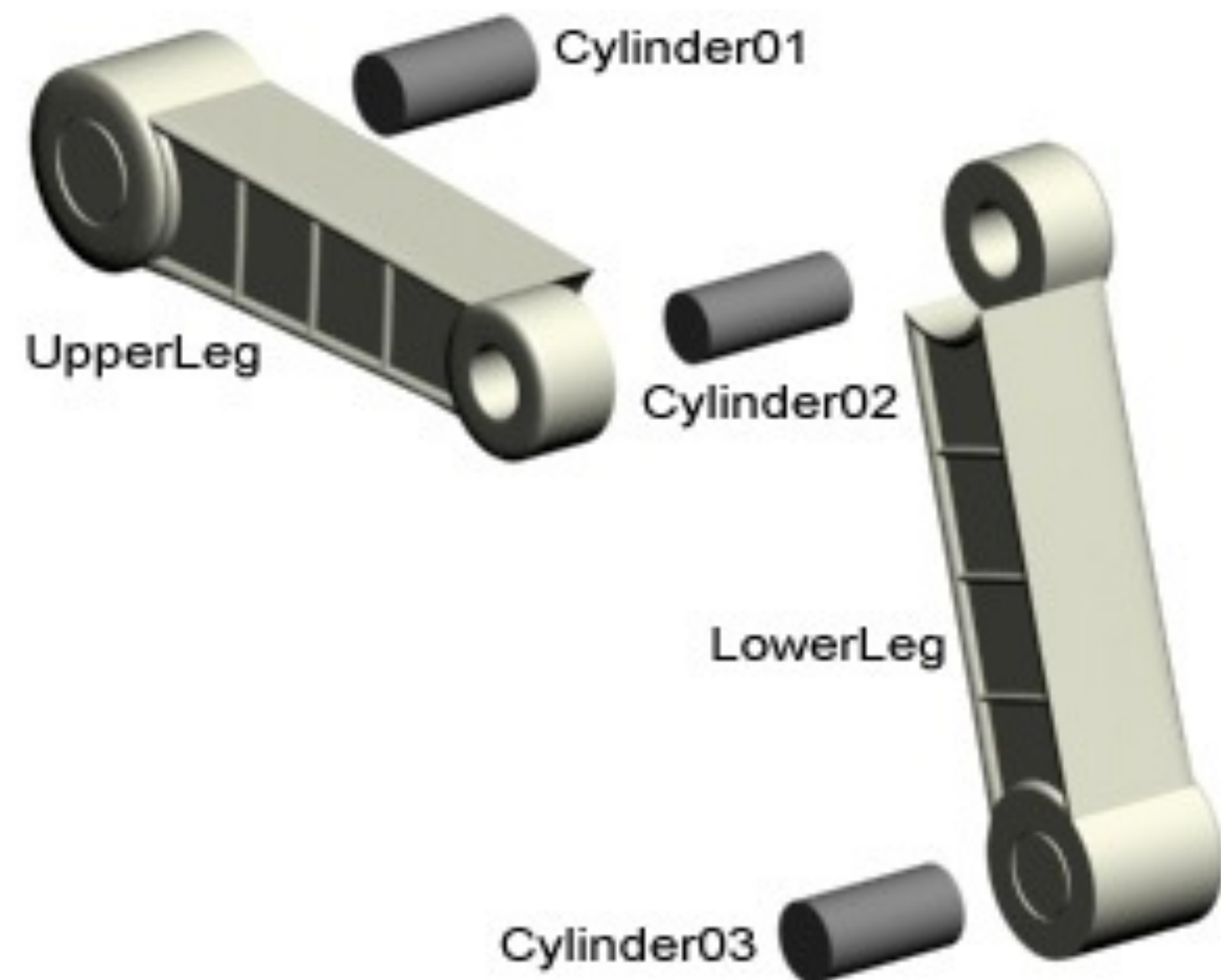
Revisão

Dinâmica Inversa

Conclusão



Corpos não se deformam!



Cyberdyne Inc.

Dinâmica de corpo rígido

Revisão

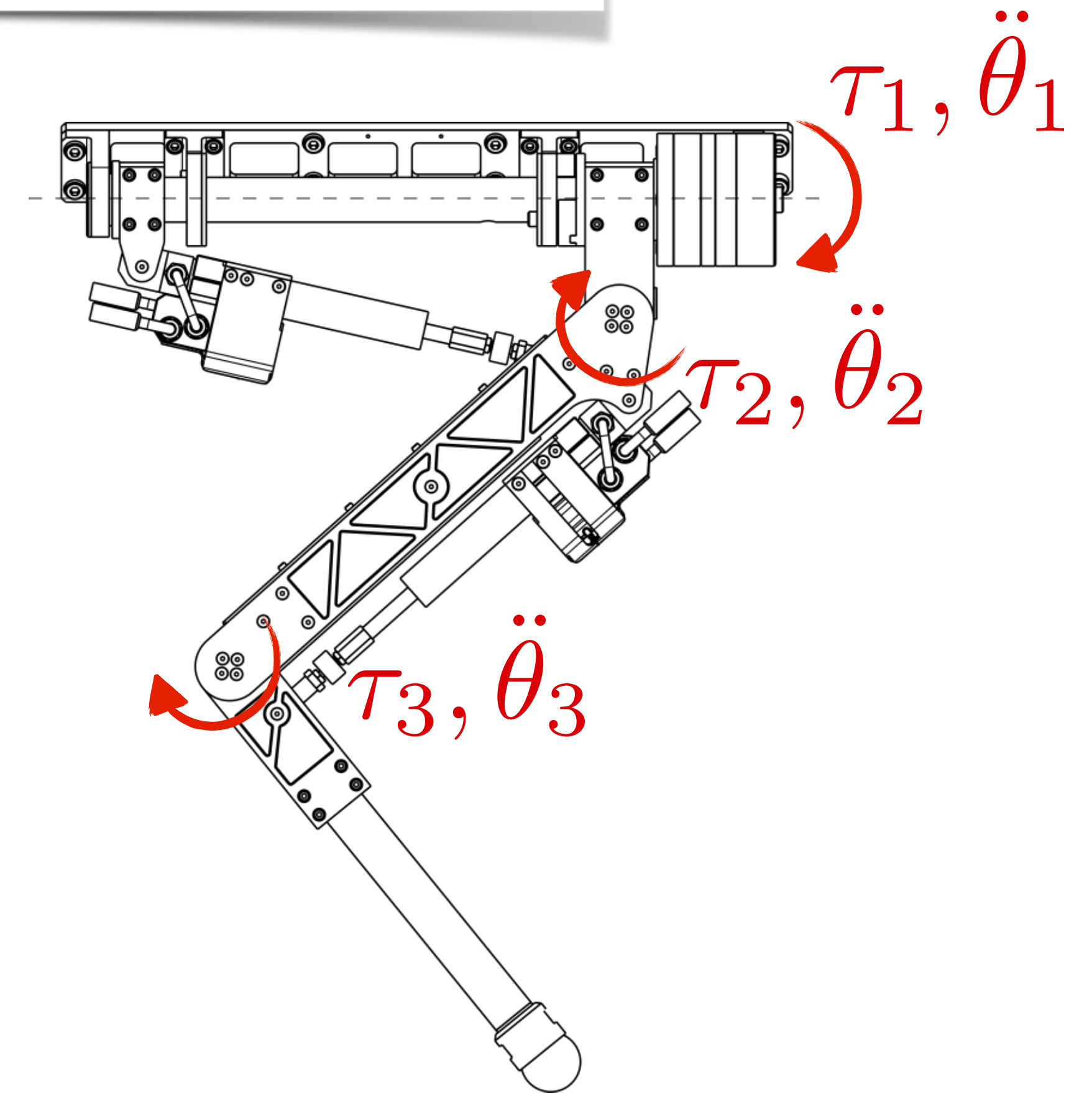
$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - \boldsymbol{\tau} = \mathbf{0}$$

Dinâmica direta (p/ **simulação**)

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{M}(\mathbf{q})^{-1}(\boldsymbol{\tau} - \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}))$$

“Dinâmica inversa” (p/ **controle**)

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_d + \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$$



$$\mathbf{q} = [\theta_1, \dots, \theta_n]$$

Dinâmica Inversa

Conclusão

Conteúdo

Revisão



- Torque calculado
- Dinâmica inversa no espaço de juntas

Dinâmica
inversa

Conclusão

Controle por torque calculado

“ **computed-torque control** ”

**Classe de controladores não-lineares
baseados em realimentação linearizante**



Calculam um comando (torque) usando um **conhecimento prévio** do sistema expresso através de um **modelo dinâmico**

Revisão

Dinâmica
inversa

Conclusão

Controle por torque calculado

“computed-torque control”

**Classe de controladores não-lineares
baseados em realimentação linearizante**



- 1) Dinâmica inversa
- 2) Controle feedforward não-linear

Revisão

Dinâmica
inversa

Conclusão

Dinâmica inversa

Revisão

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{M}(\mathbf{q})^{-1} (\boldsymbol{\tau} - \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}))$$

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u$$

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{f}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{G}(\mathbf{q})\boldsymbol{\tau}$$

$$\mathbf{f}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = -\mathbf{M}(\mathbf{q})^{-1}\mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \quad \mathbf{G}(\mathbf{q}) = \mathbf{M}(\mathbf{q})^{-1}$$

$$\boldsymbol{\tau}_{ID} = \mathbf{G}(\mathbf{q})^{-1} (\mathbf{v} - \mathbf{f}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}))$$

Conclusão

Dinâmica inversa

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{f}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{G}(\mathbf{q})\boldsymbol{\tau}$$

$$\boldsymbol{\tau}_{ID} = \mathbf{G}(\mathbf{q})^{-1}(\mathbf{v} - \mathbf{f}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}))$$

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{v}$$

$$\mathbf{v} = \ddot{\mathbf{q}}_{\text{ref}} + \mathbf{K}_p \mathbf{e} + \mathbf{K}_d \dot{\mathbf{e}}$$

$$\ddot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_d \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_p \mathbf{e} = \mathbf{0}$$

Revisão

Dinâmica
inversa

Conclusão

Dinâmica inversa

Revisão

$$\boldsymbol{\tau}_{ID} = \mathbf{G}(\mathbf{q})^{-1}(\mathbf{v} - \mathbf{f}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}))$$

$$\mathbf{f}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = -\mathbf{M}(\mathbf{q})^{-1}\mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$$

$$\mathbf{G}(\mathbf{q}) = \mathbf{M}(\mathbf{q})^{-1}$$

$$\mathbf{v} = \ddot{\mathbf{q}}_{\text{ref}} + \mathbf{K}_p\mathbf{e} + \mathbf{K}_d\dot{\mathbf{e}}$$

$$\boldsymbol{\tau}_{ID} = \mathbf{M}(\mathbf{q}) (\ddot{\mathbf{q}}_{\text{ref}} + \mathbf{K}_p\mathbf{e} + \mathbf{K}_d\dot{\mathbf{e}} + \mathbf{M}(\mathbf{q})^{-1}\mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}))$$

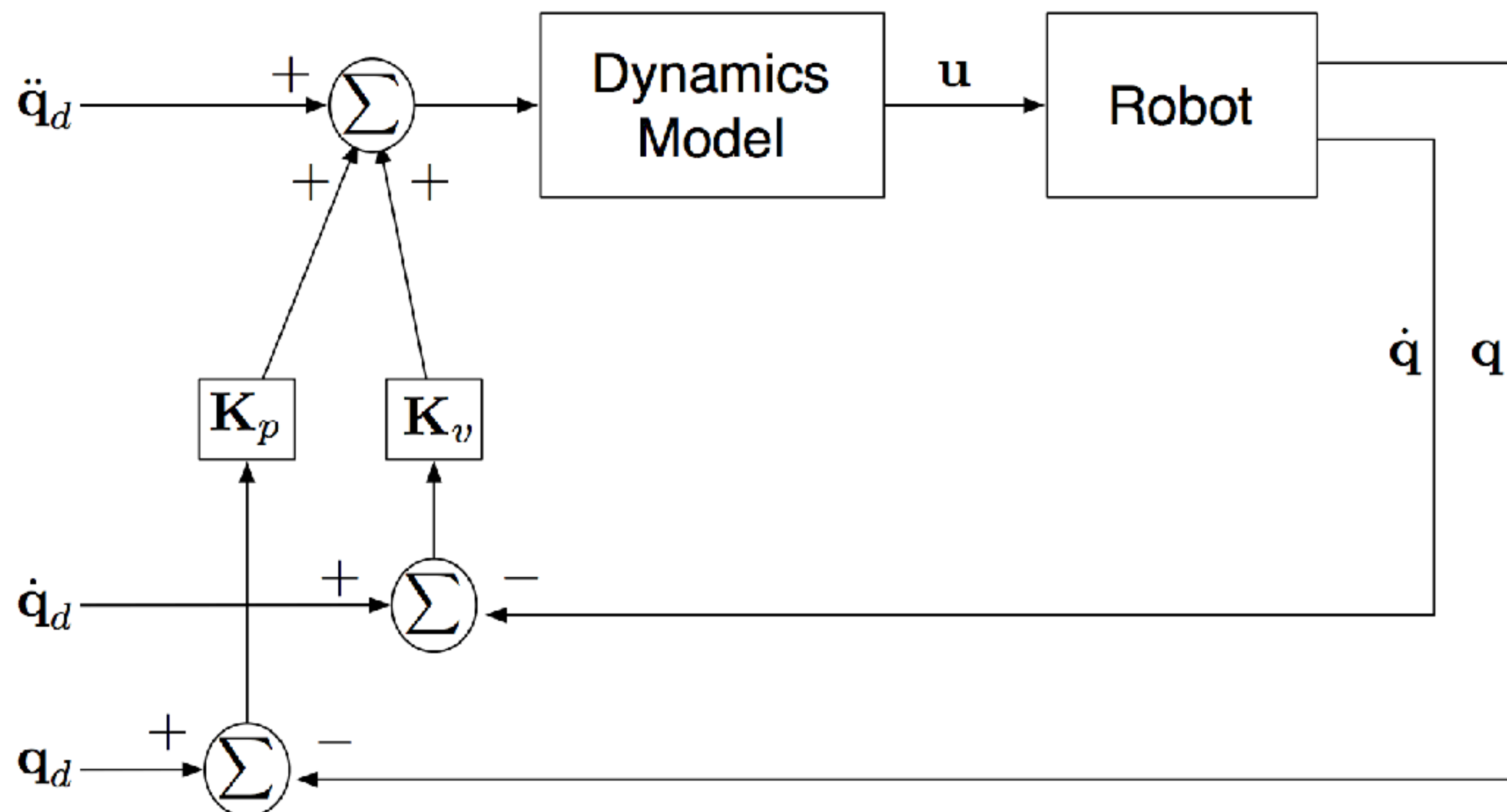
$$\boldsymbol{\tau}_{ID} = \mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_{\text{ref}} + \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{M}(\mathbf{q}) (\mathbf{K}_p\mathbf{e} + \mathbf{K}_d\dot{\mathbf{e}})$$

Dinâmica
inversa

Conclusão

Dinâmica inversa

$$\tau_{ID} = \mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_{\text{ref}} + \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{M}(\mathbf{q}) (\mathbf{K}_p \mathbf{e} + \mathbf{K}_d \dot{\mathbf{e}})$$



Revisão

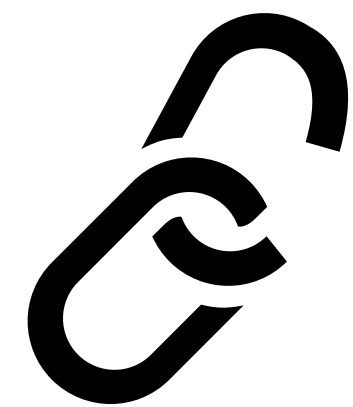
Dinâmica
inversa

Conclusão

Dinâmica inversa

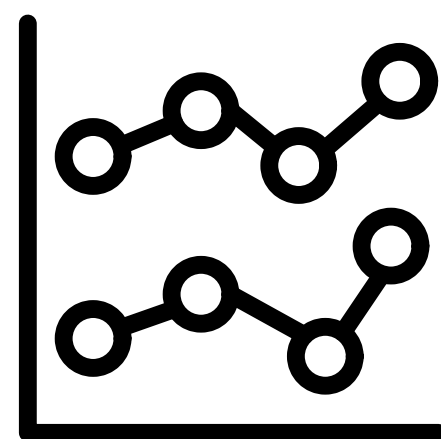
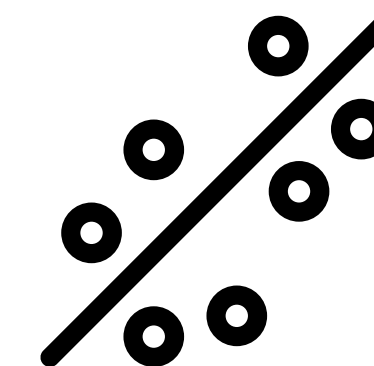
Revisão

$$\tau_{ID} = \mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_{\text{ref}} + \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{M}(\mathbf{q}) (\mathbf{K}_p \mathbf{e} + \mathbf{K}_d \dot{\mathbf{e}})$$



desacopla dinamicamente o sistema

lineariza a dinâmica do robô



ganhos de malha fechada **dependentes da posição**

Dinâmica
inversa

Conclusão

Controle por torque calculado

Revisão

Dinâmica
inversa



- 1) Dinâmica inversa
- 2) Controle feedforward não-linear

Conclusão

Controle feedforward não-linear

Simplificação da dinâmica inversa:

$$\tau_{ID} = \mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_{\text{ref}} + \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \cancel{\mathbf{M}(\mathbf{q})} (\mathbf{K}_p \mathbf{e} + \mathbf{K}_d \dot{\mathbf{e}})$$

$$\tau_{ff} = \mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_{\text{ref}} + \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$$

$$\tau_{fb} = \mathbf{K}_p \mathbf{e} + \mathbf{K}_d \dot{\mathbf{e}}$$

$$\tau = \tau_{ff} + \tau_{fb}$$

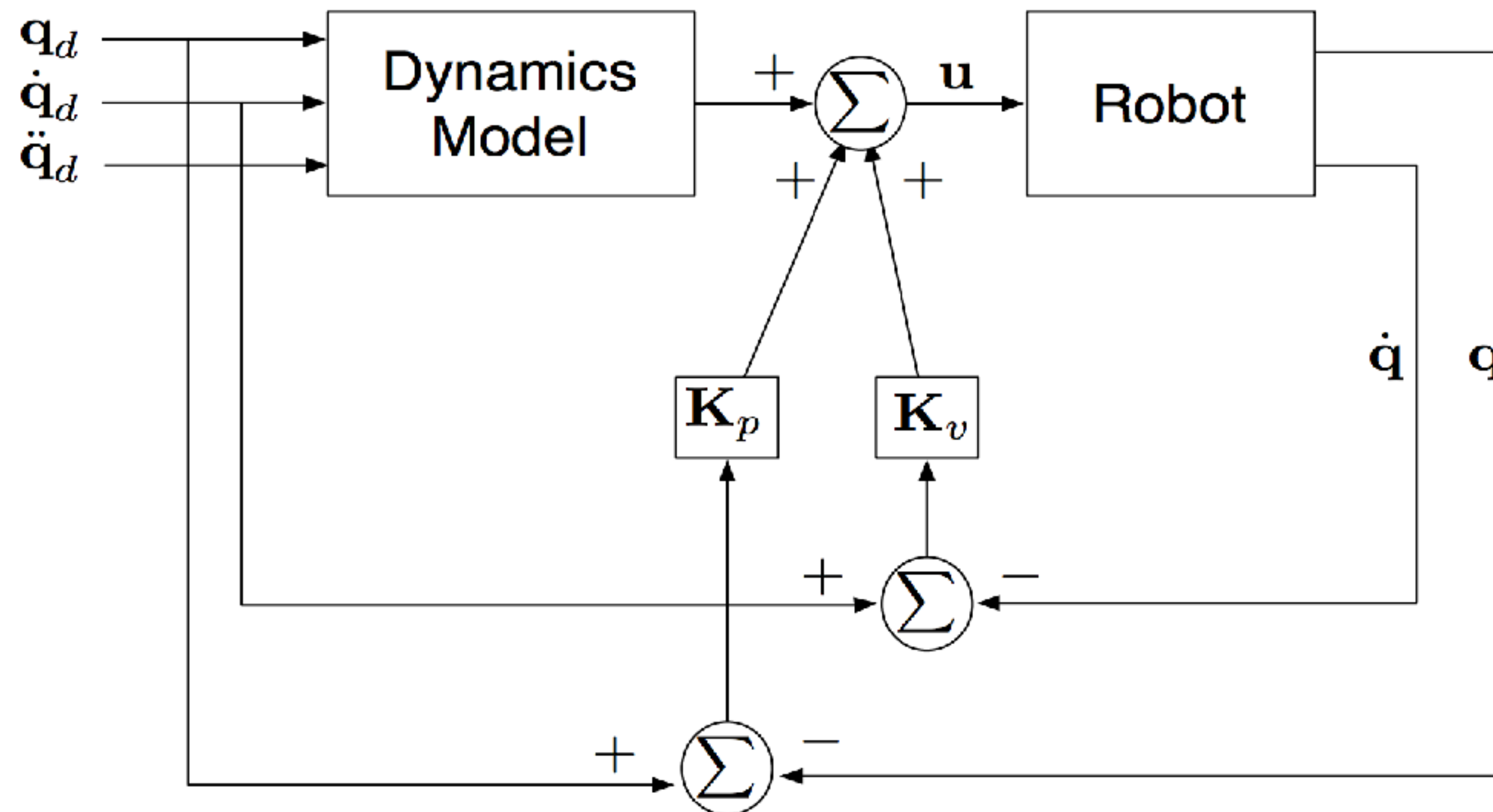
Controle feedforward não-linear

Revisão

$$\tau_{ff} = \mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_{ref} + \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$$

$$\tau_{fb} = \mathbf{K}_p \mathbf{e} + \mathbf{K}_d \dot{\mathbf{e}}$$

$$\tau = \tau_{ff} + \tau_{fb}$$



Dinâmica
inversa

Conclusão

Controle feedforward não-linear

Revisão

$$\tau_{ff} = \mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_{ref} + \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$$

seguimento de trajetória

Dinâmica
inversa

$$\tau_{fb} = \mathbf{K}_p \mathbf{e} + \mathbf{K}_d \dot{\mathbf{e}}$$

**rejeição de perturbações
define impedância**

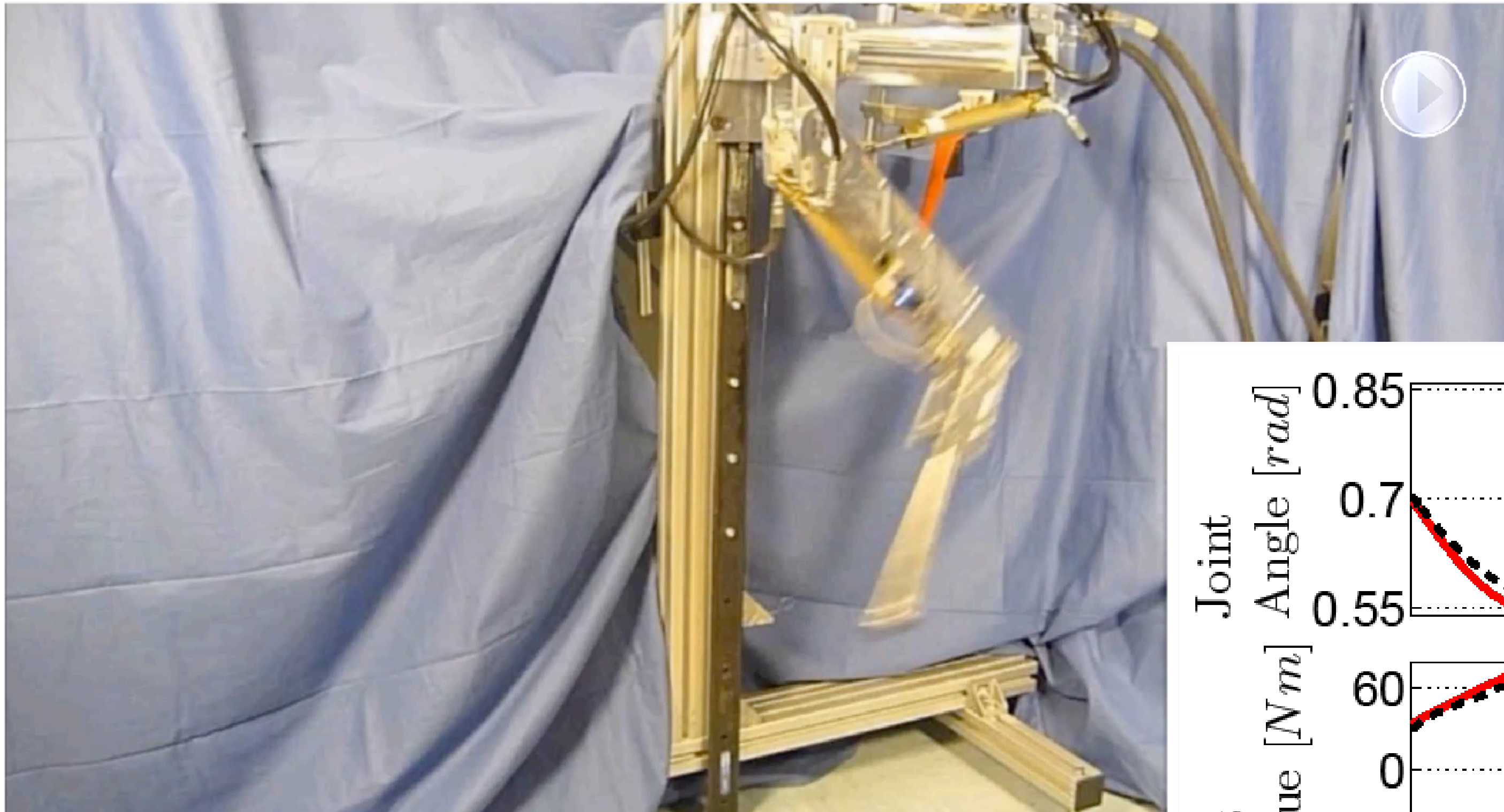
Conclusão

Exemplo

Revisão

Dinâmica inversa

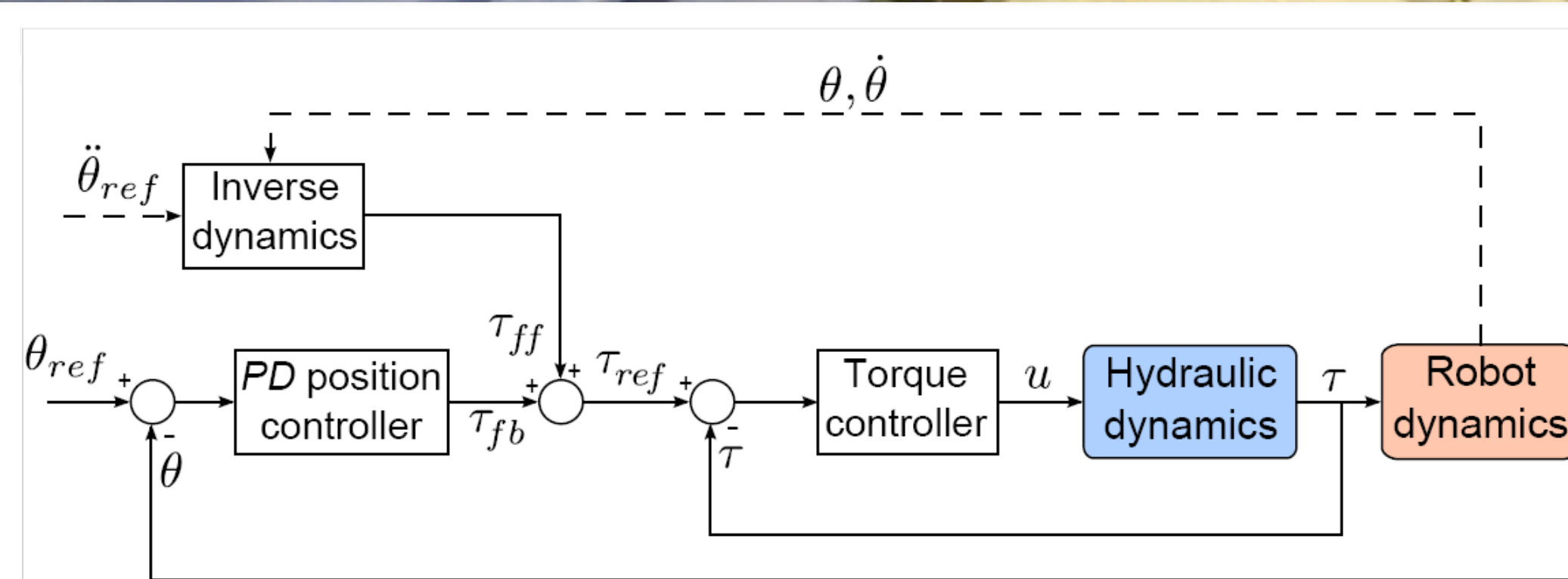
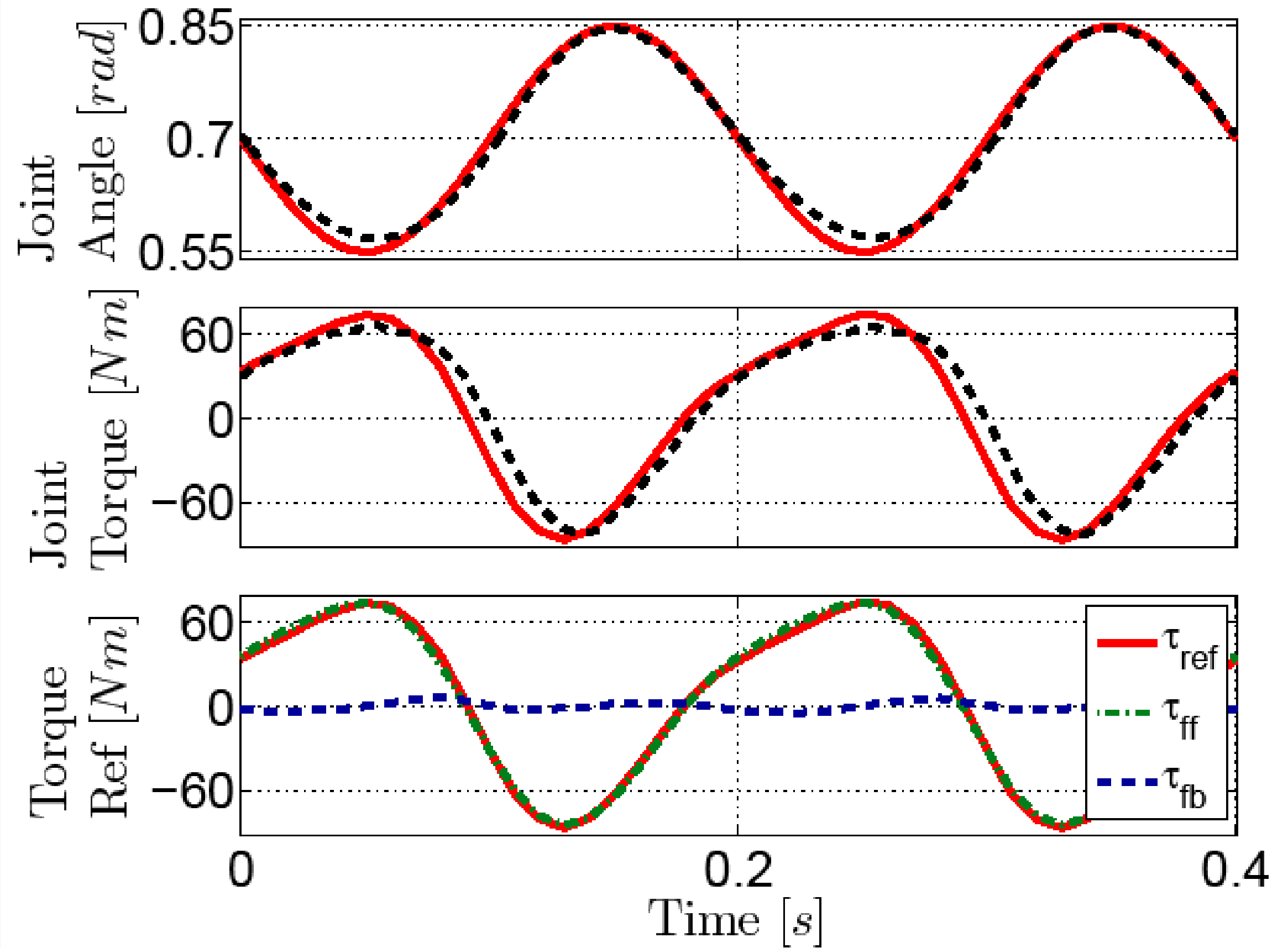
Conclusão



$$\tau = \tau_{ff} + \tau_{fb}$$

— Reference

- - - Actual

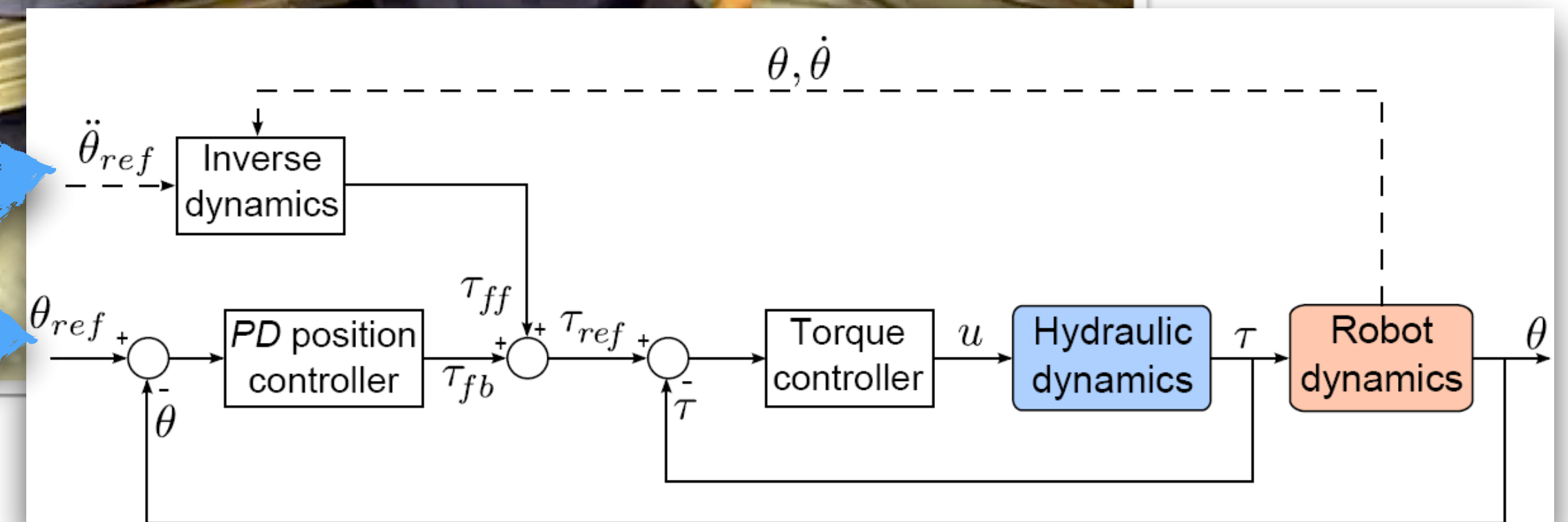
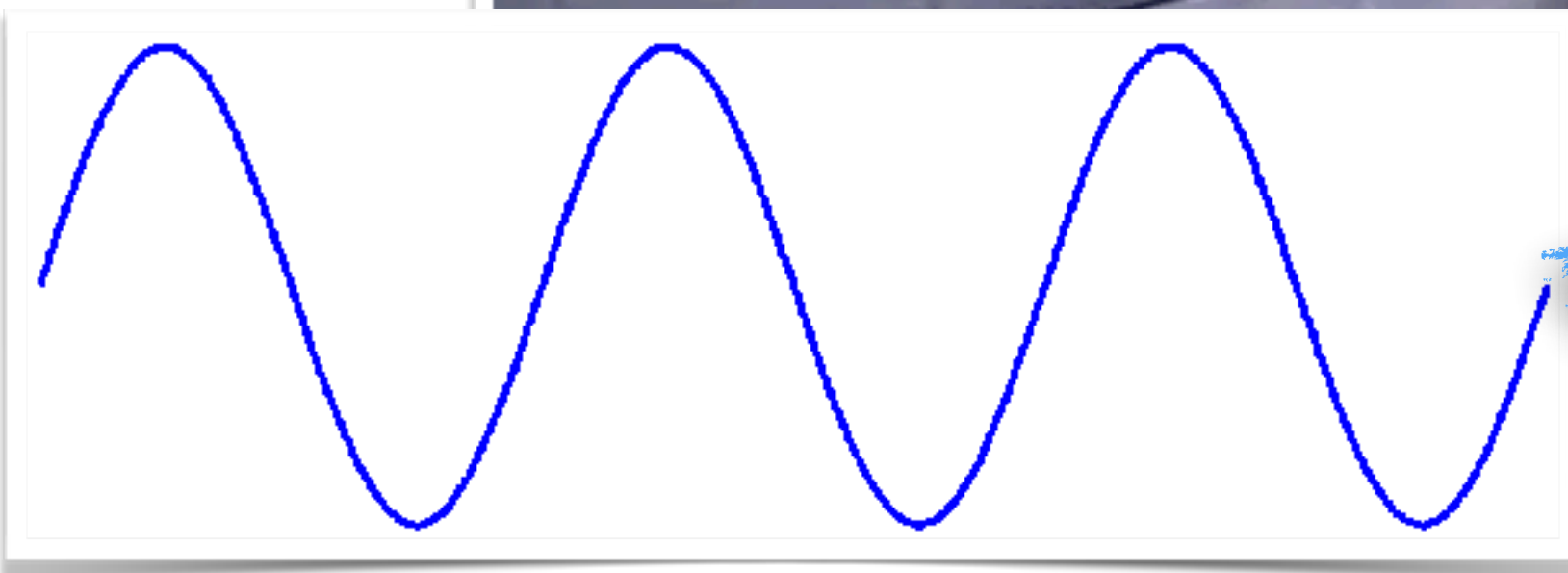
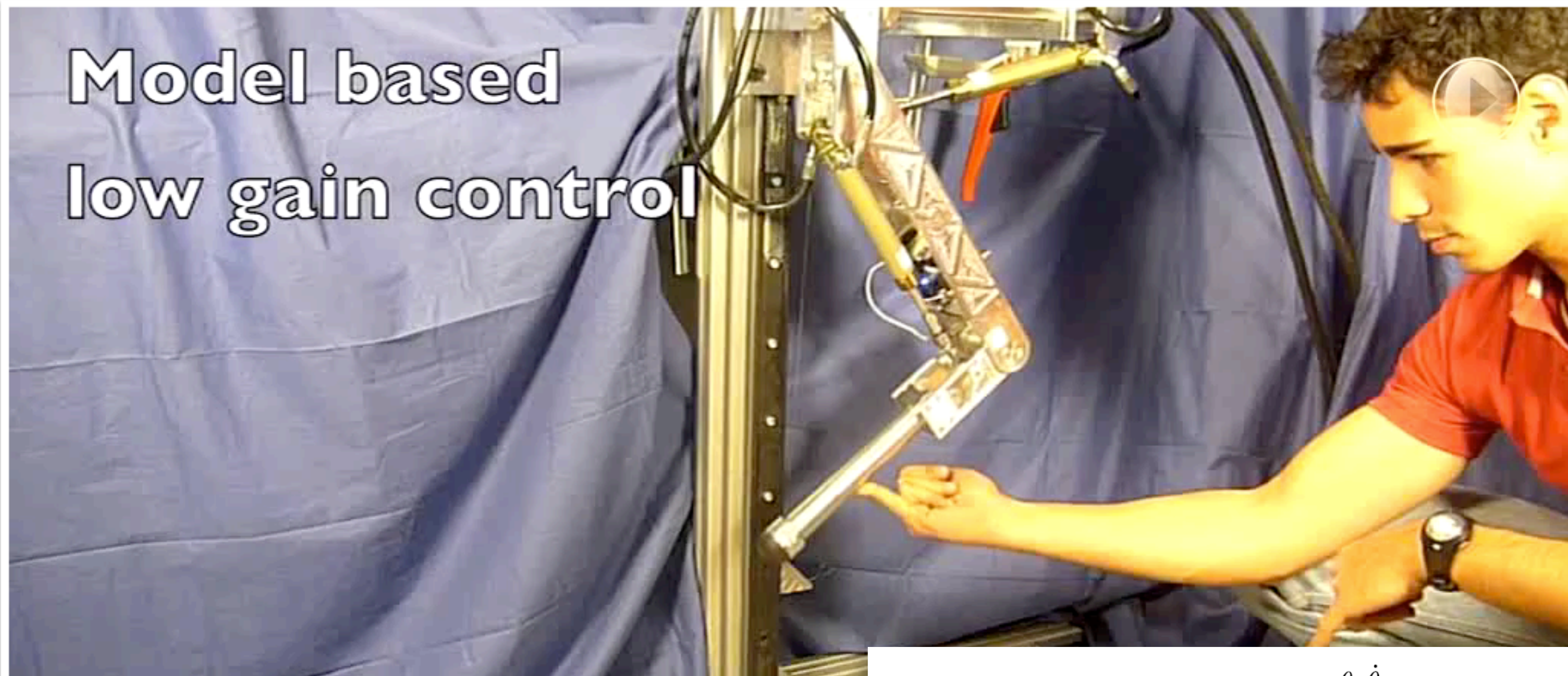


Exemplo

Revisão

Dinâmica
inversa

Conclusão



Conteúdo

Revisão

Dinâmica
Inversa



- Take-home messages
- Bibliografia

Conclusão

“Take-home messages”

Revisão



torque calculado

- 1) Dinâmica inversa
- 2) Controle feedforward não-linear

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}_{ff} + \boldsymbol{\tau}_{fb}$$

$$\boldsymbol{\tau}_{ff} = \mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_{ref} + \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$$

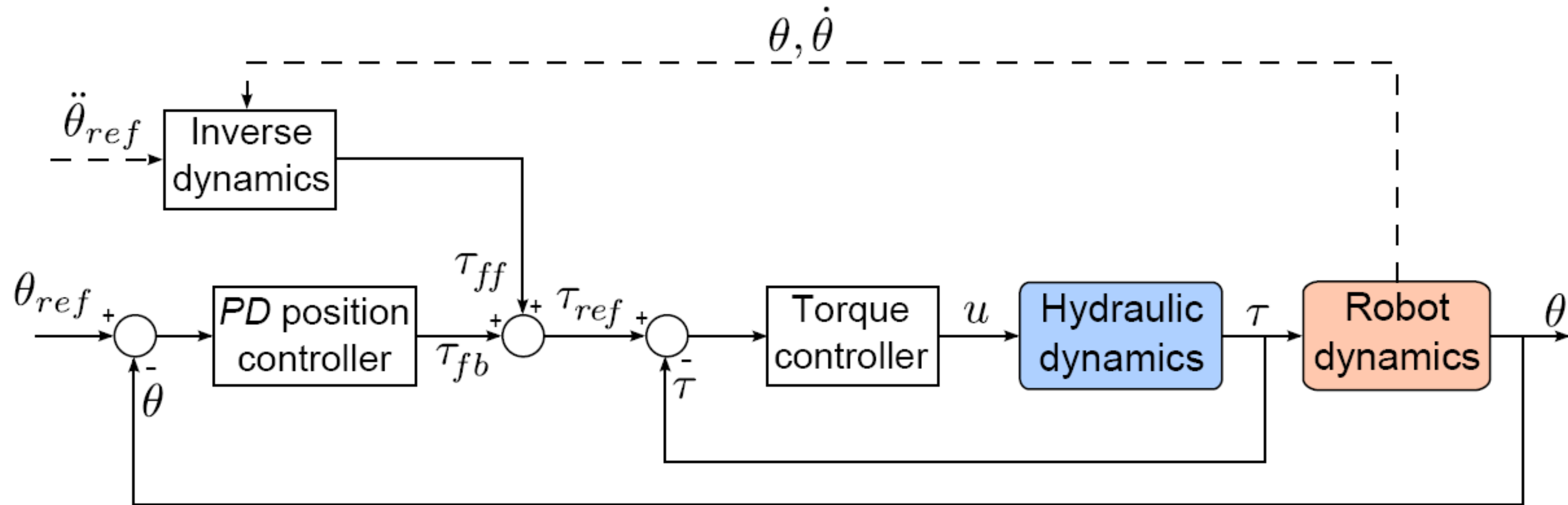
1) $\boldsymbol{\tau}_{fb} = \mathbf{M}(\mathbf{q}) (\mathbf{K}_p \mathbf{e} + \mathbf{K}_d \dot{\mathbf{e}})$

2) $\boldsymbol{\tau}_{fb} = \mathbf{K}_p \mathbf{e} + \mathbf{K}_d \dot{\mathbf{e}}$

Dinâmica Inversa

Conclusão

“Take-home messages”



Feedforward: responsável pelo seguimento nominal de **referência**

Feedback: responsável pela rejeição de **distúrbios** e por determinar **impedância** mecânica

Revisão

Dinâmica Inversa

Conclusão

Referência bibliográfica

Revisão



Featherstone, R. (2007). Rigid Body Dynamics Algorithms. Boston: Springer



Siciliano, B., et al. (2009). Robotics—Modelling, Planning and Control. Advanced Textbooks in Control and Signal Processing Series.

Craig, J. J. (2005). Introduction to robotics: mechanics and control (Vol. 3, pp. 48-70). Upper Saddle River, NJ, USA:: Pearson/Prentice Hall.

Nguyen-Tuong, D., Seeger, M., & Peters, J. (2008). Computed torque control with nonparametric regression models. In American Control Conference, 2008 (pp. 212-217). IEEE.

Dinâmica
Inversa

Conclusão



That's all Folks!