

CONTROLE DE SISTEMAS LINEARES SUJEITOS A SALTOS MARKOVIANOS APLICADO EM VEÍCULOS AUTÔNOMOS



Uma abordagem prática

Apresentação preliminar

Universidade de São Paulo - USP
Escola de Engenharia de São Carlos
Prof. Dr. Marco Henrique Terra
Prof. Dr. Valdir Grassi Jr.
Eng. Lucas Barbosa Marcos

FAPESP
Lançamento do 2º edital e workshop do Programa
FAPESP de Pesquisa em eScience
14/12/2015



EESC • USP

Problema de controle autônomo veicular

- Hipótese:
 - Veículo = sistema Markoviano
 - Usar técnicas de controle Markoviano para operação autônoma



Sistema linear sujeito a saltos Markovianos - Exemplo

$$\dot{x} = \bar{A}_i x + \bar{B}_i u,$$

para $i = 1, 2, 3$ (modos do sistema).

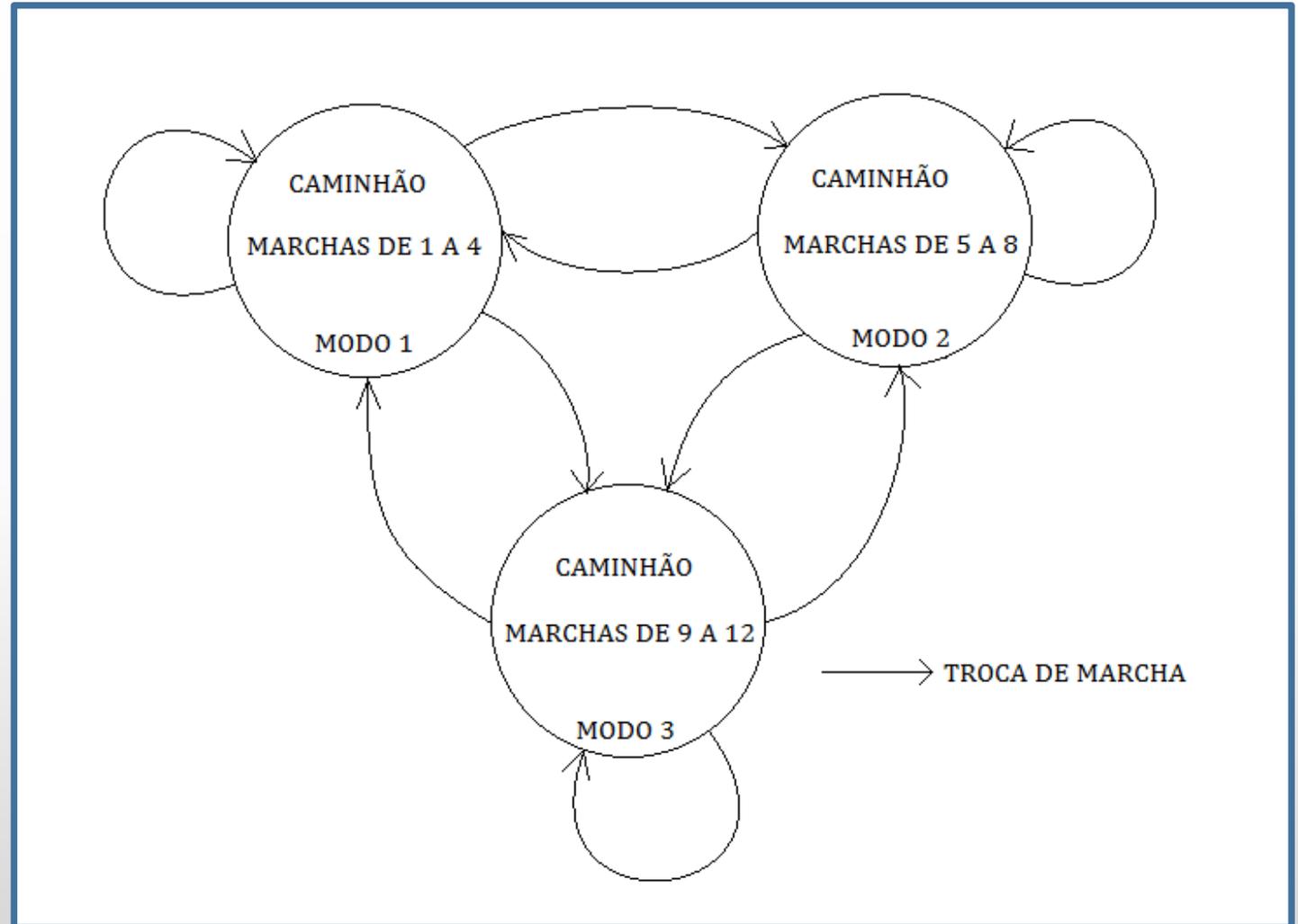
$$\bar{A}_i = A_i + \delta A_i$$

- A_i : matriz nominal
- δA_i : erro de modelagem

$$\bar{B}_i = B_i + \delta B_i$$

- B_i : matriz nominal
- δB_i : erro de modelagem

- \rightarrow transição entre os modos
(descrita por probabilidade)



Modelo dinâmico do caminhão



- As trocas de marcha causam mudanças abruptas na dinâmica do veículo
 - Associar diferentes marchas a diferentes modos de um sistema Markoviano
- Ainda, as equações que descrevem a dinâmica do caminhão são não-lineares
 - Associar diferentes modos a diferentes pontos de operação (pontos de linearização)

Diagrama de blocos do sistema controlado



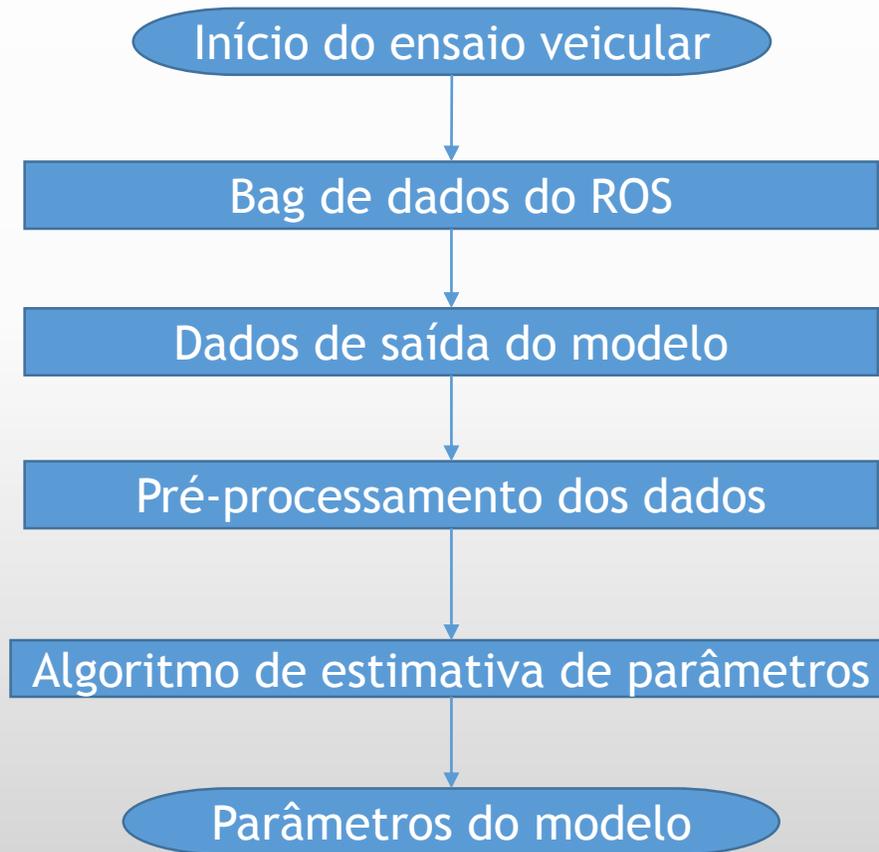
Estrutura do controlador

- Subdivisões do controle:
 - Longitudinal → velocidade
 - Lateral → esterçamento
- Algoritmo de Controle
 - Conforme teoria de sistemas lineares sujeitos a saltos Markovianos encontrada em (Terra et al, 2014)

Etapas do projeto

1. Modelos teóricos da literatura sobre dinâmica veicular
2. Estimativa de parâmetros reais dos modelos
3. Projeto e simulação do controlador
4. Implementação e testes

Obtenção de dados para estimativa de parâmetros



Infraestrutura - vista externa



Infraestrutura - equipamentos



Exemplo de estimativa dos parâmetros para controle longitudinal

Calculados de acordo com o algoritmo de estimativa dado em (Ioannou e Fidan, 2006)

Algoritmo de estimativa de parâmetros

- Baseado em técnicas de Lyapunov
- Derivado de aplicações de controle adaptativo
- Necessita de entradas suficientemente ricas para excitar todos os modos do sistema (isto é, entrada com vários componentes de frequência)
- A cada passo de estimativa, atualiza os parâmetros baseado na estimativa anterior e nos estados atuais

Leitura dos dados via terminal

```
lucas@lucas-VirtualBox:~/Documents/can_files$ rosbag info agosto-2014-volta1.bag1
```

```
path: agosto-2014-volta1.bag1
```

```
version: 2.0
```

```
duration: 15:04s (904s)
```

```
start: Aug 13 2014 09:50:27.05 (1407934227.05)
```

```
end: Aug 13 2014 10:05:31.81 (1407935131.81)
```

```
size: 68.8 MB
```

```
messages: 417809
```

```
compression: none [86/86 chunks]
```

```
types: bond/Status [eacc84bf5d65b6777d4c50f463dfb9c8]
```

```
carina2_msgs/Brake [4bea522f9243fd34ea7bc74ce85697a8]
```

```
carina2_msgs/Throttle [d053817de0764f9ee90dbc89c4cdd751]
```

```
carina2_msgs/VehicleState [d59fbb8f50f426518dc752cfb6444965]
```

```
diagnostic_msgs/DiagnosticArray [3cfbeff055e708a24c3d946a5c8139cd]
```

```
geometry_msgs/PoseStamped [d3812c3cbc69362b77dc0b19b345f8f5]
```

```
geometry_msgs/PoseWithCovarianceStamped [953b798c0f514ff060a53a3498ce6246]
```

```
geometry_msgs/TwistWithCovarianceStamped [8927a1a12fb2607ceea095b2dc440a96]
```

```
geometry_msgs/Vector3Stamped [7b324c7325e683bf02a9b14b01090ec7]
```

```
nav_msgs/Odometry [cd5e73d190d741a2f92e81eda573aca7]
```

```
rosgraph_msgs/Log [acffd30cd6b6de30f120938c17c593fb]
```

```
sensor_msgs/Imu [6a62c6daae103f4ff57a132d6f95cec2]
```

```
sensor_msgs/NavSatFix [2d3a8cd499b9b4a0249fb98fd05cfa48]
```

```
septentrio_asterx2_driver/septentrio_asterx2 [37544fd84aaea2982302677ab256375a]
```

```
std_msgs/Int32 [da5909fbe378aeaf85e547e830cc1bb7]
```

```
std_msgs/String [992ce8a1687cec8c8bd883ec73ca41d1]
```

```
tf/tfMessage [94810edda583a504dfda3829e70d7eec]
```

```
topics: /asterx2_node/fix 9046 msgs : sensor_msgs/NavSatFix
```

```
/asterx2_node/poseCov 9046 msgs : geometry_msgs/PoseWithCovarianceStamped
```

```
/asterx2_node/septentrio 9046 msgs : septentrio_asterx2_driver/septentrio_asterx2
```

```
/asterx2_node/twistCov 9046 msgs : geometry_msgs/TwistWithCovarianceStamped
```

```
/brake_commands 4523 msgs : carina2_msgs/Brake
```

Conjunto de dados (BAG)

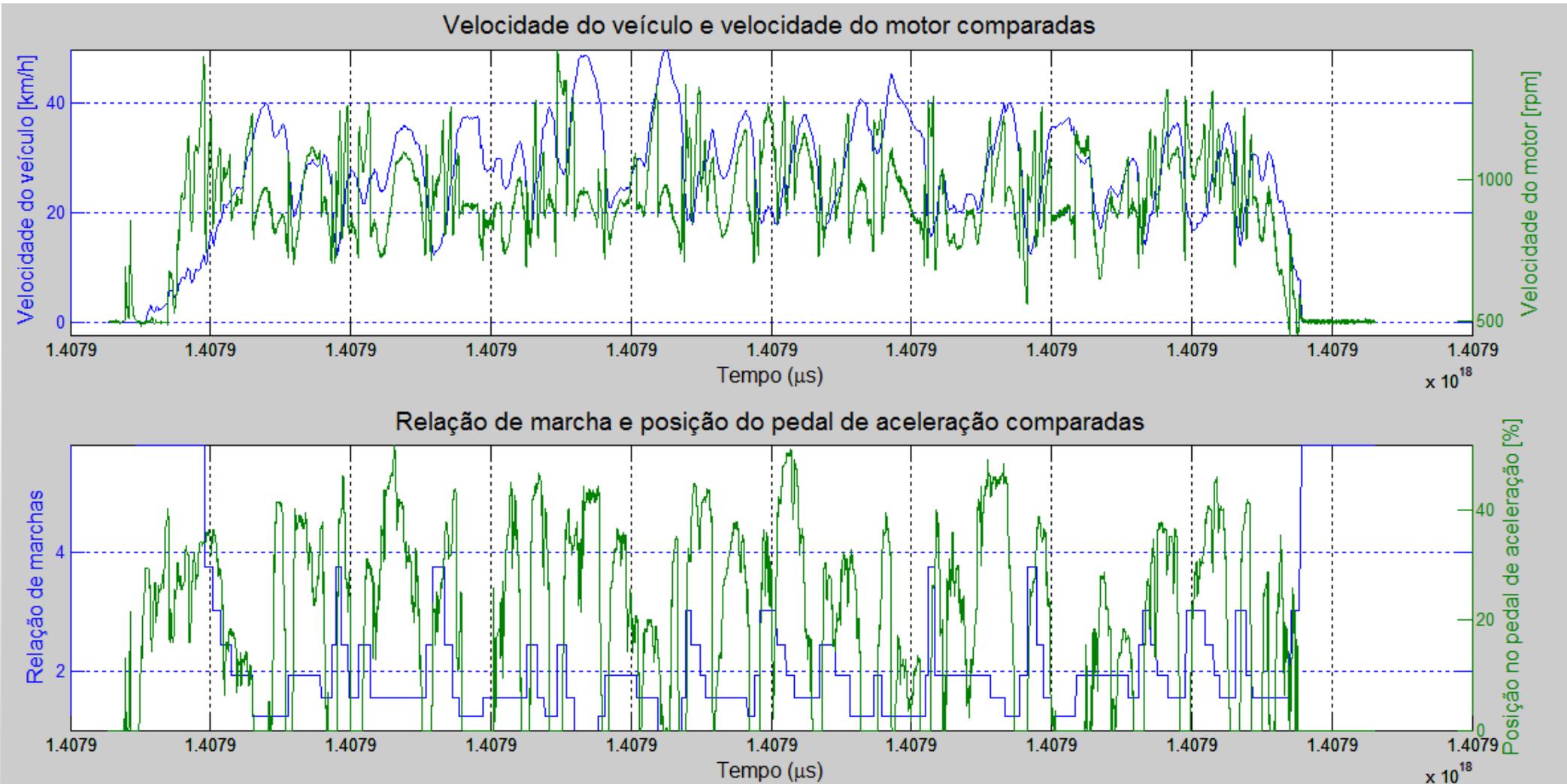
Tipos dos dados

Tópicos encontrados

Leitura dos dados via terminal

```
tf/tfMessage [94810edda583a504dfda3829e70d7eec]
topics: /asterx2_node/fix 9046 msgs : sensor_msgs/NavSatFix
/asterx2_node/poseCov 9046 msgs : geometry_msgs/PoseWithCovarianceStamped
/asterx2_node/septentrio 9046 msgs : septentrio_asterx2_driver/septentrio_asterx2
/asterx2_node/twistCov 9046 msgs : geometry_msgs/TwistWithCovarianceStamped
/brake_commands 4523 msgs : carina2_msgs/Brake
/cmd_muxlexer/allowed_cmd_vel 1 msg : std_msgs/String
/diagnostics 904 msgs : diagnostic_msgs/DiagnosticArray
/encoder 9045 msgs : std_msgs/Int32
/lse_xsens_mti/xsens/fix 18091 msgs : sensor_msgs/NavSatFix
/lse_xsens_mti/xsens/imu/data 18091 msgs : sensor_msgs/Imu
/lse_xsens_mti/xsens/mag 18091 msgs : geometry_msgs/Vector3Stamped
/lse_xsens_mti/xsens/odom 18091 msgs : nav_msgs/Odometry
/lse_xsens_mti/xsens/pose 18091 msgs : geometry_msgs/PoseStamped
/nodelet_manager/bond 1810 msgs : bond/Status (2 connections)
/odometry_node/currentPose 9046 msgs : geometry_msgs/PoseStamped
/odometry_node/odom 9046 msgs : nav_msgs/Odometry
/odometry_node/originPose 9046 msgs : geometry_msgs/PoseStamped
/reset 24 msgs : rosgraph_msgs/Log (9 connections)
/sniff_can 229633 msgs : std_msgs/String Dados da Controller Area Network
/tf 9046 msgs : tf/tfMessage
/throttle_commands 4523 msgs : carina2_msgs/Throttle
/vehicle_state 4523 msgs : carina2_msgs/VehicleState
lucas@lucas-VirtualBox:~/Documents/can_files$
```

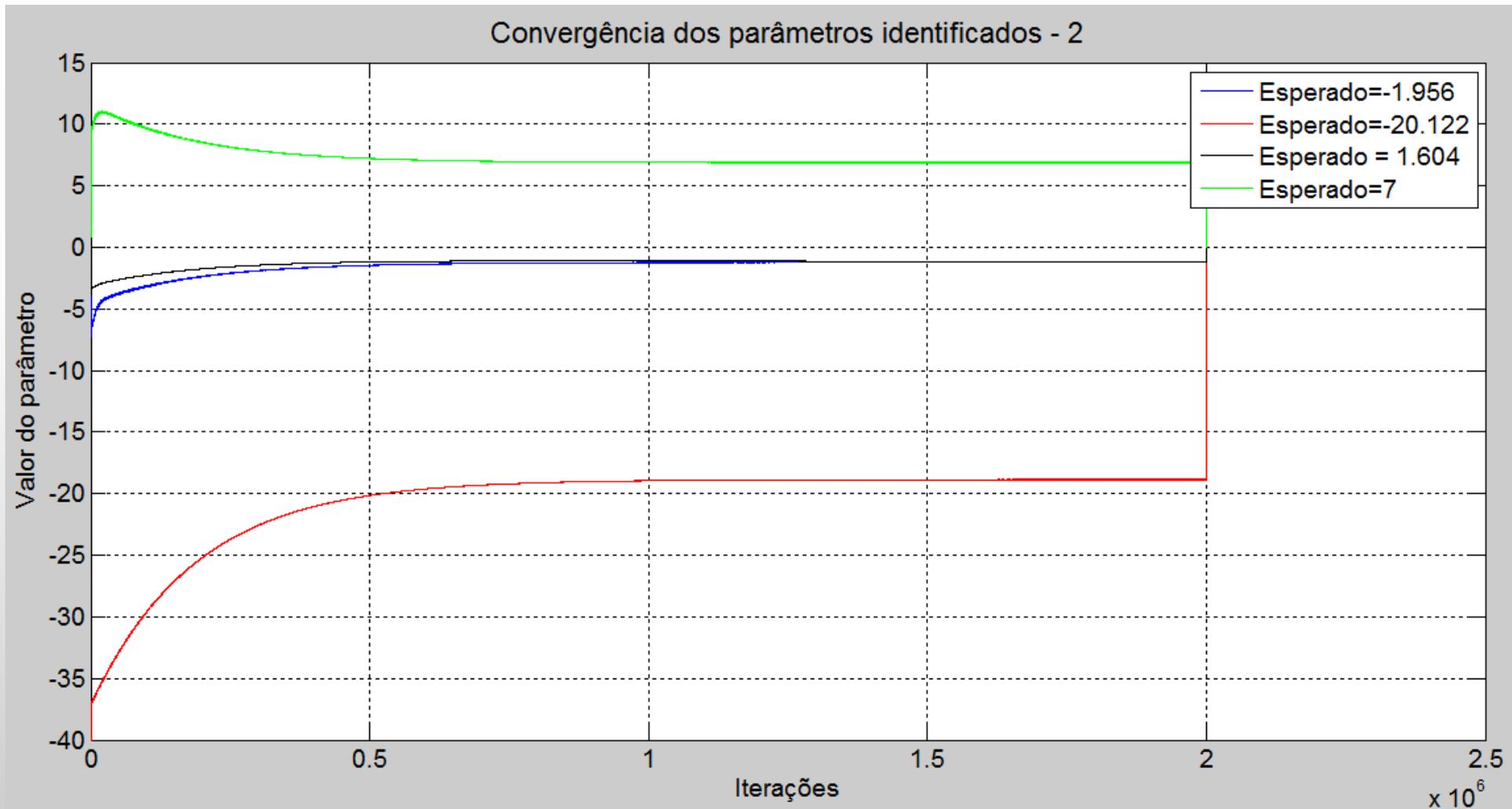
Exemplo: Variáveis pré-processadas



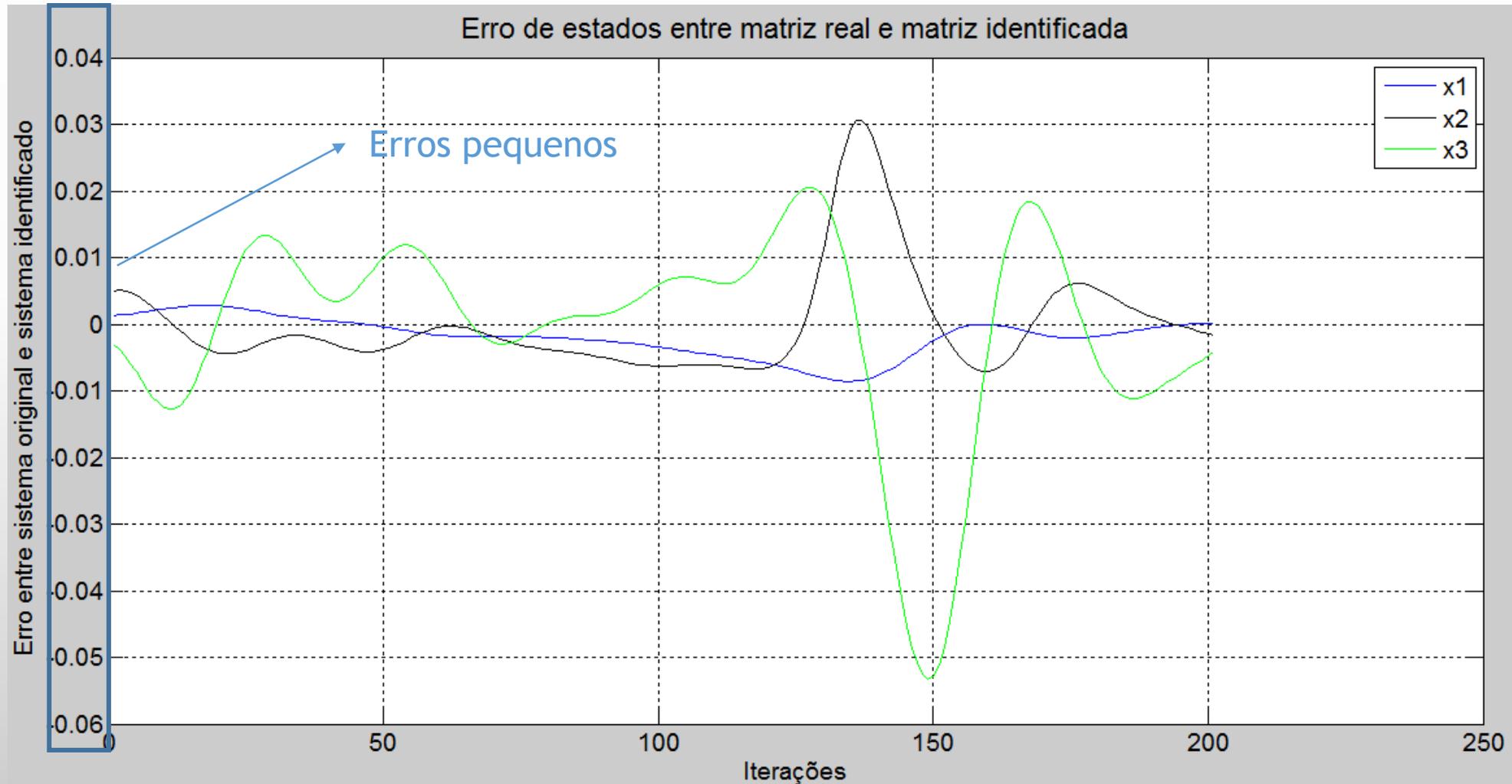
Exemplo do algoritmo

- Sistema $\dot{x} = \hat{a}x + \hat{b}u$, sendo \hat{a} e \hat{b} os únicos parâmetros desconhecidos.
- Se $\dot{x} = z$, $\theta^T = [a \quad b]$ e $\phi = [x \quad u]$, o algoritmo para encontrar os valores de a e b (estimativas de \hat{a} e \hat{b}) é dado por:
 - $\theta_{inicial}^T = [0 \quad 0]$
 - Para tempo $t = 2$ até o final da amostragem
 - $m_s^2(t) = 1 + \alpha\phi(t)^T\phi(t)$;
 - $m^2(t) = m_s^2(t) + \phi^T(t)\Gamma\phi(t)$;
 - $e(t) = \frac{z(t) - \theta(t-1)^T\phi(t)}{m^2(t)}$;
 - $\theta(t) = \theta(t-1) + T\Gamma e\phi$;
- Sendo α, Γ parâmetros de projeto e T o tempo de amostragem da planta

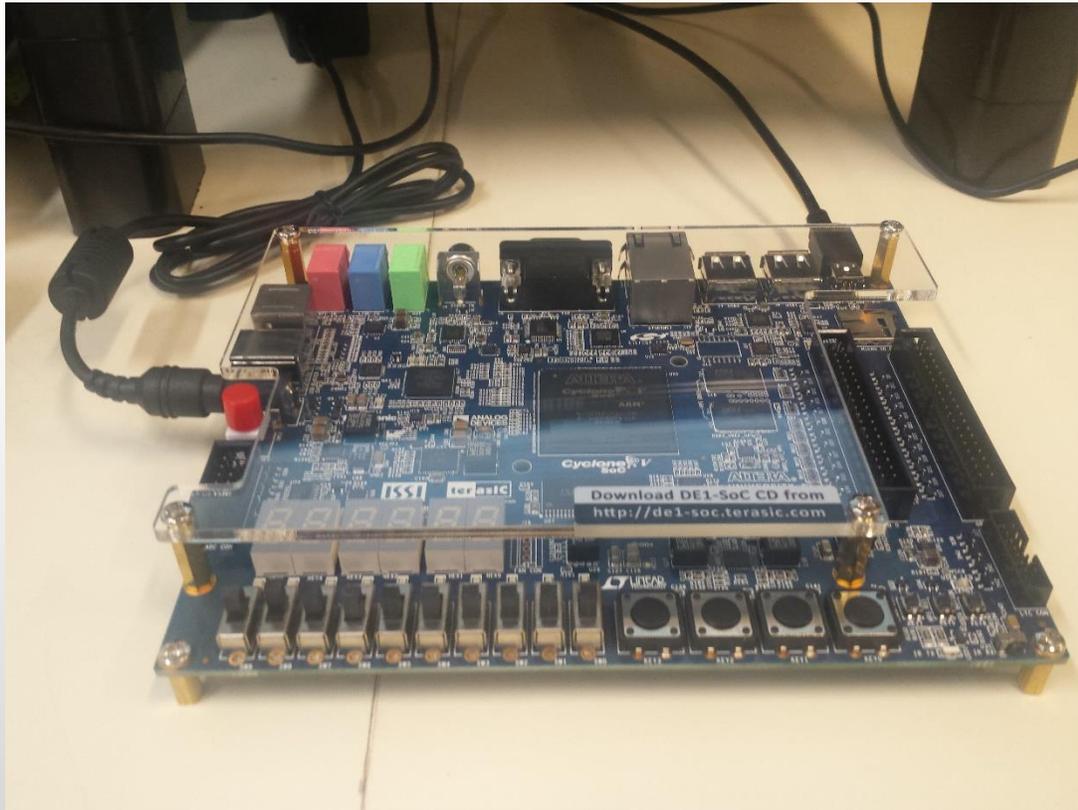
Exemplo: Convergência exponencial do algoritmo, $\hat{\theta}^T = [-1.9 \quad -20.1 \quad 1.6 \quad 7]$



Erros de estado entre sistema original e sistema estimado

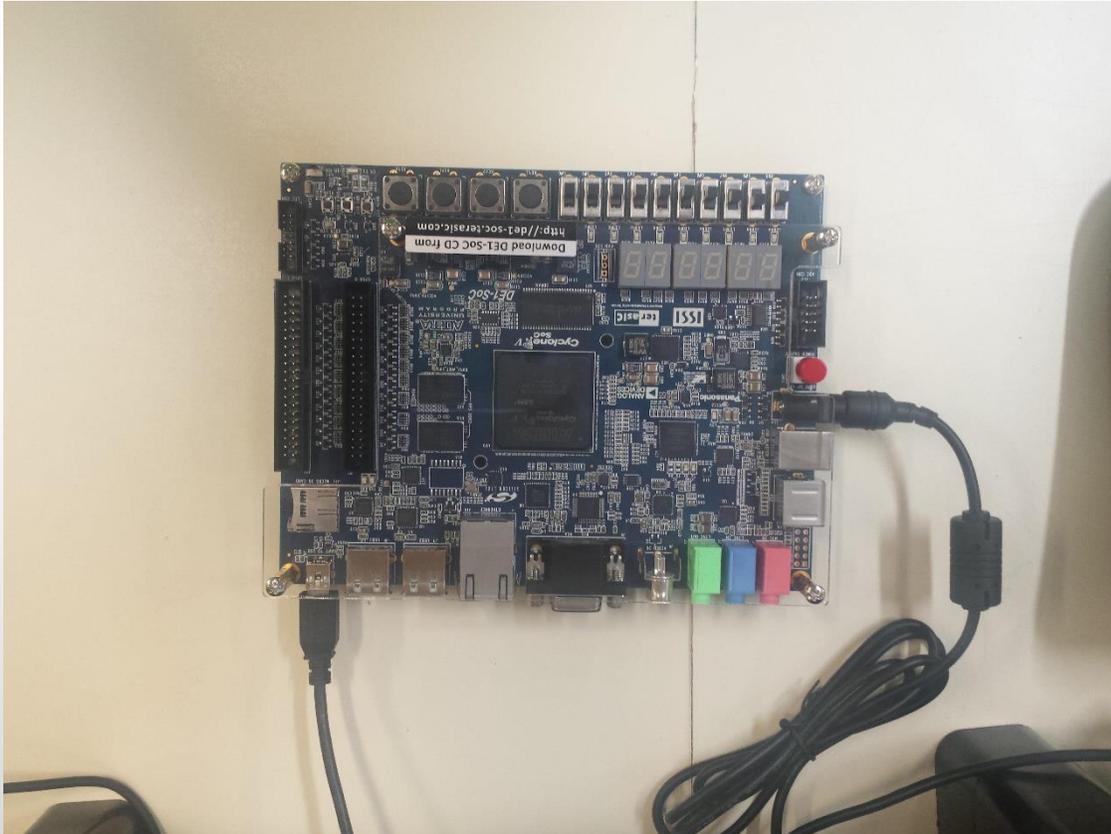


Implementação de Filtro de Kalman em FPGA



- FPGA - *Field Programmable Gate Array* (arranjo de portas programáveis em campo)
- Circuito integrado preparado para programação *a posteriori* por um designer ou projetista.

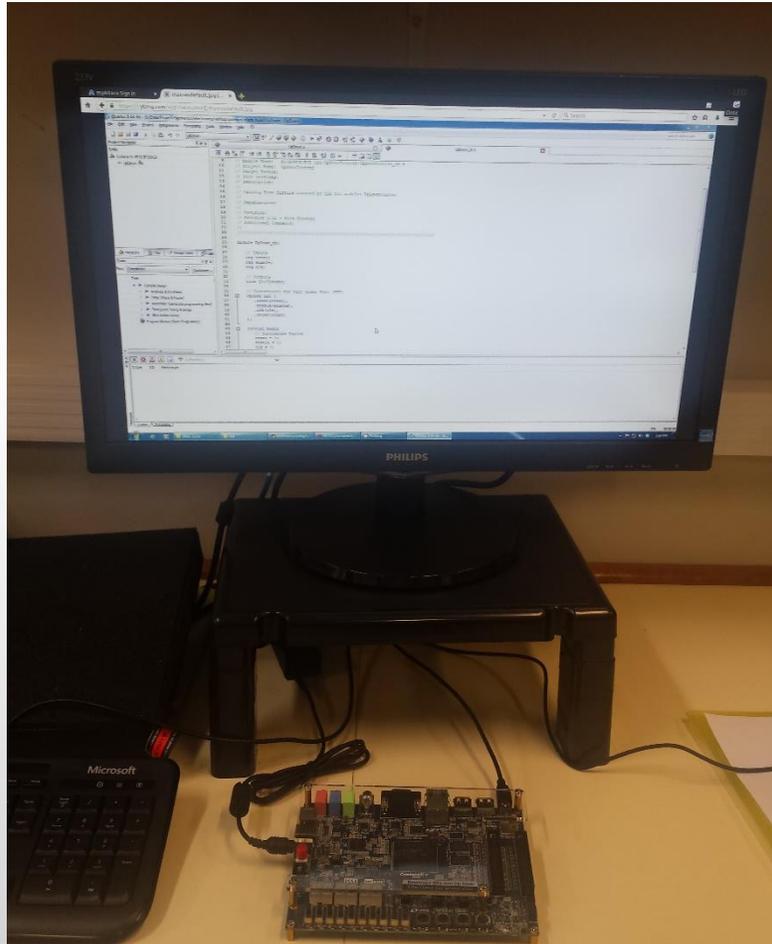
Implementação de Filtro de Kalman em FPGA



- Filtragem: estimar estados
- Filtro de Kalman: algoritmo desenvolvido por Rudolph Kalman, com diversas variações elaboradas a partir da original.
- Exemplo: Kalman robusto, Kalman preditor.

- Variação escolhida: Kalman Robusto
 - Estimativa filtrada
 - Estimativa preditora

Implementação de Filtro de Kalman em FPGA



- Objetivo: utilizar o filtro implementado como sistema de referência de altitude, orientação e posição.
- Projeto em desenvolvimento avançado
- Cooperação internacional
- Uso de métodos de acesso remoto para programação da placa FPGA

OBRIGADO!

Referências:

TERRA, M.H.; Cerri, J.P.; Ishihara, J.Y., "Optimal Robust Linear Quadratic Regulator for Systems Subject to Uncertainties," in *Automatic Control, IEEE Transactions on* , vol.59, no.9, pp.2586-2591, Sept. 2014.

IOANNOU, Petros A.; FIDAN, Baris. *Adaptive Control Tutorial*. SIAM, 2006.