

Controle da Mistura Ar/Combustível em um Motor a Combustão: Sistema em Malha Fechada

Bruno Silva Pereira

João Francisco Justo, Armando Laganá

XXIII Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva
23th International Symposium of Automotive Engineering



SIMEA
2015

SUMÁRIO

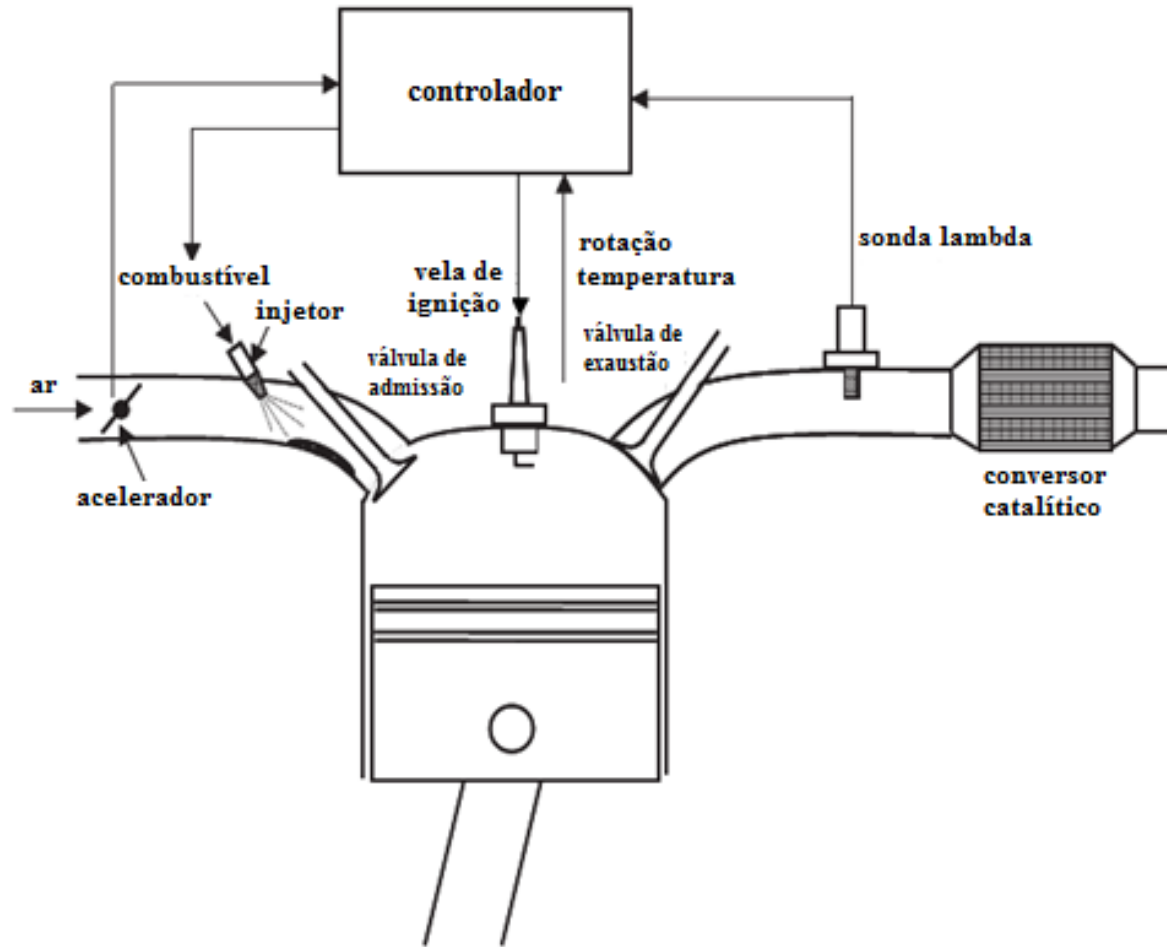
1. INTRODUÇÃO
2. RELAÇÃO AR/COMBUSTÍVEL
3. METODOLOGIA
4. PROJETO
5. RESULTADOS OBTIDOS
6. CONCLUSÕES

INTRODUÇÃO

- Introdução da eletrônica.
- Diminuir a emissão de poluentes.
- Inovações na área automotiva.
- Controle da mistura ar/combustível.
- Diversas técnicas de controle.

Relação ar/combustível

Figura 1 – Sistema de gerenciamento do motor.



FONTE: Adaptado de (BALENOVIC, 2002).

Relação ar/combustível

- Relação ar/combustível
- Estequiométrica

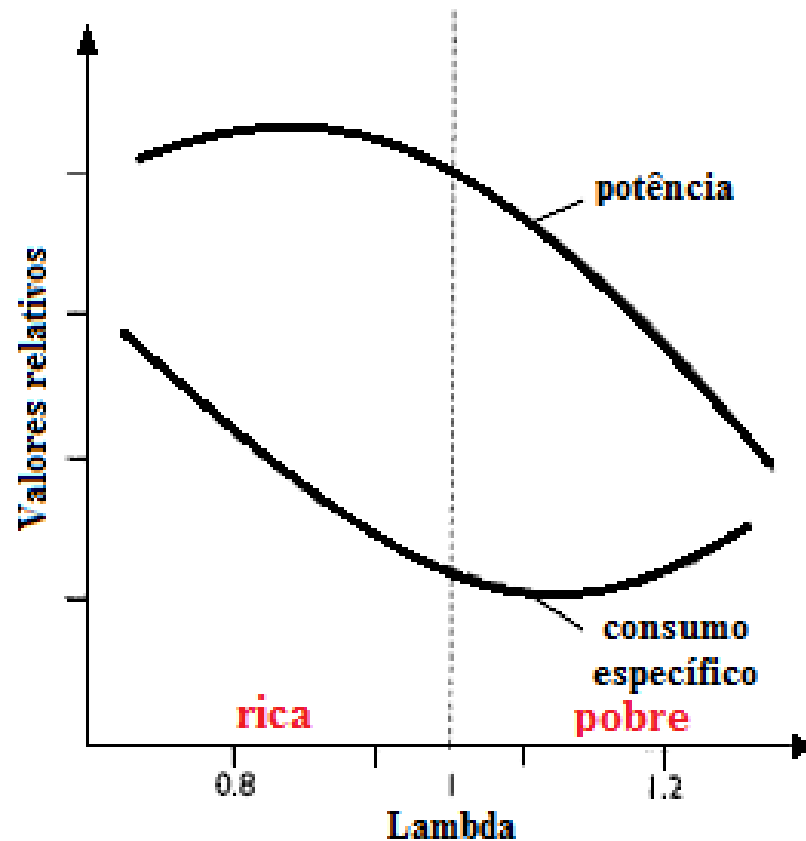
$$\lambda = \frac{\text{mistura a/c atual}}{\text{mistura a/c estequiométrica}}$$

- $\lambda < 1$, mistura rica
- $\lambda > 1$, mistura pobre
- $\lambda = 1$, mistura estequiométrica

Relação ar/combustível

Influência de *Lambda* no funcionamento do motor

Figura 2 – Relação de *lambda* com potência e consumo de combustível.



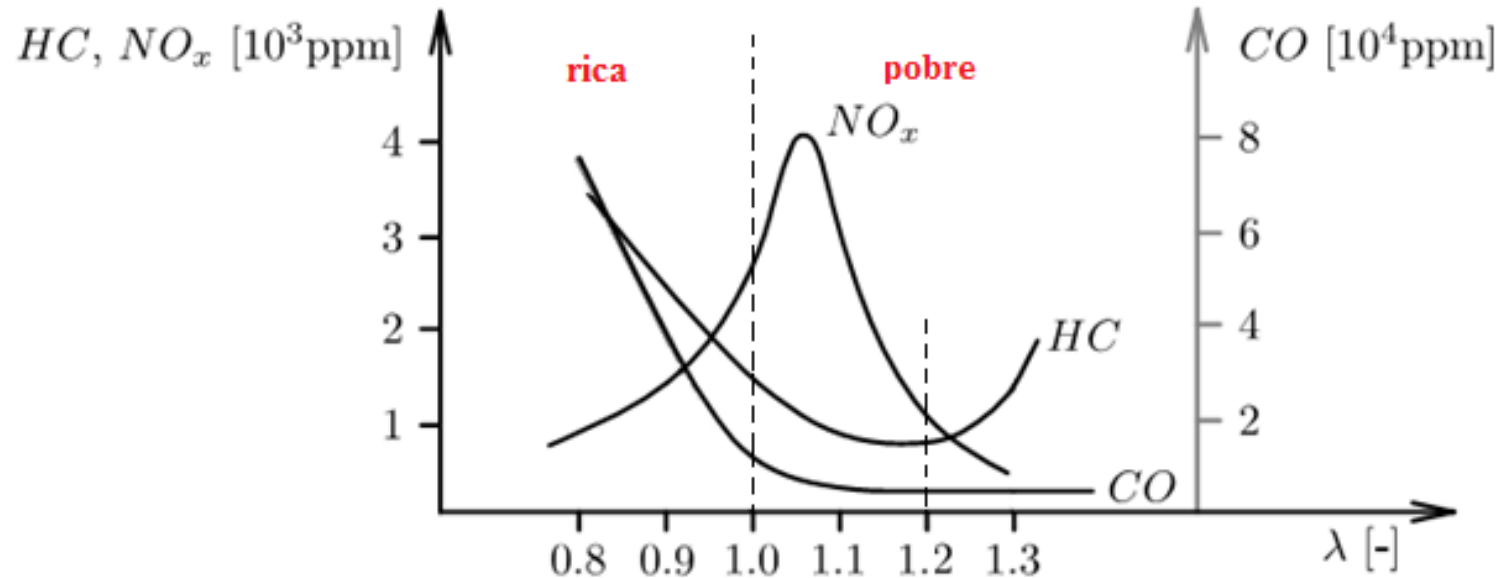
FONTE: Adaptado de (DENTON, 2004).

Relação ar/combustível

Emissão de poluentes

- HC - Hidrocarbonetos
- NO_x - Óxidos de nitrogênio
- CO – Monóxido de carbono

Figura 3 - Relação de λ e a emissão de poluentes.



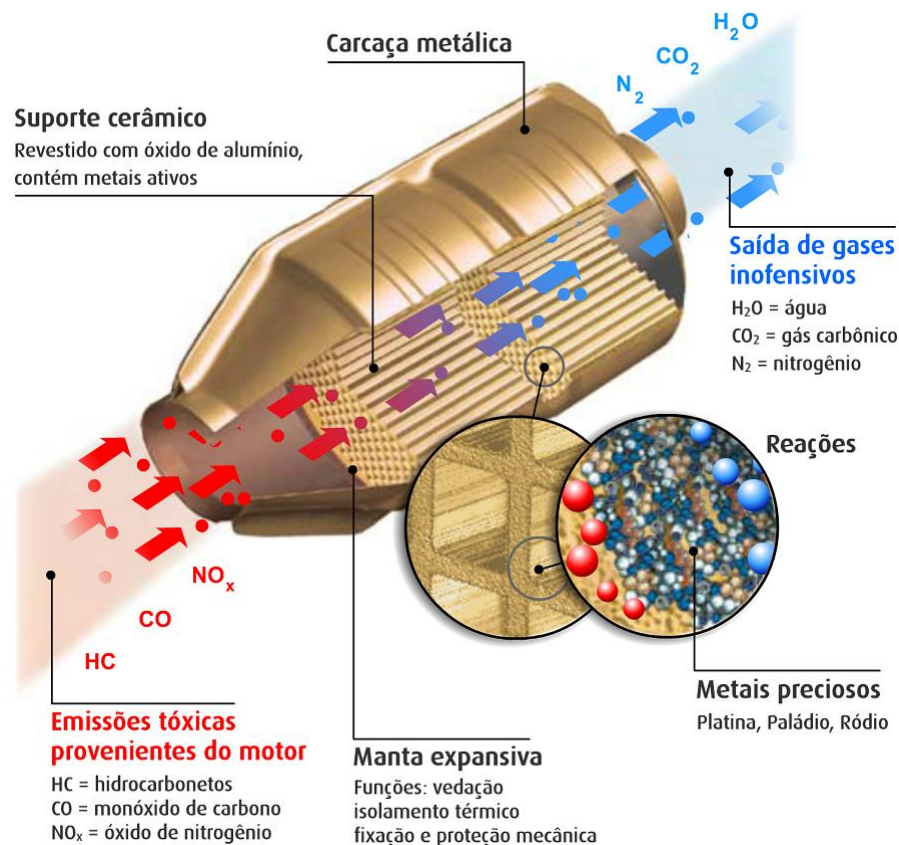
FONTE: Adaptado de (GUZZELLA e ONDER, 2010).

Relação ar/combustível

Conversor Catalítico

- Oxidação de hidrocarbonetos (HC) em dióxido de carbono (CO_2) e água (H_2O).
- Oxidação de monóxido de carbono (CO) em dióxido de carbono.
- A redução de NO_x em nitrogênio (N_2) e oxigênio (O_2).
- Platina, Paládio e Ródio.

Figura 4 – Conversor catalítico de três vias.

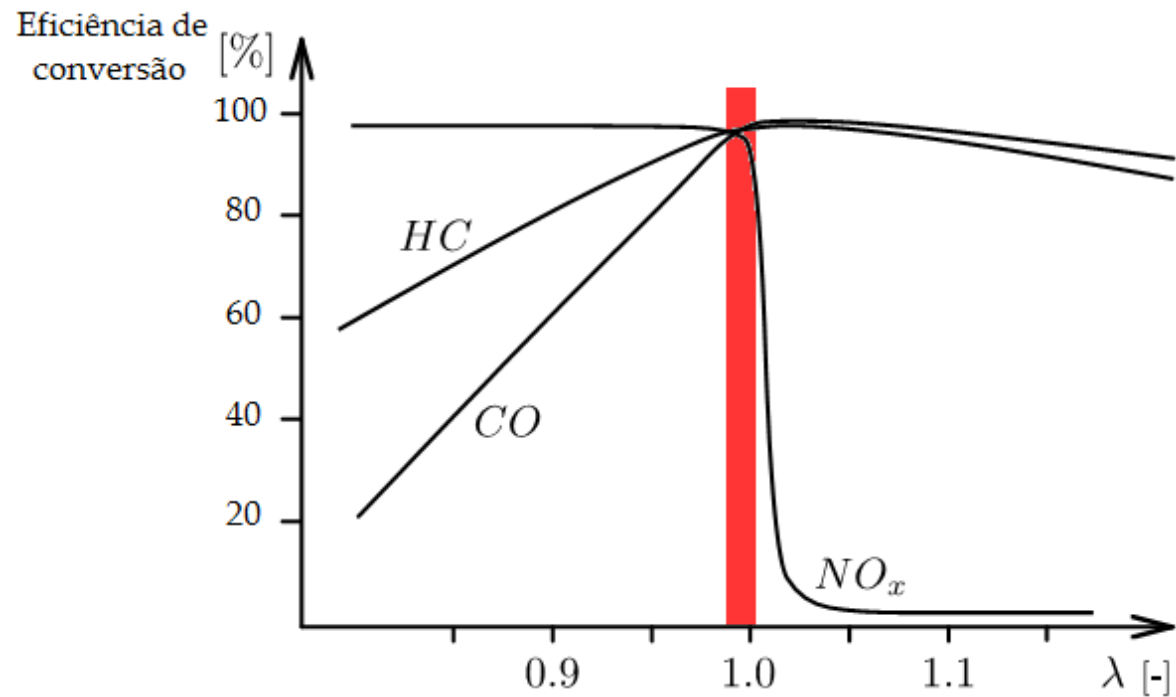


FONTE: (UMICORE, 2015).

Relação ar/combustível

Conversor Catalítico

Figura 5 – Taxa de conversão catalítica.



FONTE: Adaptado de (GUZZELLA e ONDER, 2010).

METODOLOGIA

- Controle em malha aberta

Figura 6 – Diagrama de blocos do sistema em malha aberta.



- Estratégia *Speed Density*:

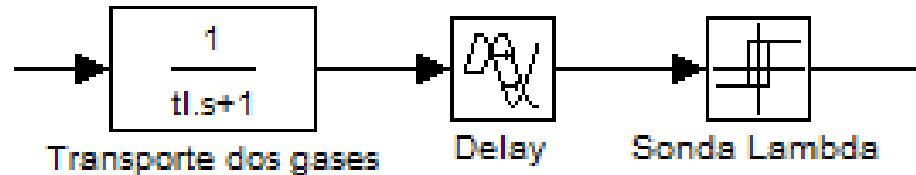
$$PV = m_a RT$$

$$m_c = \frac{m_a}{\text{relação a/c}}$$

METODOLOGIA

- Definição do modelo:

Figura 7 – Modelo da mistura ar/combustível.



$$t_l = \frac{2(C_{il} - 1)}{n * C_{il}}$$

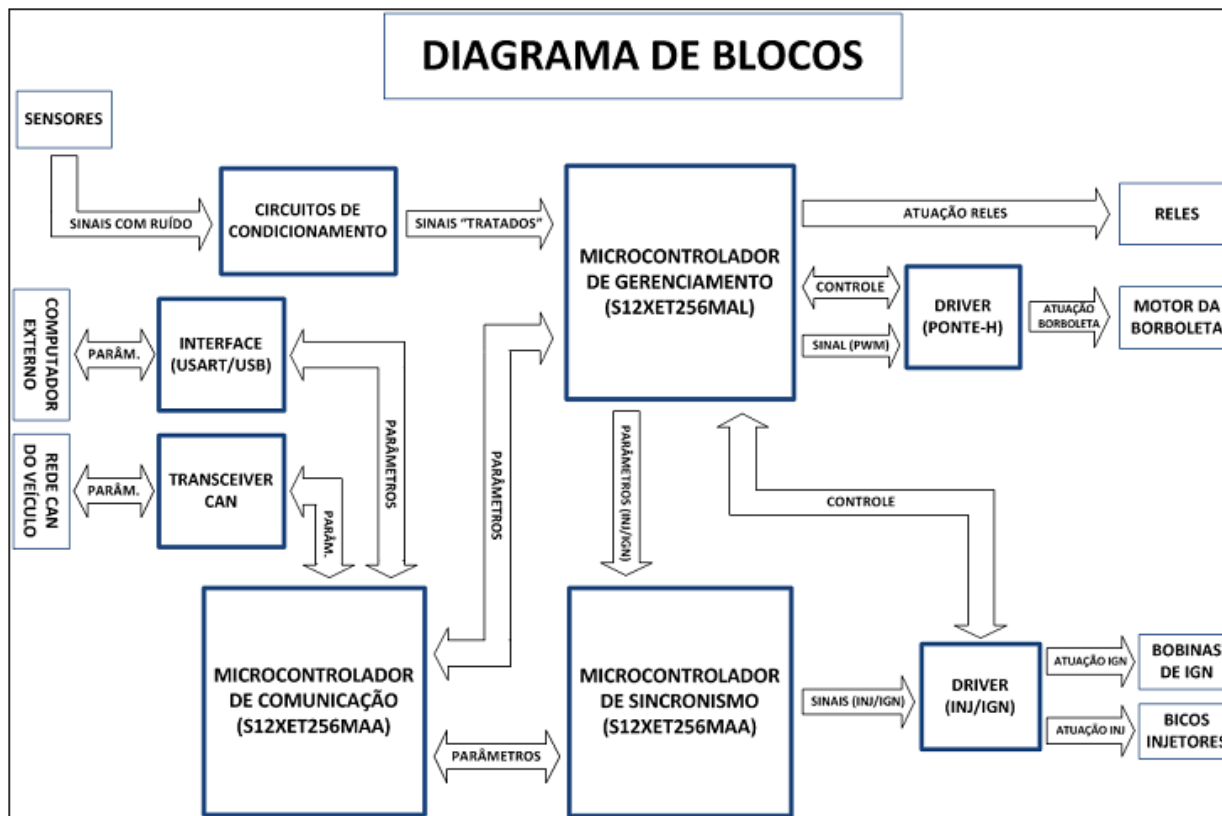
$$delay = 2 t_l$$

$$U_\lambda(v) = \begin{cases} 0, & \lambda > 1 \\ 1, & \lambda < 1 \end{cases}$$

METODOLOGIA

- Unidade de gerenciamento eletrônico:

Figura 8 – Diagrama de blocos do *hardware* utilizado.

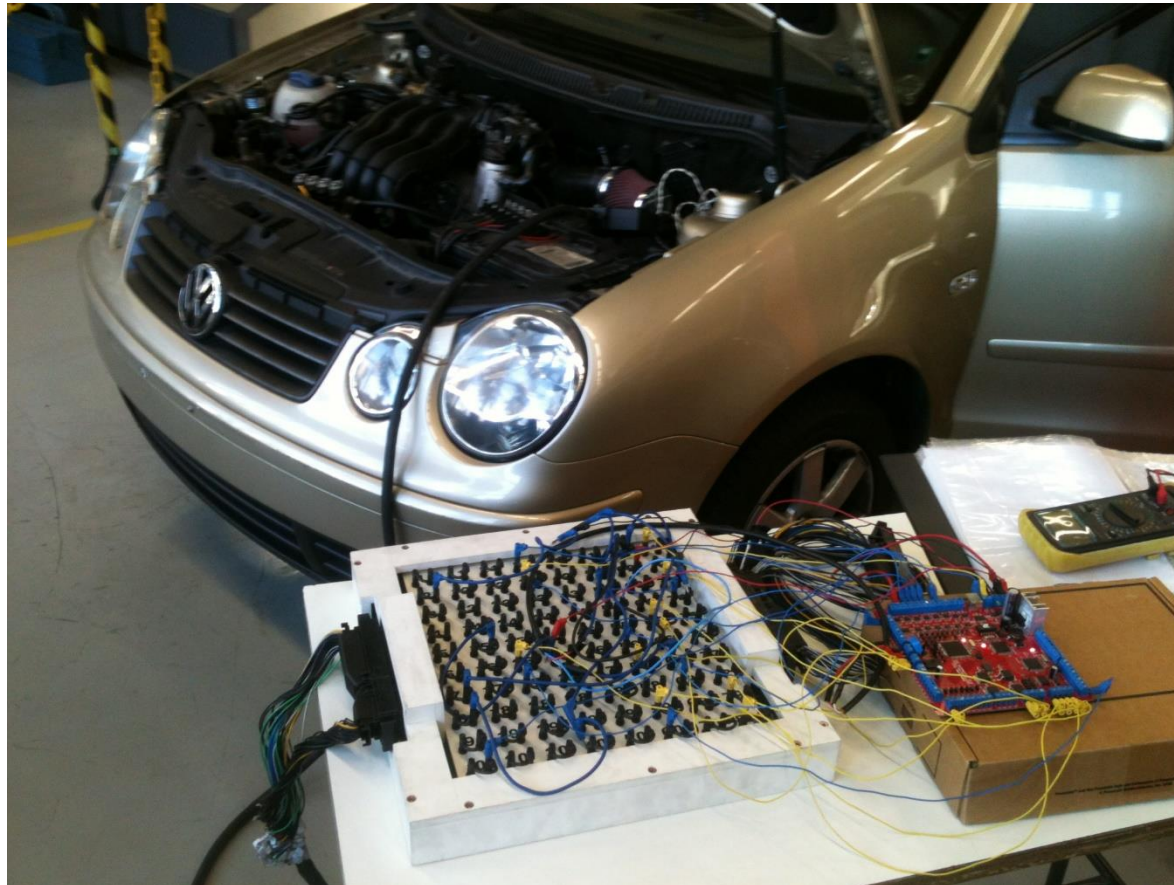


FONTE: (PEREIRA, 2013).

METODOLOGIA

- Polo Volkswagen
- Motor EA113 2.0L, 4 cilindros, 8 válvulas

Figura 9 – Motor utilizado nos testes.

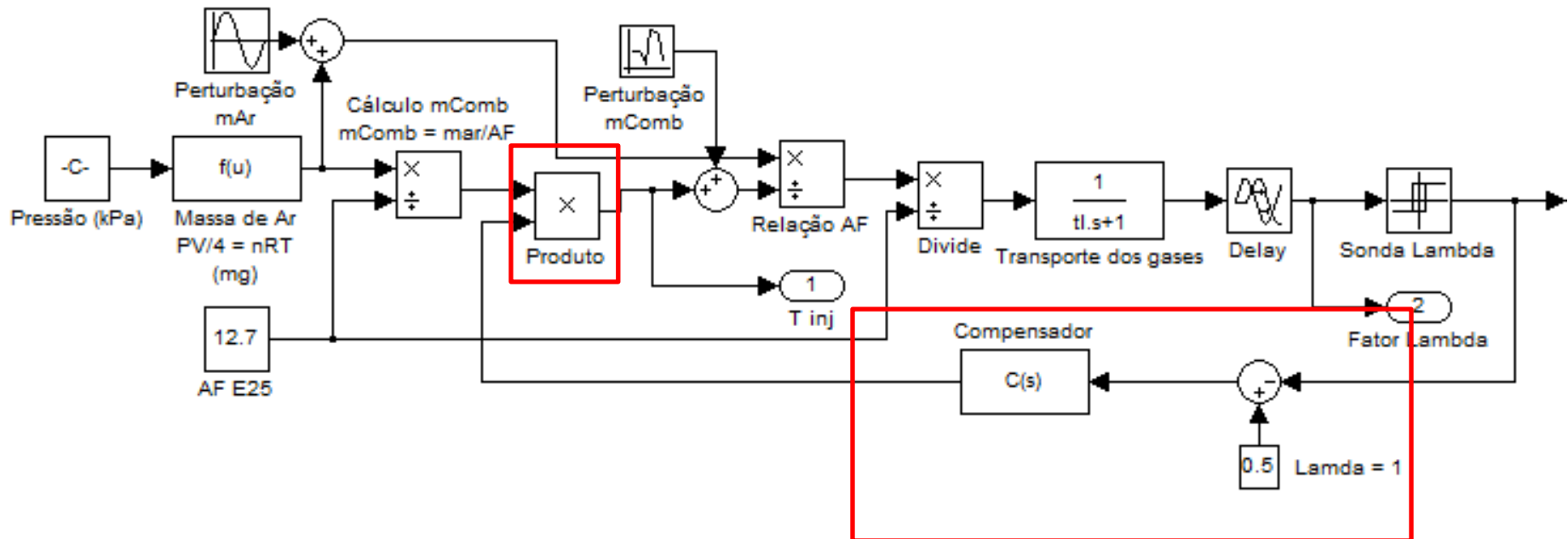


PROJETO E RESULTADOS OBTIDOS

- Utilizando como realimentação a sonda lambda de banda estreita

PROJETO

Figura 10 – Diagrama de blocos do sistema em malha fechada.



PROJETO

- Definição do compensador.
- Controlador PI.

$$C(s) = 1 + \left(P + I \frac{1}{s} \right) e(s)$$

- Ganho integral

$$I = T_i = \frac{2(C_{il} - 1)}{n * C_{il}} = \frac{2(4 - 1)}{n * 4} = \frac{3}{2n}$$

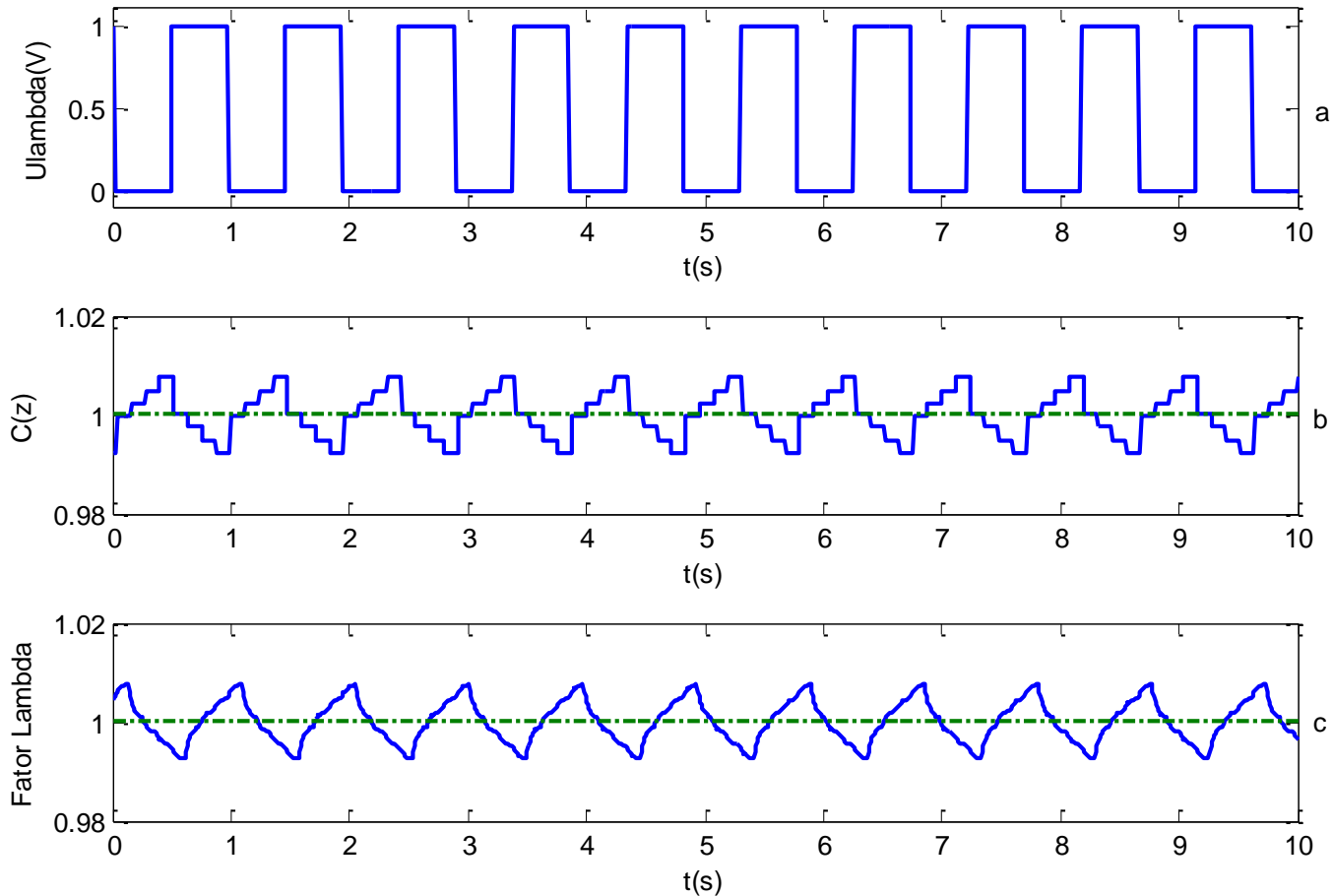
- Ganho proporcional

$$P = 0,01$$

RESULTADOS OBTIDOS

- Simulações em malha fechada:

Figura 11 – Resposta do sistema em malha fechada.

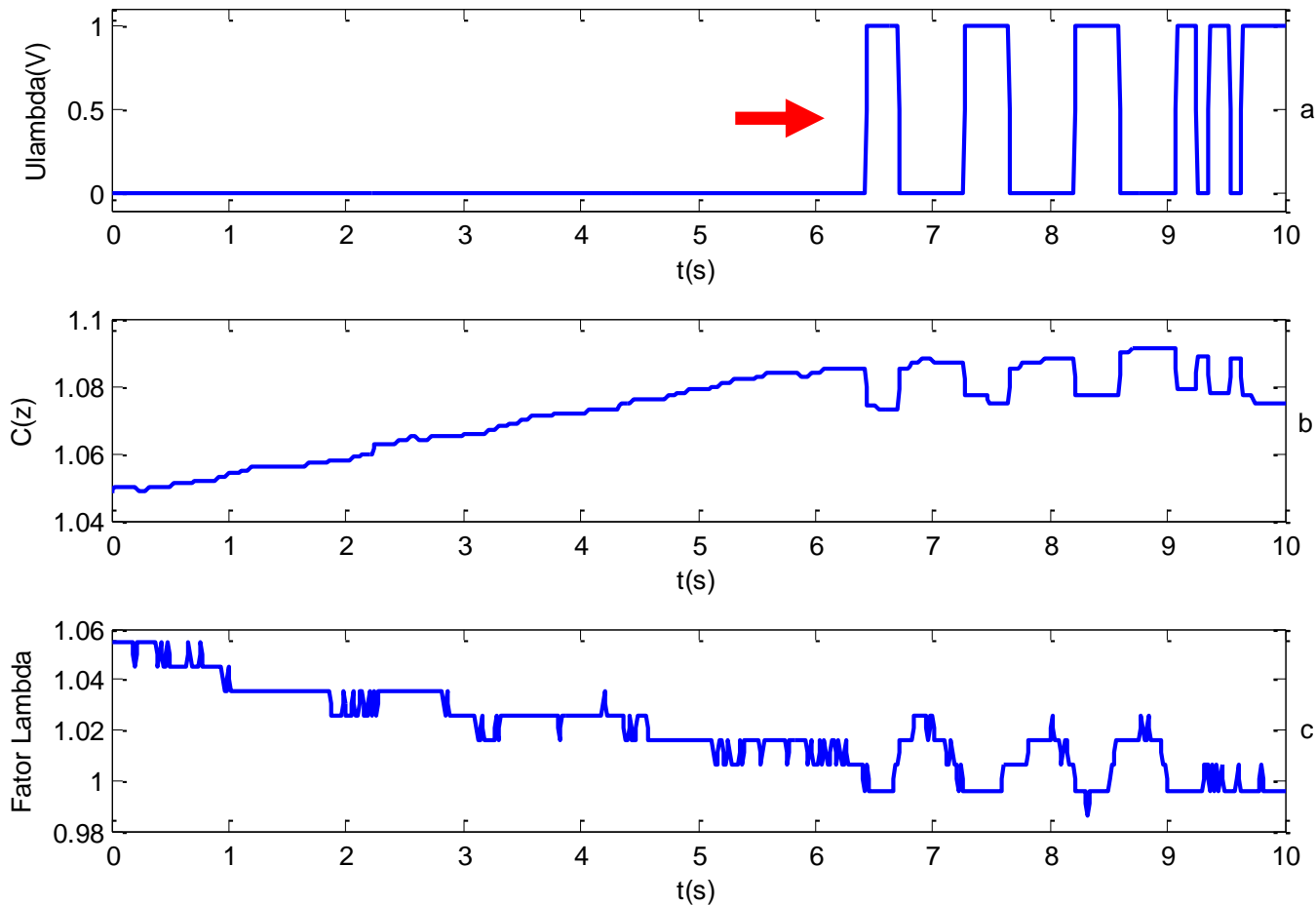


- λ médio = 1,000.

RESULTADOS OBTIDOS

- **Análise da resposta do sistema real em malha fechada:**

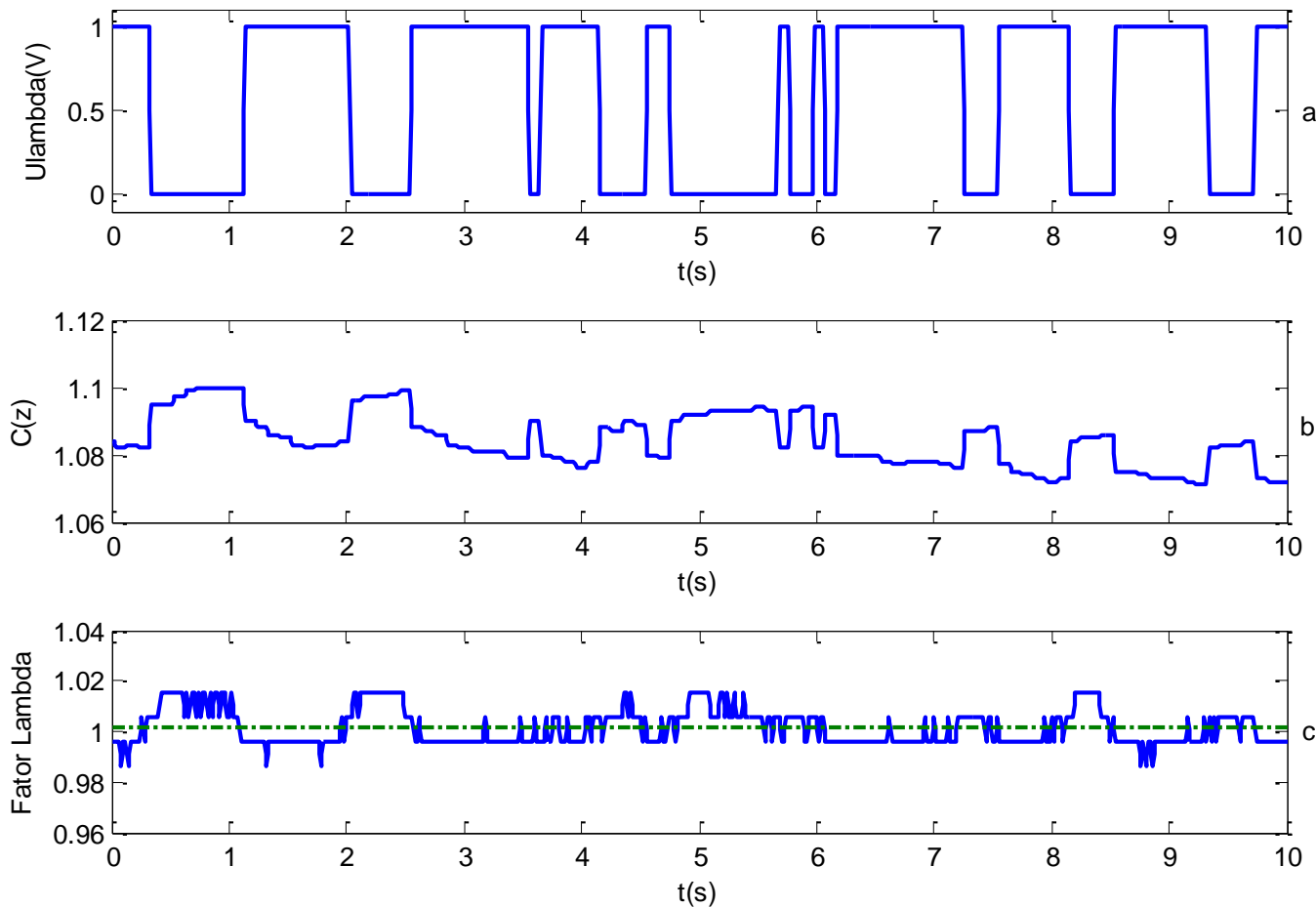
Figura 12 – Resposta dinâmica do sistema real em malha fechada.



RESULTADOS OBTIDOS

- **Análise da resposta do sistema real em malha fechada:**

Figura 13 – Resposta do sistema real em malha fechada.



- λ médio = 1,002.

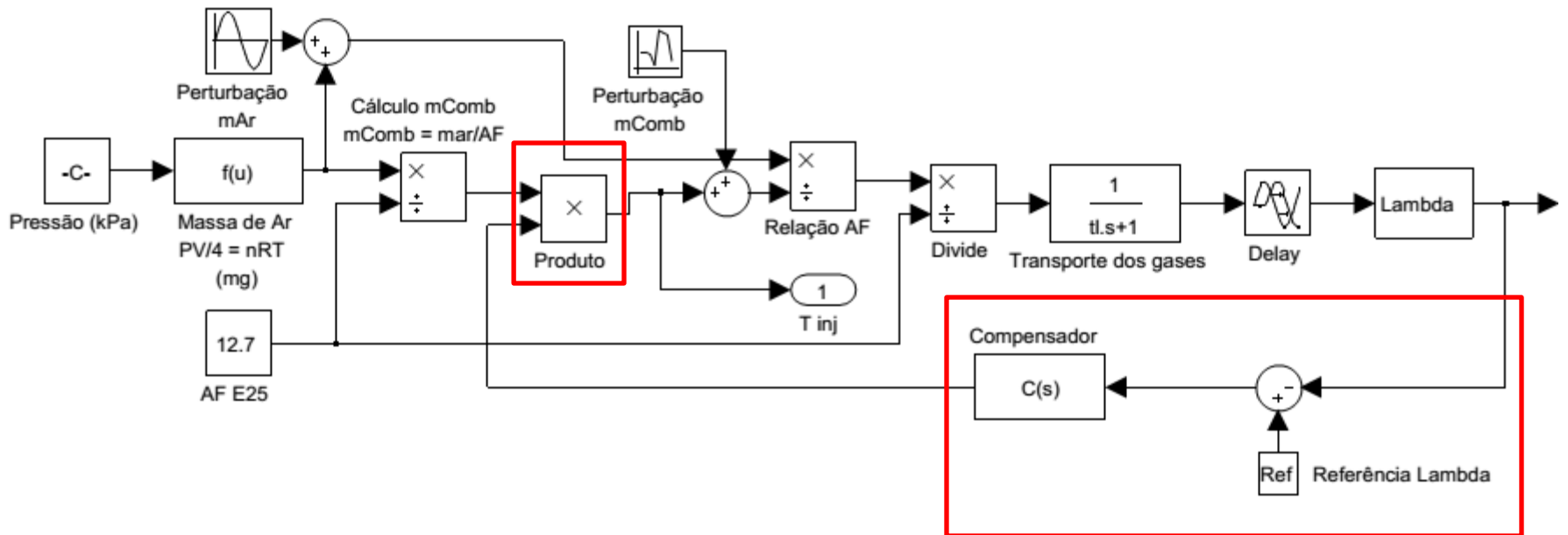
PROJETO E RESULTADOS OBTIDOS

- Utilizando como realimentação a sonda lambda de banda larga

PROJETO

- Definição do compensador.

Figura 14 – Diagrama de blocos do sistema em malha fechada.



PROJETO

- Controlador PI.

$$C(s) = 1 + \left(P + I \frac{1}{s} \right) e(s)$$

- **Ganhos calculados pelo método da síntese direta:**

- Ganho proporcional

$$P = \frac{1}{k} \frac{t_{le}}{t_{de} + t_c}$$

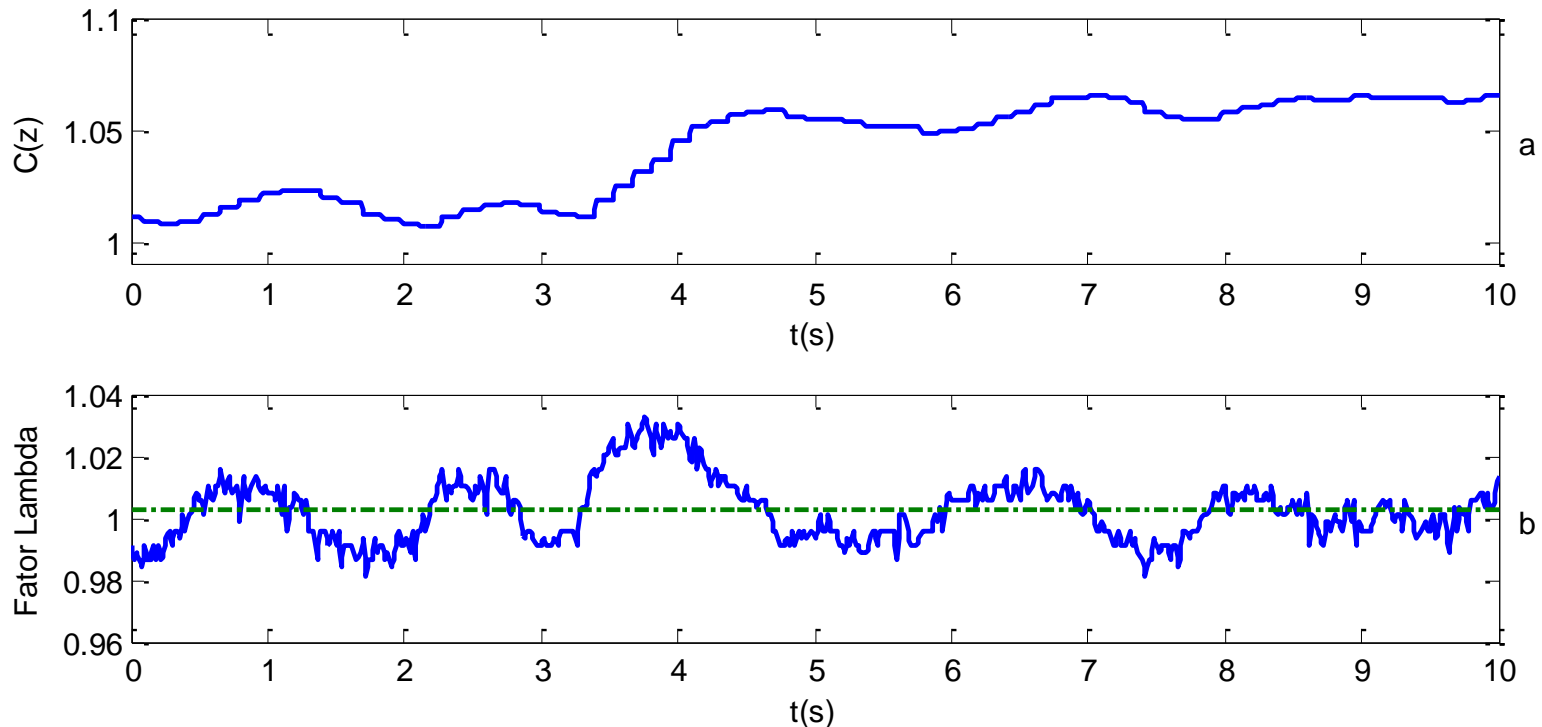
- Ganho integral

$$I = \frac{P}{t_{le}}$$

RESULTADOS OBTIDOS

- **Análise da resposta do sistema real em malha fechada:**
- t_c 1, 2 e 4 segundos; e
- Rotação do motor em marcha lenta (≈ 900), 1200, 2000 e 3000 RPM.

Figura 16 – Resposta do sistema real em malha fechada – 900 RPM.



- $\text{Lambda médio} = 1,002$.

RESULTADOS OBTIDOS

- **Análise da resposta do sistema real em malha fechada:**

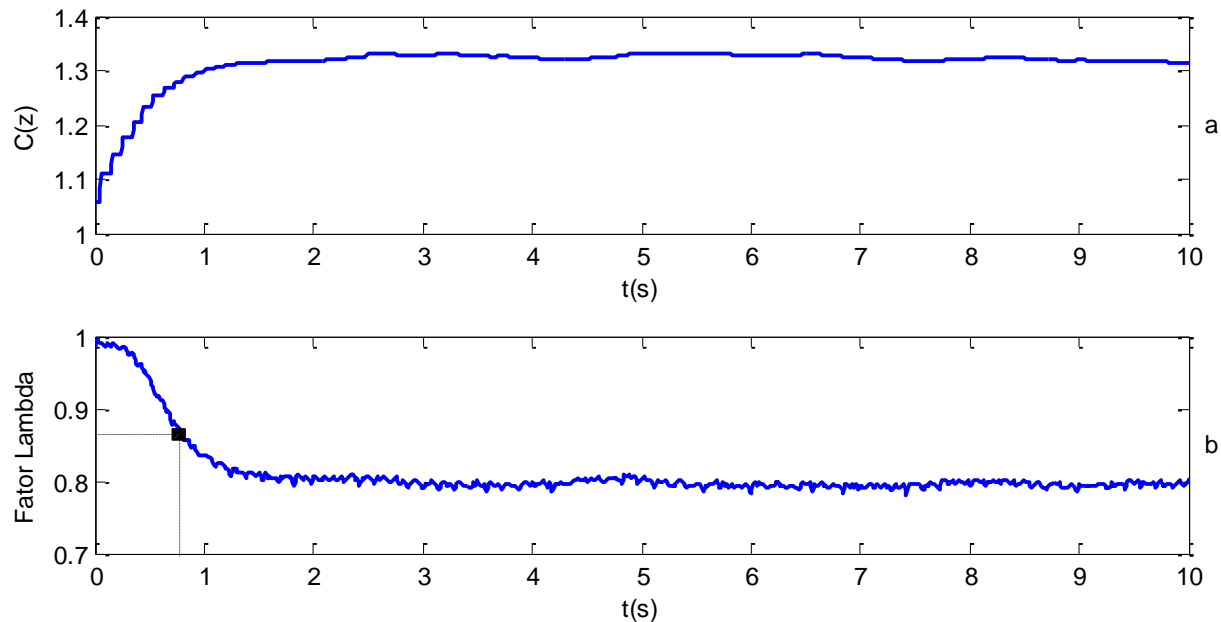
Tabela 1 – Comparativo da resposta do sistema para diferentes valores de t_c e diferentes rotações.

Tempo de resposta t_c (s)	Rotação (RPM)	Lambda médio	Erro lambda (%)
1	900	1,002	0,2
	1200	1,0013	0,13
	2000	0,9953	0,47
	3000	0,9955	0,45
2	900	1,0017	0,17
	1200	1,0006	0,06
	2000	0,9996	0,04
	3000	0,9956	0,44
4	900	1,0036	0,36
	1200	0,9983	0,17
	2000	0,9983	0,17
	3000	0,9951	0,49

RESULTADOS OBTIDOS

- **Análise da resposta do sistema real em malha fechada:**

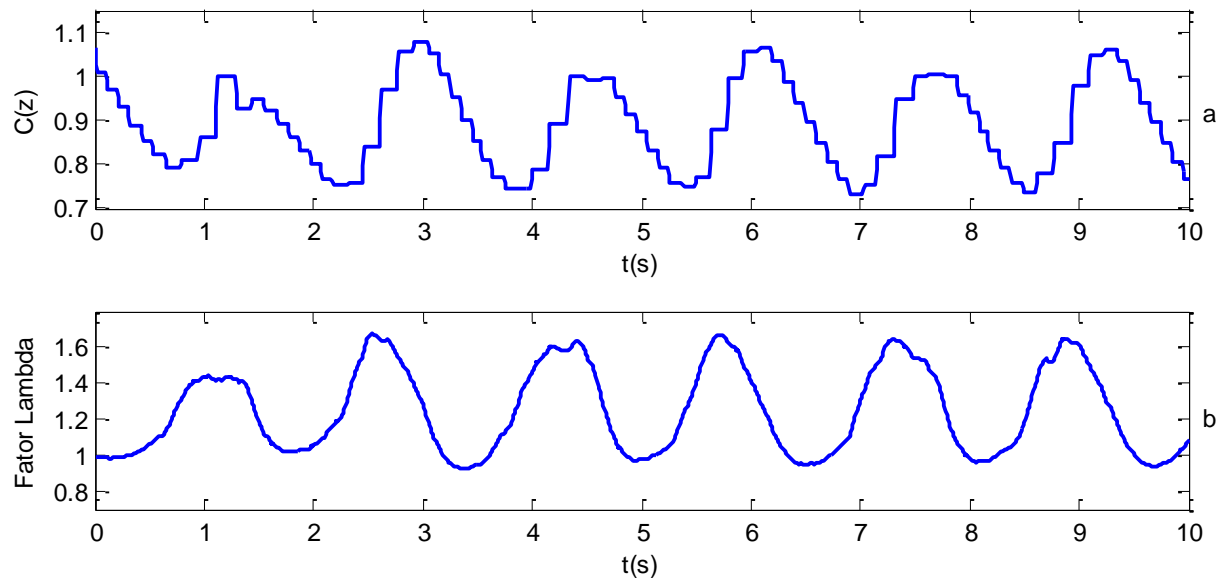
Figura 17 – Resposta ao degrau do sistema em malha fechada – $t_c = 1s$, referência 0,8 *lambda*, referência de 1200 RPM.



RESULTADOS OBTIDOS

- **Análise da resposta do sistema real em malha fechada:**

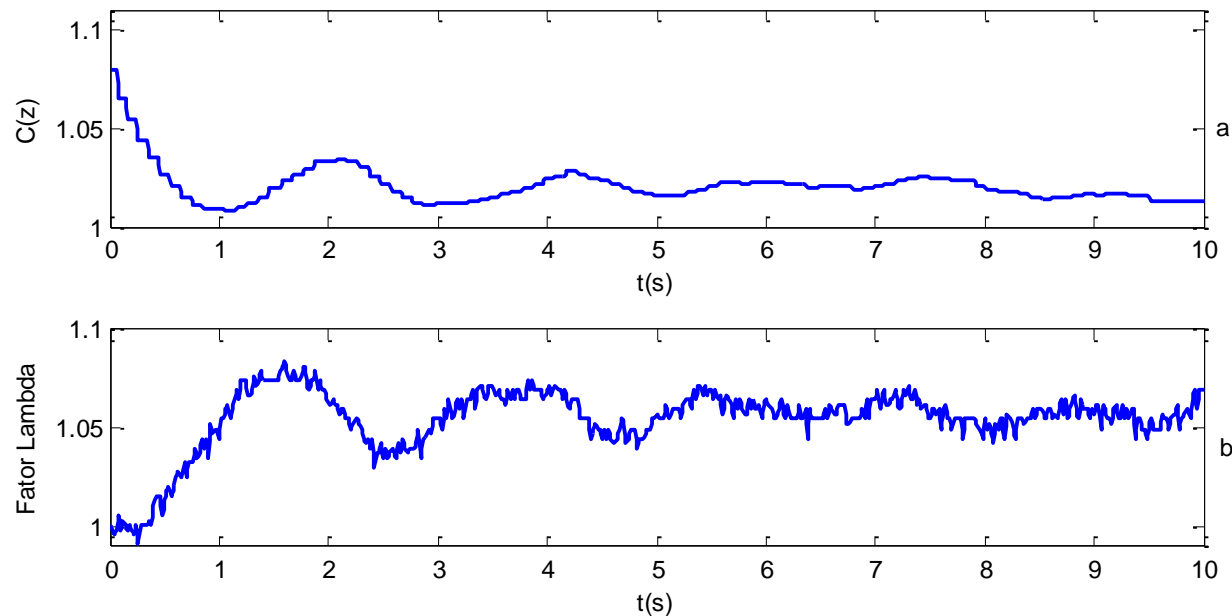
Figura 18 – Resposta ao degrau do sistema em malha fechada – $t_c = 1s$, referência 1,2 *lambda*, referência de 1200 RPM.



RESULTADOS OBTIDOS

- **Análise da resposta do sistema real em malha fechada:**

Figura 19 – Resposta ao degrau do sistema em malha fechada – $t_c = 1s$, referência 1,05 λ , referência de 1200 RPM.



RESULTADOS OBTIDOS

- $t_c = 2s$ apresentou o melhor compromisso estabilidade e desempenho
- *Lambda* dentro do limite definido de 0,5%
- Menor erro no controle pela banda larga em relação ao de banda estreita
- Instabilidade na região de *lambda* pobre

REFERÊNCIAS

BALENOVIC, M. **Modeling and Model-Based Control of a Three-Way Catalytic Converter**. Tese de Doutorado. Technische Universiteit Eindhoven. Eindhoven, p. 179. 2002.

DENTON, T. **Automobile Electrical and Electronic Systems**. 3ª. ed. Londres: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004.

GUZZELLA, L.; ONDER, C. H. **Introduction to Modeling and Control of Internal Combustion Engine Systems**. 2ª. ed. Zurique: Springer-Verlag, 2010.

PEREIRA, B. C. F. **Unidade de Gerenciamento Eletrônico de um Motor Volkswagen 2.0L: Projeto Otto II**. Escola Politécnica da USP. São Paulo. 2013.

UMICORE, A. C. Umicore, 2015. Disponível em:

<http://www.umicore.com.br/nossosNegocios/catalysis/catalisador_automotivo/>. Acesso em: 10 Março 2015.

OBRIGADO

Bruno Silva Pereira
bruno.sp@usp.br
(11) 98269 3229