

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

Bruno Silva Pereira

João Francisco Justo, Armando Laganá



SUMÁRIO

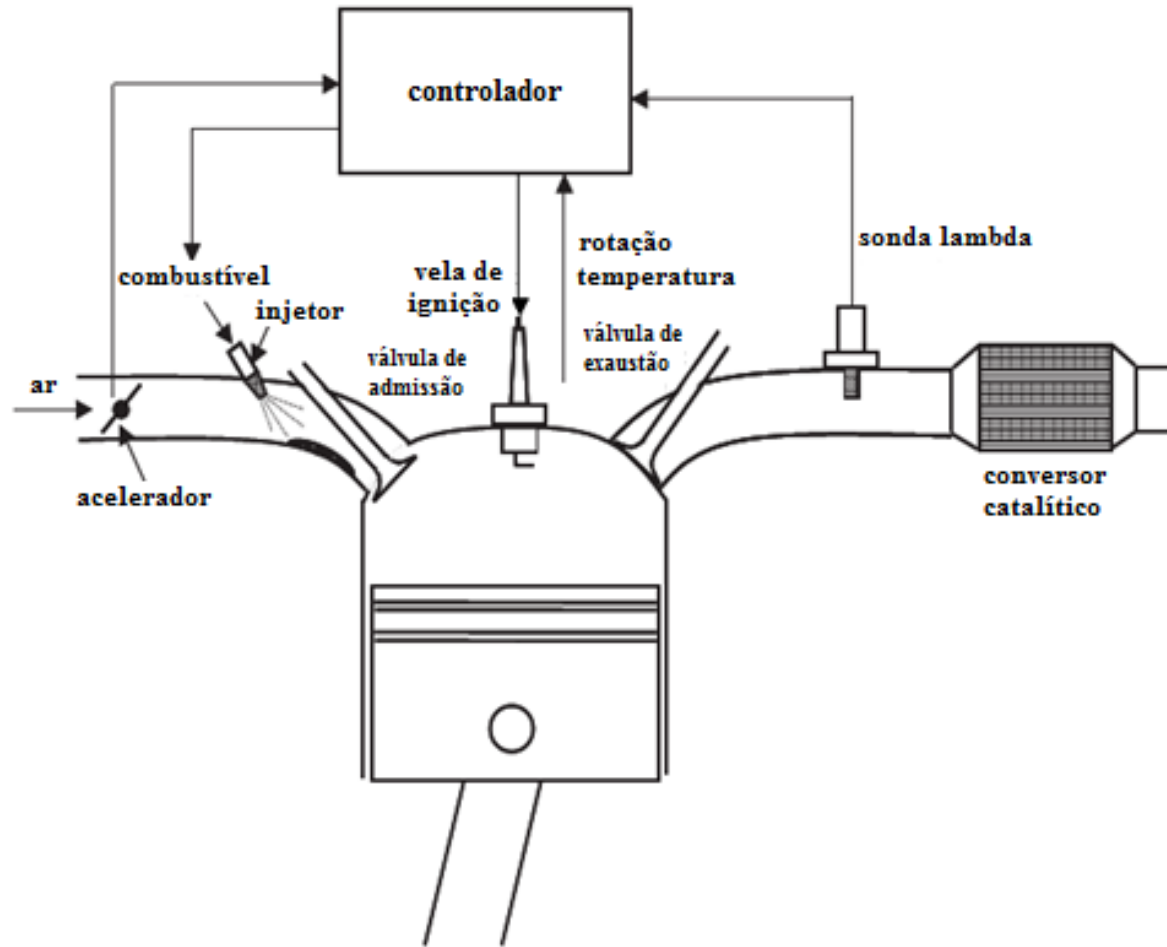
1. INTRODUÇÃO
2. RELAÇÃO AR/COMBUSTÍVEL
3. METODOLOGIA
4. PROJETO
5. RESULTADOS OBTIDOS
6. CONCLUSÕES

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

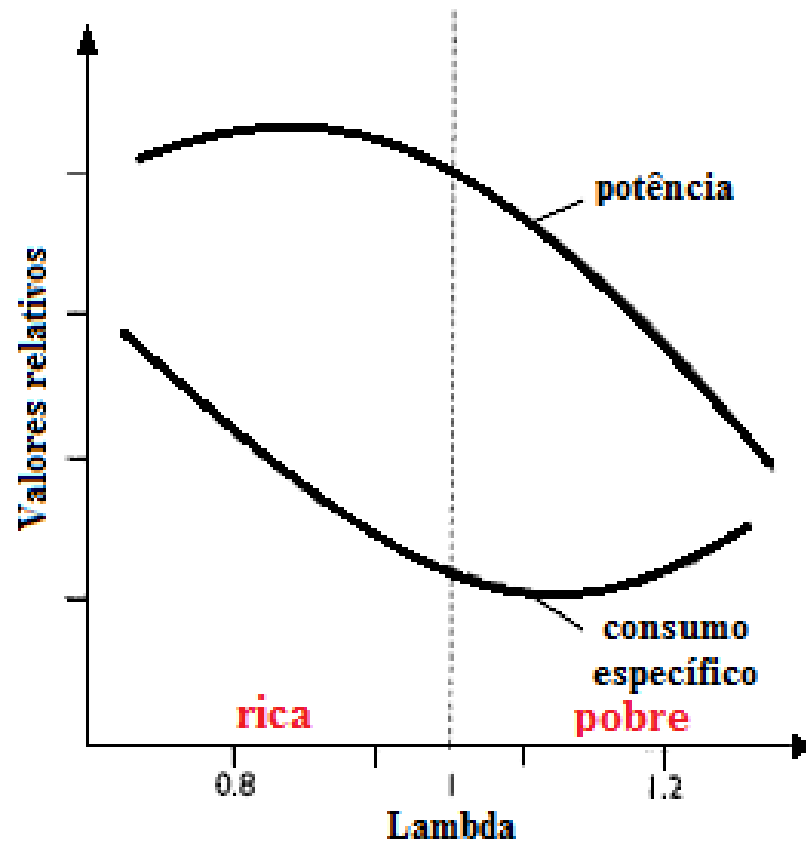
$$\lambda = \frac{\text{mistura a/c atual}}{\text{mistura a/c estequiométrica}}$$

- $\lambda < 1$, 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.



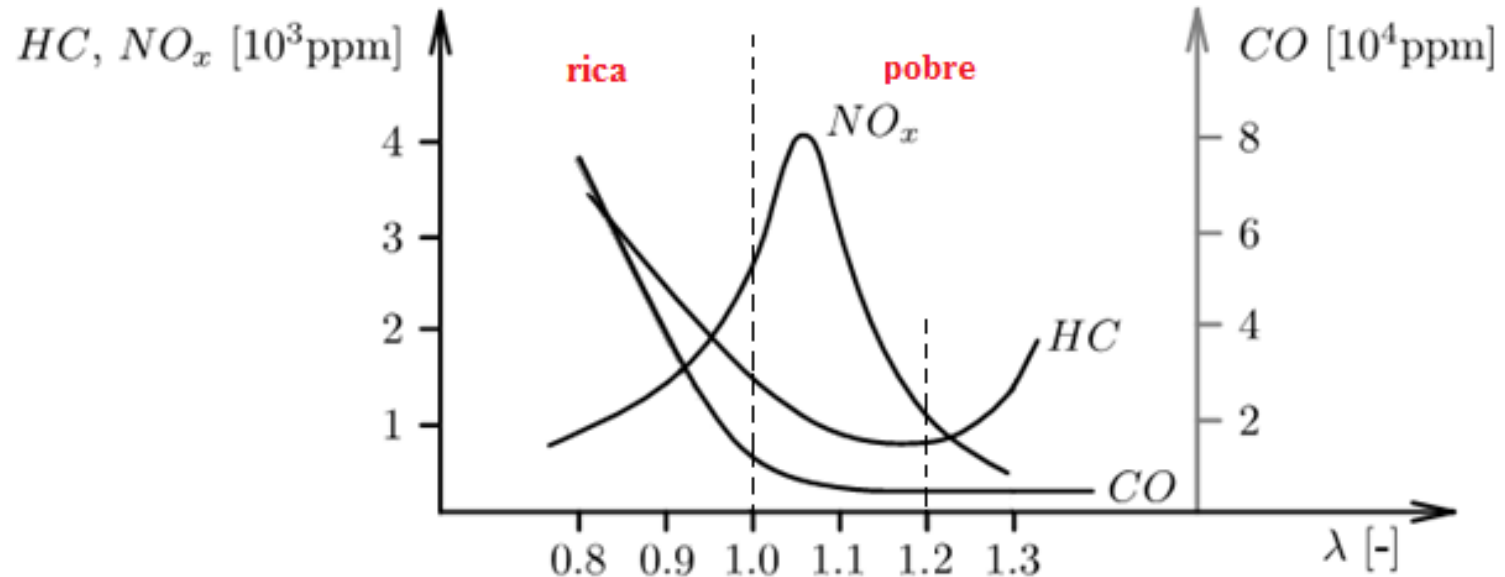
FONTE: Adaptado de (DENTON, 2004).

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.



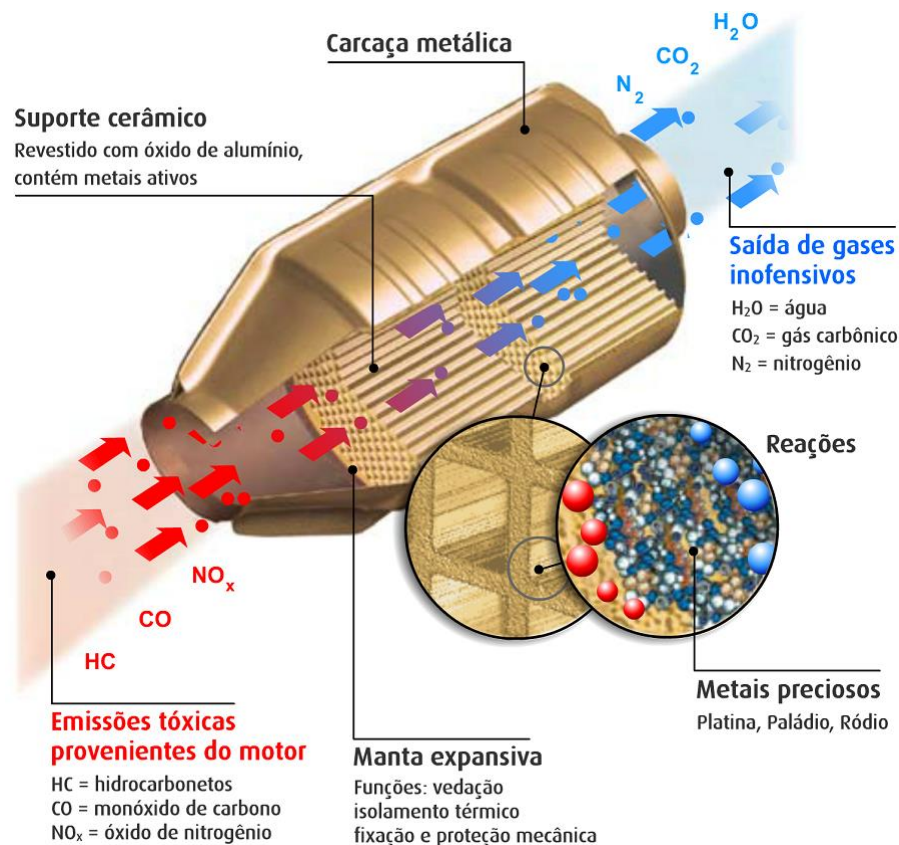
FONTE: Adaptado de (GUZZELLA e ONDER, 2010).

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.

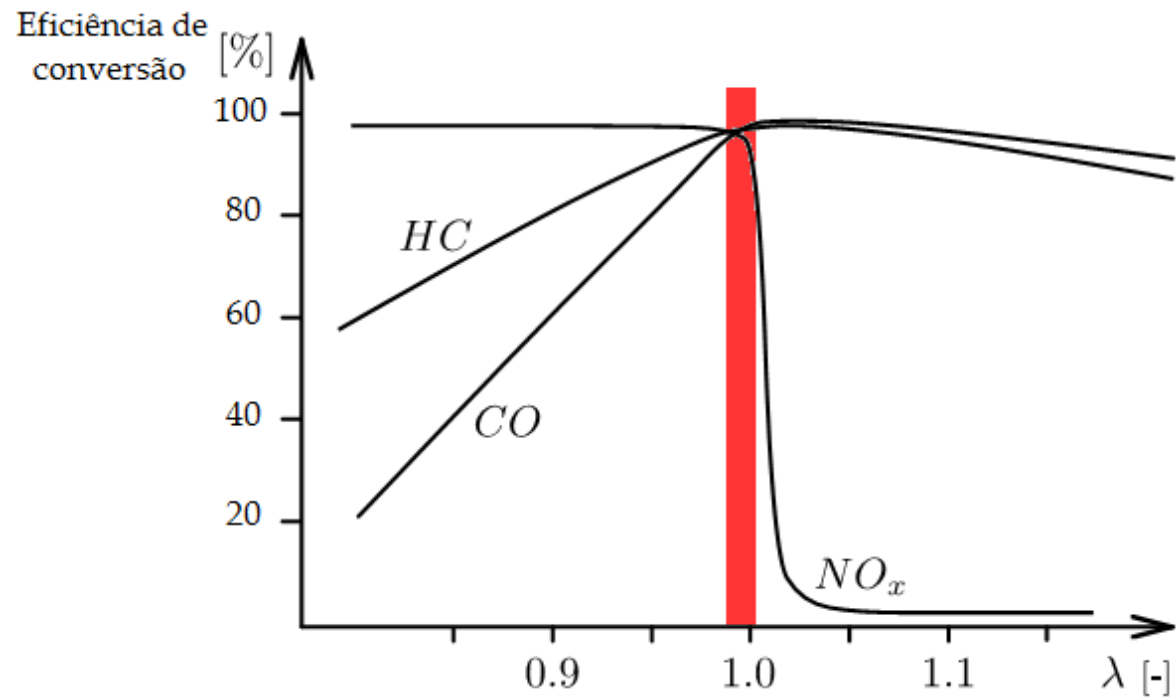


FONTE: (UMICORE, 2015).

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*:

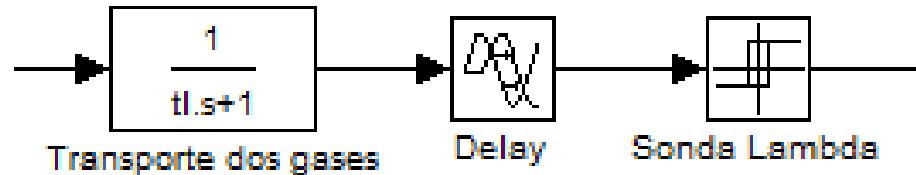
$$PV = m_a RT$$

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

METODOLOGIA

- Definição do modelo:

Figura 7 – Modelo da mistura ar/combustível.



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

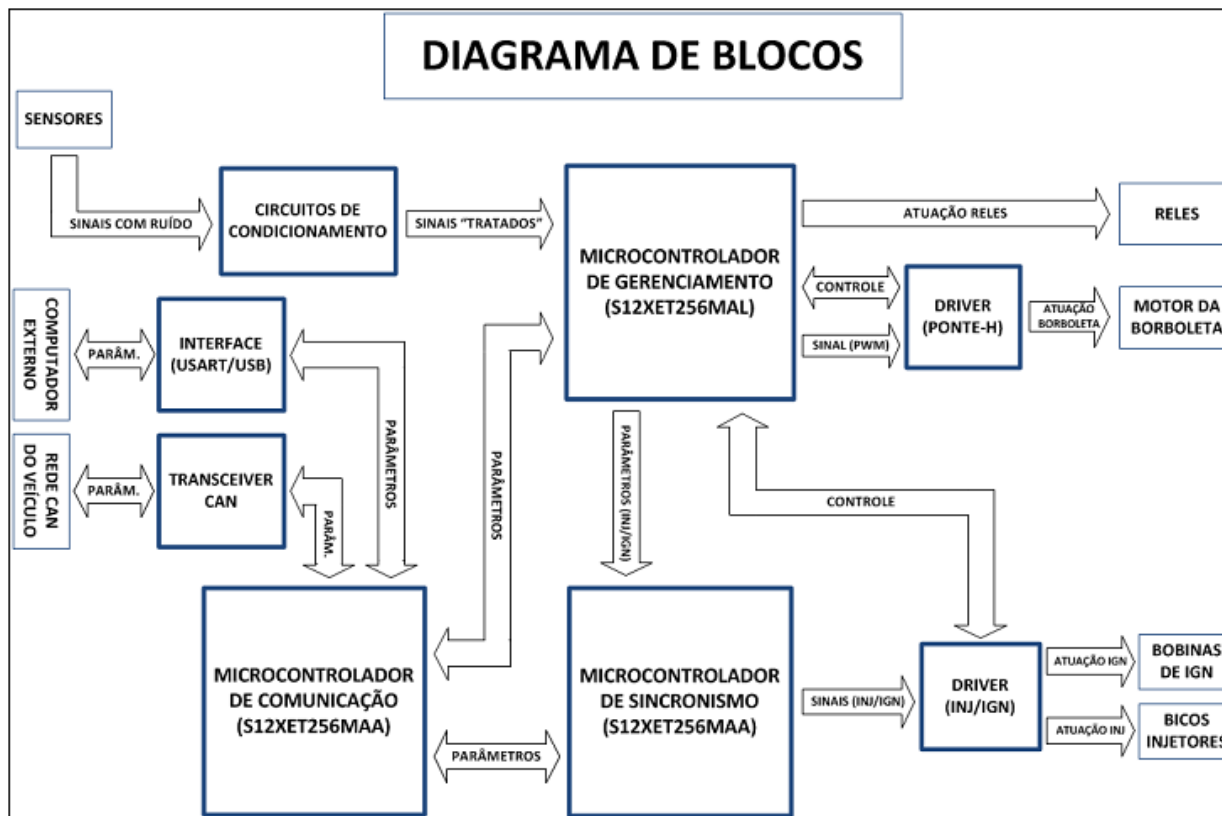
$$delay = 2 t_l$$

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

METODOLOGIA

- Unidade de gerenciamento eletrônico:

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

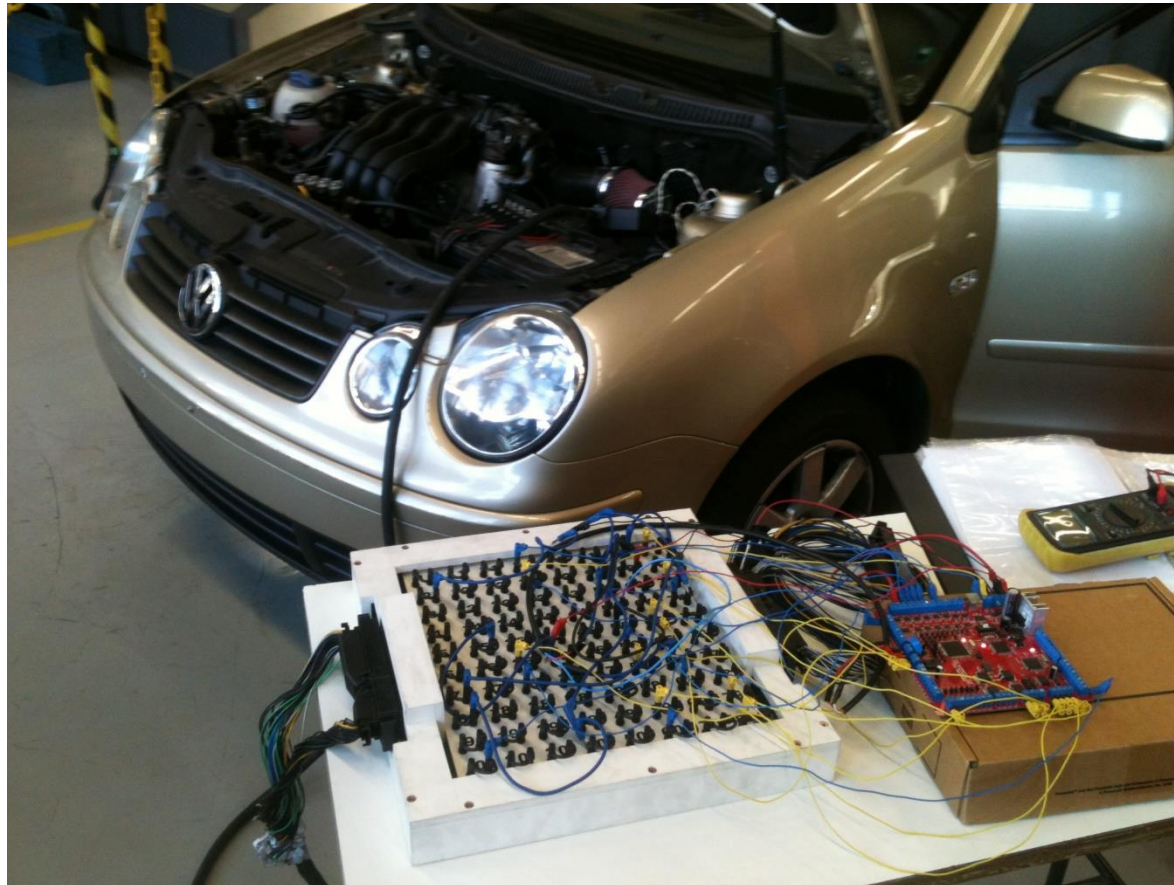


FONTE: (PEREIRA, 2013).

METODOLOGIA

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

Figura 9 – Motor utilizado nos testes.

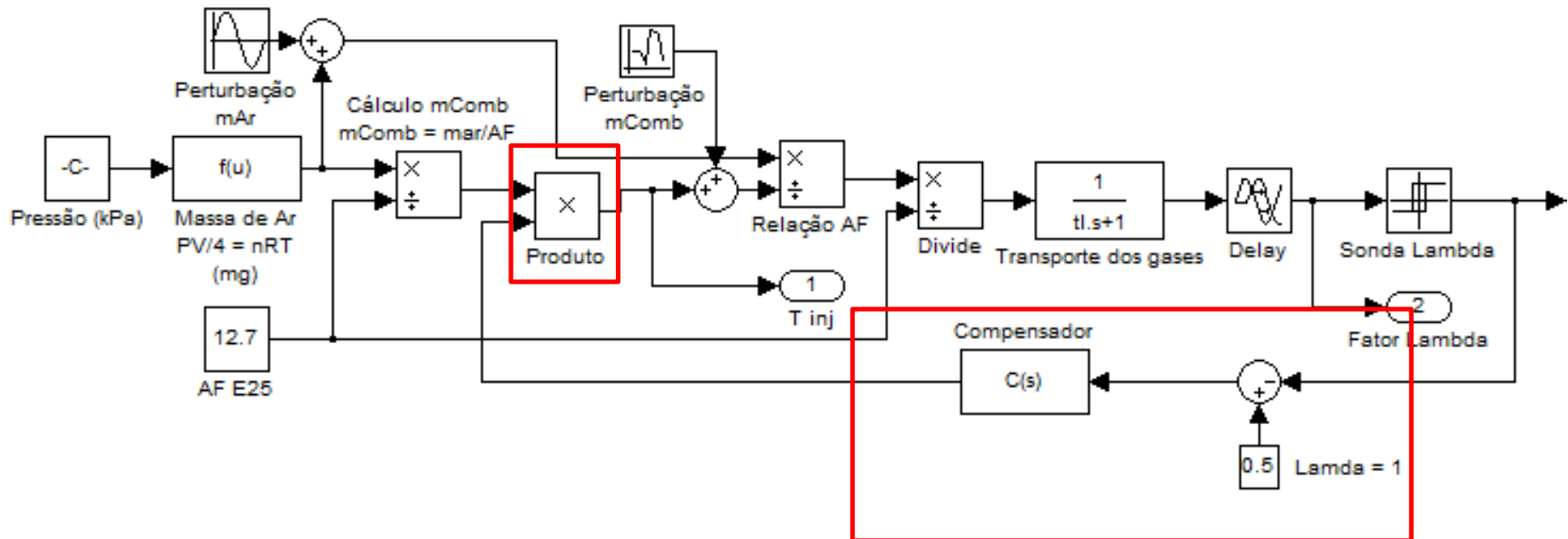


PROJETO E RESULTADOS OBTIDOS

- 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

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

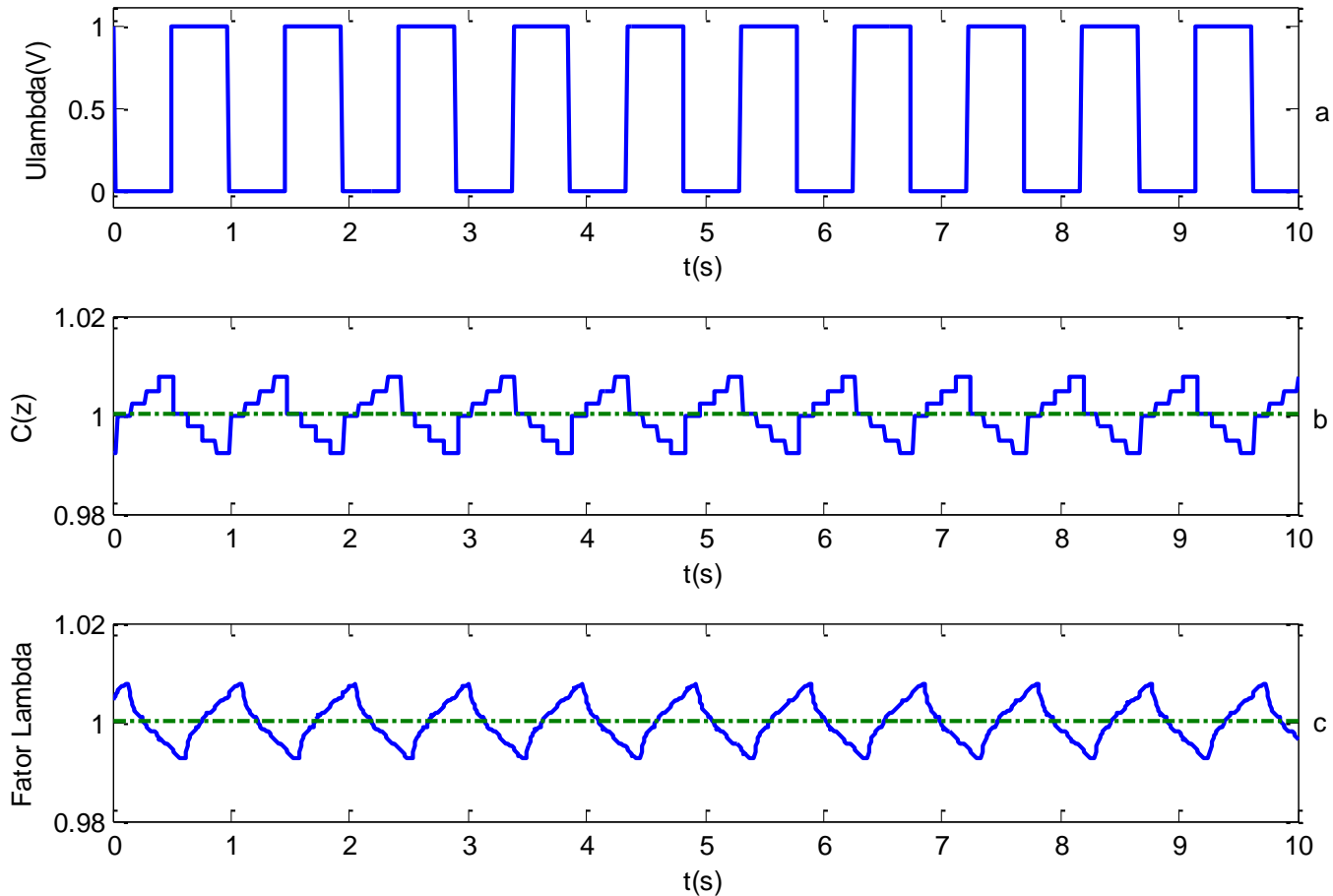
- Ganho proporcional

$$P = 0,01$$

RESULTADOS OBTIDOS

- Simulações em malha fechada:

Figura 11 – Resposta do sistema em malha fechada.

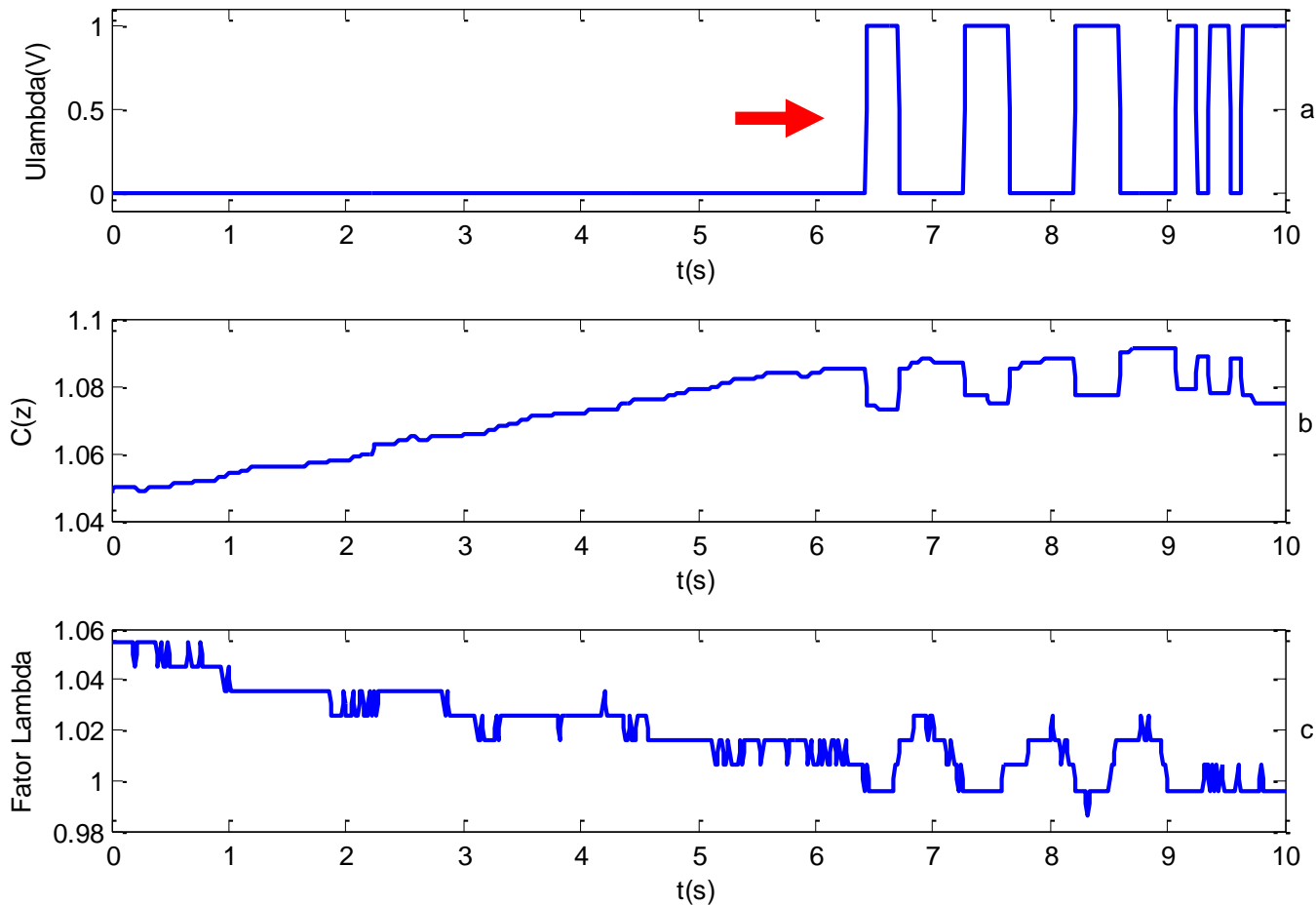


- λ médio = 1,000.

RESULTADOS OBTIDOS

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

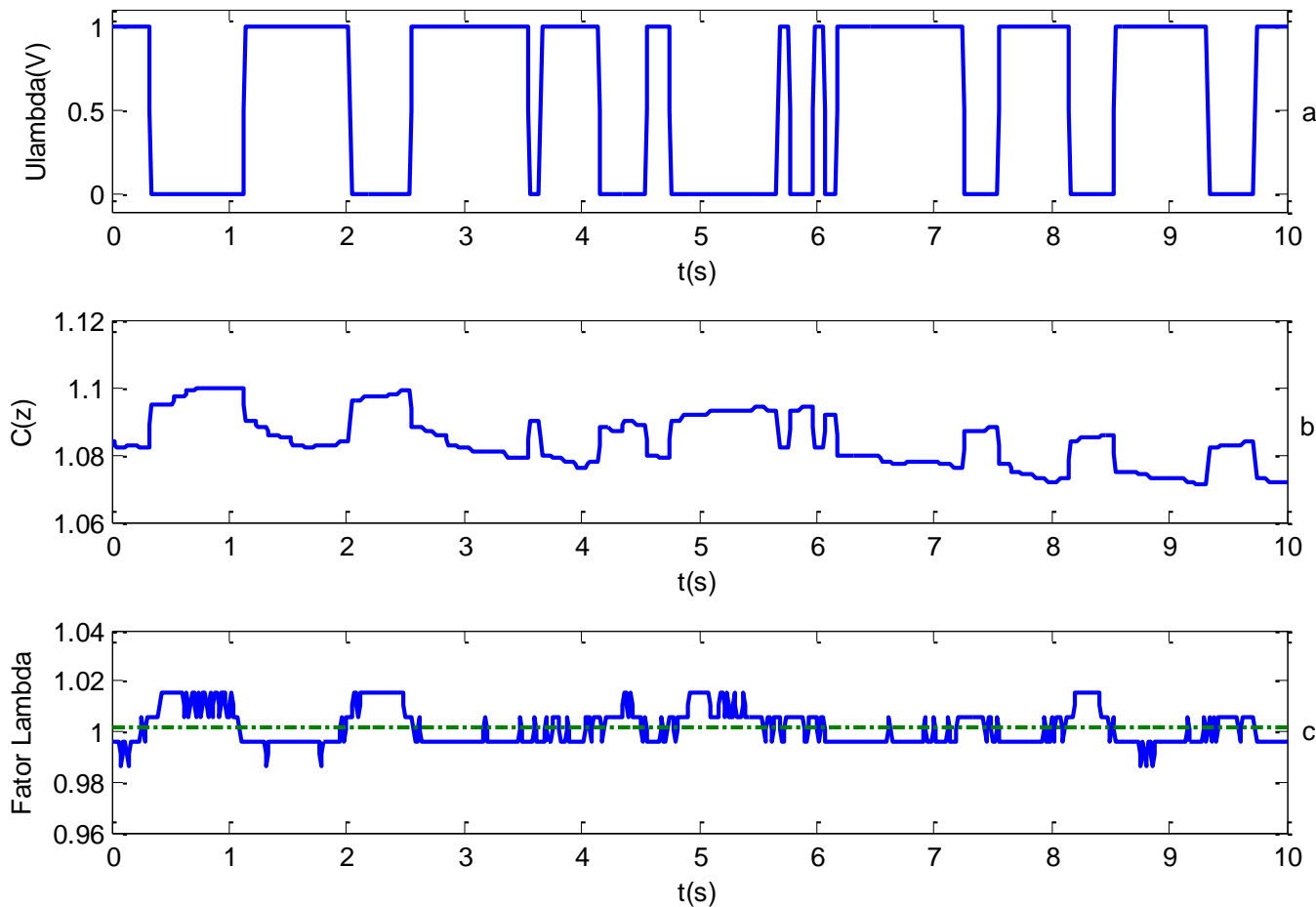
Figura 12 – Resposta dinâmica do sistema real em malha fechada.



RESULTADOS OBTIDOS

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

Figura 13 – Resposta do sistema real em malha fechada.



- λ médio = 1,002.

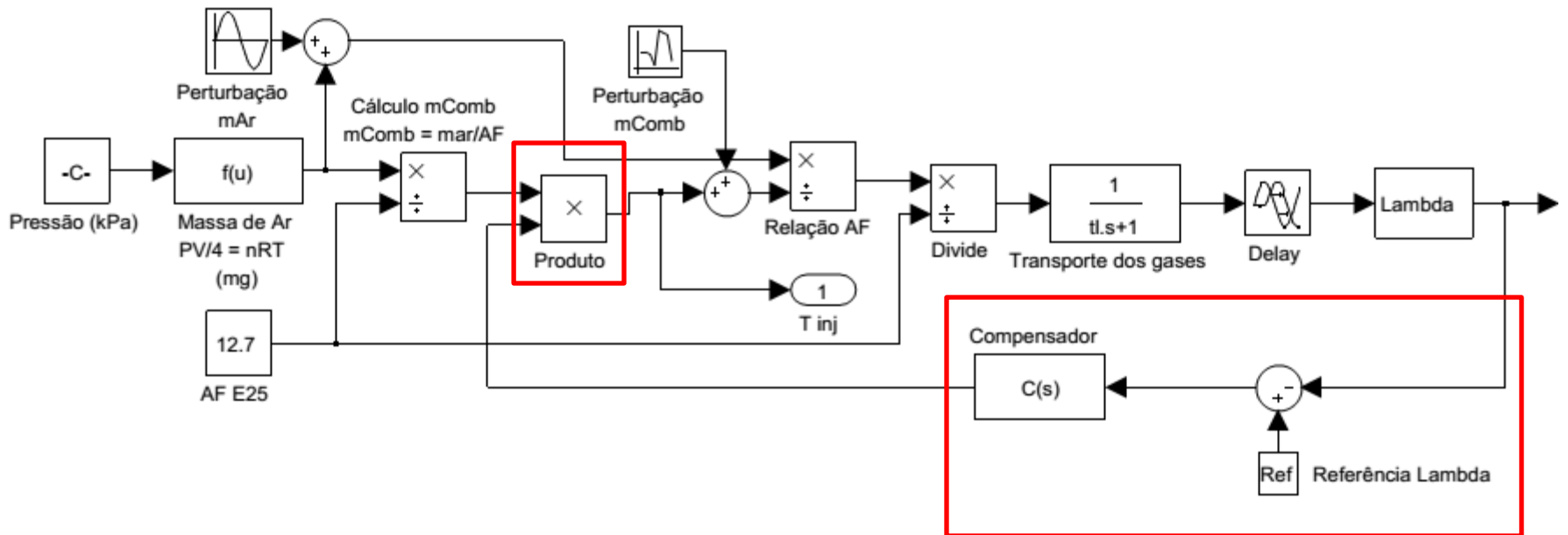
PROJETO E RESULTADOS OBTIDOS

- 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

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

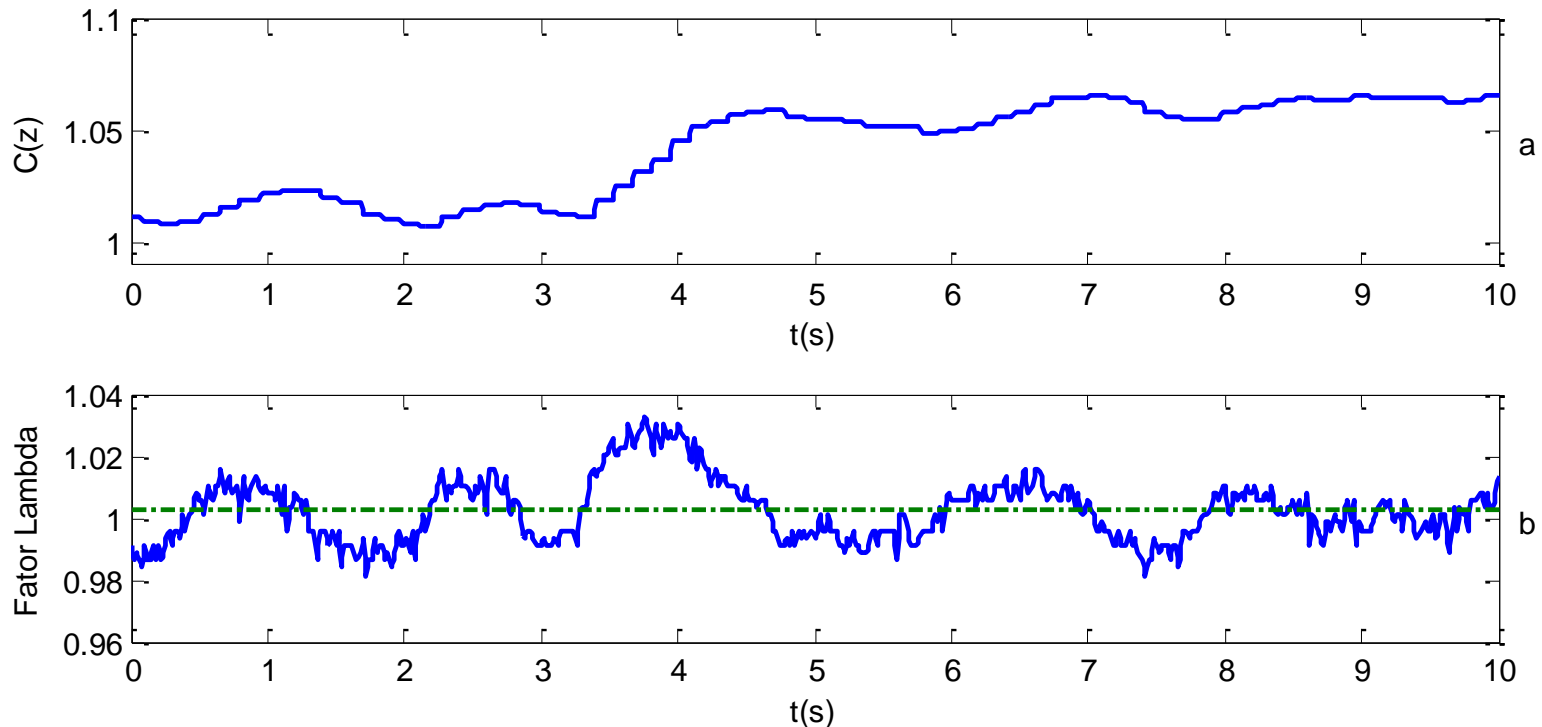
- Ganho integral

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

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.



- λ médio = 1,002.

RESULTADOS OBTIDOS

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

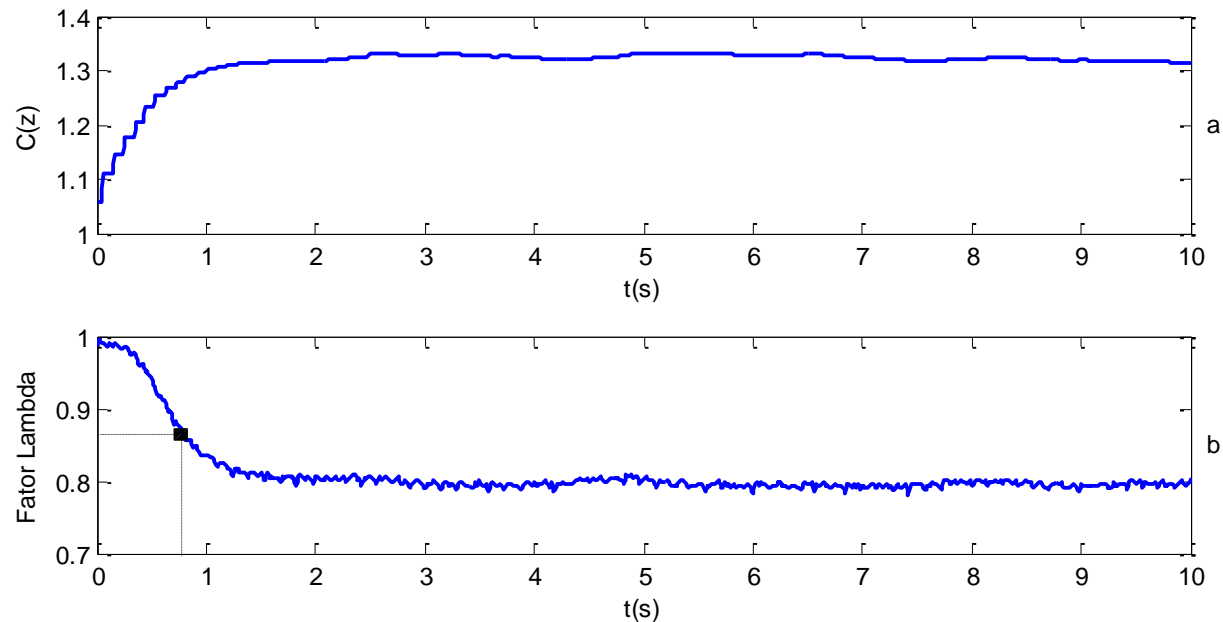
Tabela 1 – Comparativo da resposta do sistema para diferentes valores de t_c e diferentes rotações.

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:**

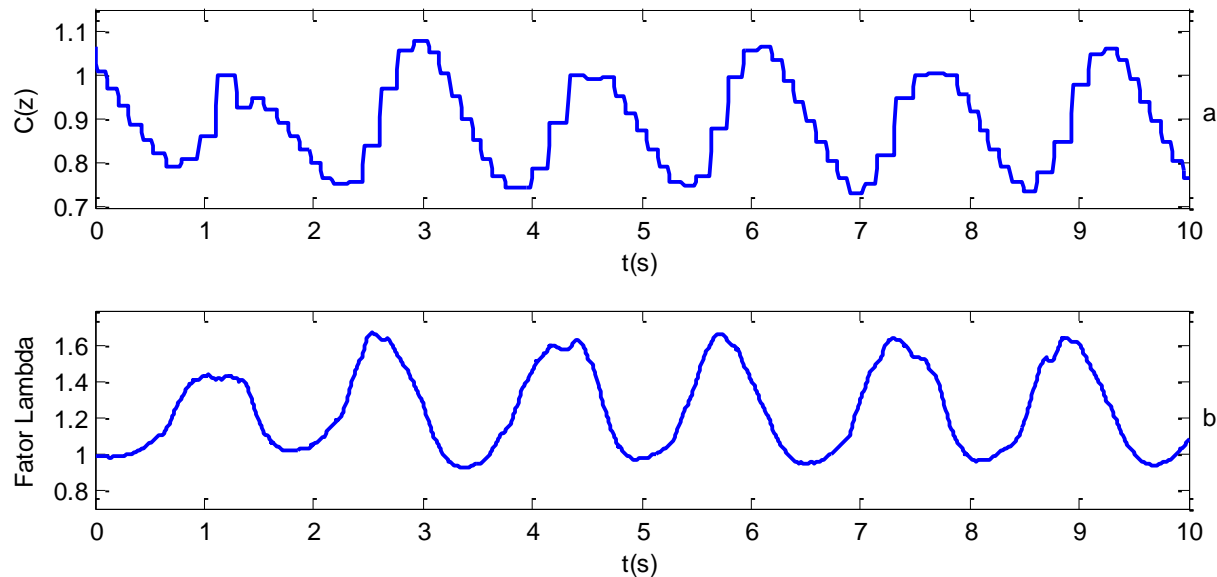
Figura 17 – Resposta ao degrau do sistema em malha fechada – $t_c = 1s$, referência 0,8 *lambda*, referência de 1200 RPM.



RESULTADOS OBTIDOS

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

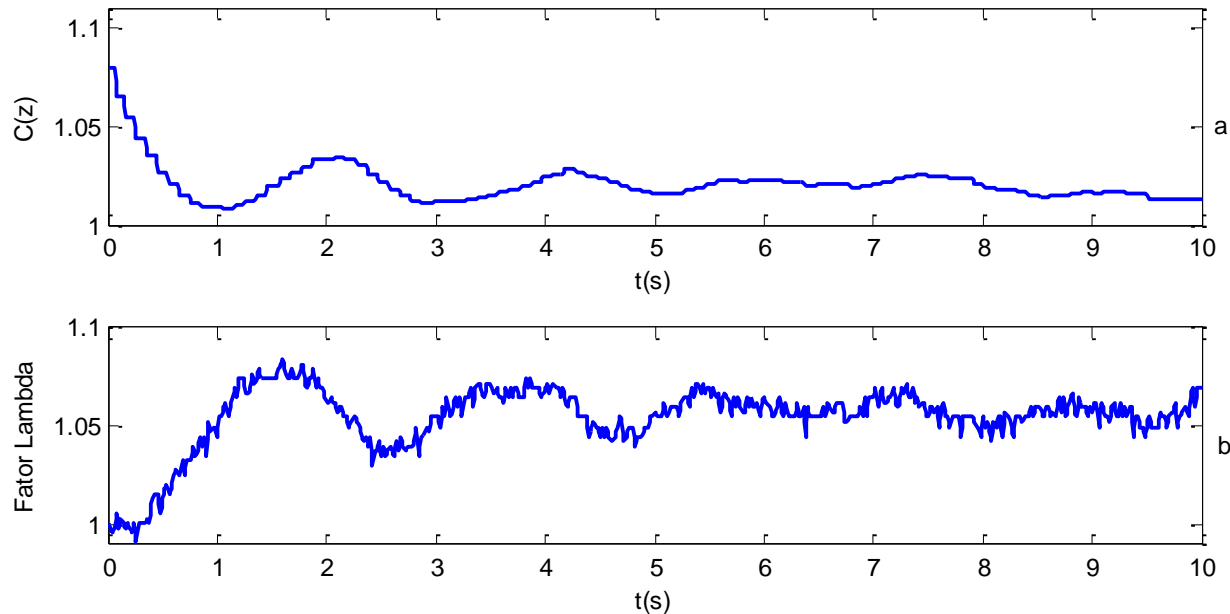
Figura 18 – Resposta ao degrau do sistema em malha fechada – $t_c = 1s$, referência 1,2 *lambda*, referência de 1200 RPM.



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 *lambda*, 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