



ESCOLA
POLITÉCNICA
DA USP



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

Bruno Silva Pereira

Orientador: Prof. Dr. João Francisco Justo Filho

2015



SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO
2. OBJETIVOS
3. MISTURA AR/COMBUSTÍVEL
4. METODOLOGIA
5. PROJETO
6. RESULTADOS OBTIDOS
7. CONCLUSÕES
8. PROPOSTAS FUTURAS



INTRODUÇÃO

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



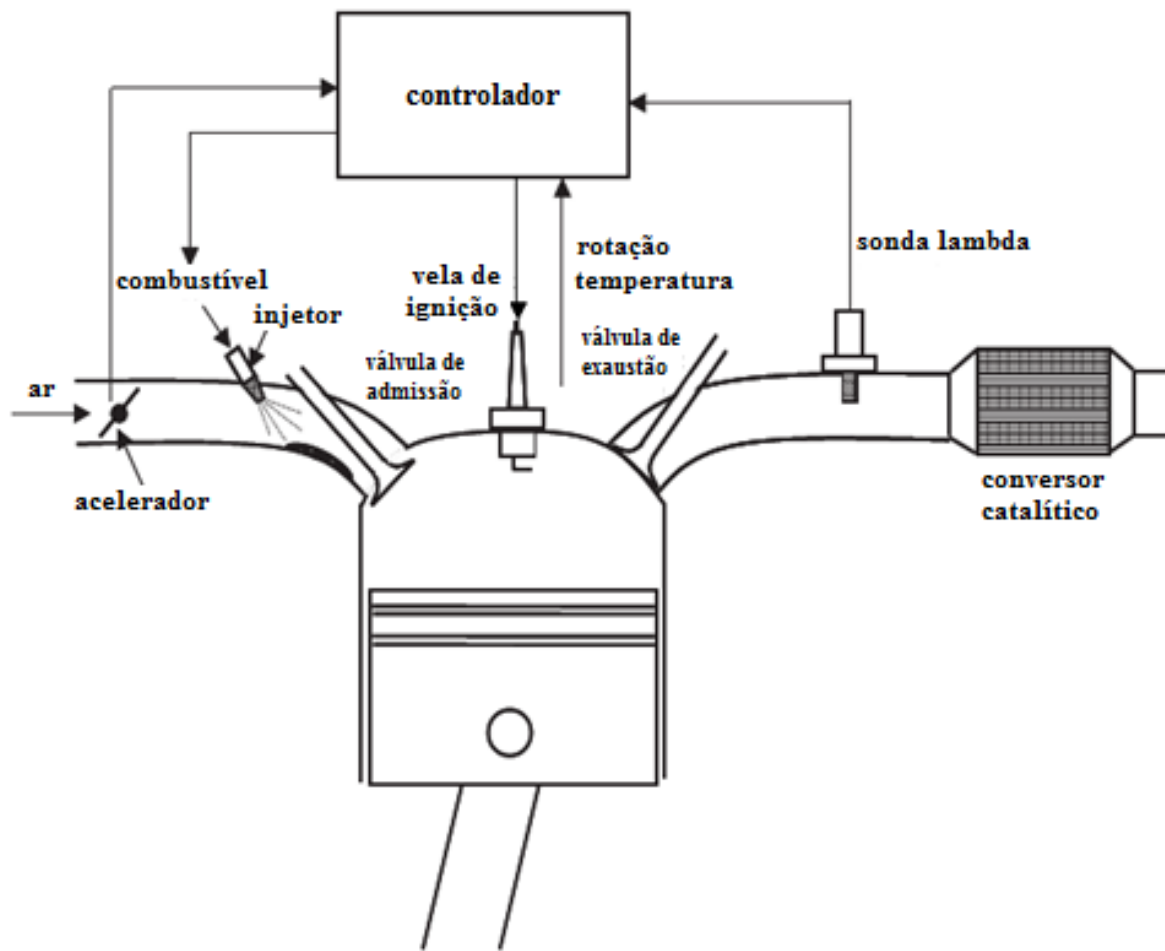
OBJETIVOS

- Estudo da fenomenologia da mistura ar/combustível.
- Estudo dos modelos.
- Desenvolver o controle da mistura ar/combustível.
- Realizar simulações.
- Aplicar no veículo e validar.



Relação ar/combustível

Figura 1 – Sistema de gerenciamento do motor.

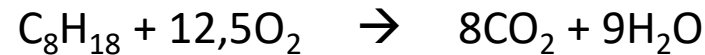


FONTE: Adaptado de (BALENOVIC, 2002).



Relação ar/combustível

- Relação ar/combustível
- Estequiométrica



Relação estequiométrica
da Gasolina: 14,7

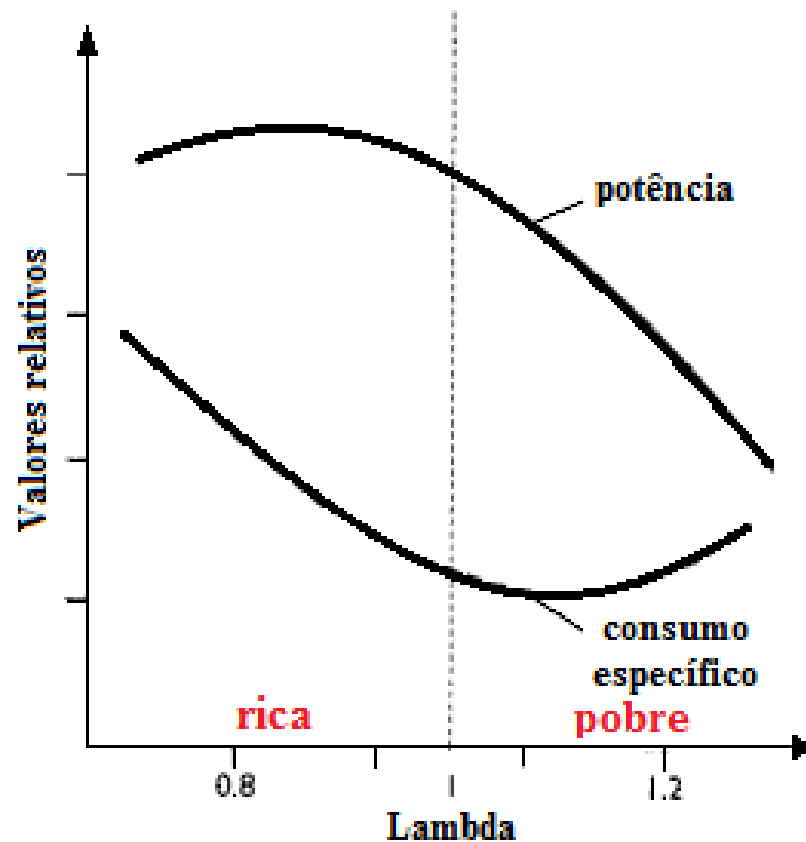
$$\lambda = \frac{\text{mistura a/c atual}}{\text{mistura a/c estequiométrica}}$$

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



Influência de *Lambda* no funcionamento do motor

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



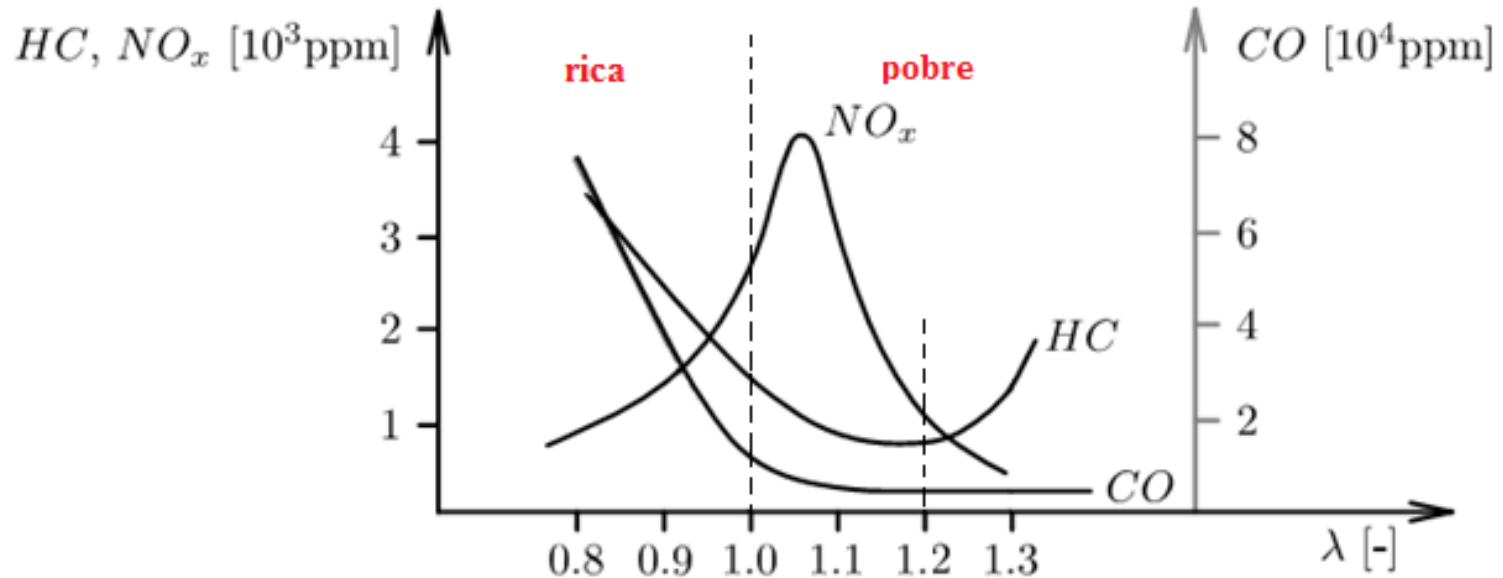
FONTE: Adaptado de (DENTON, 2004).



Emissão de poluentes

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

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



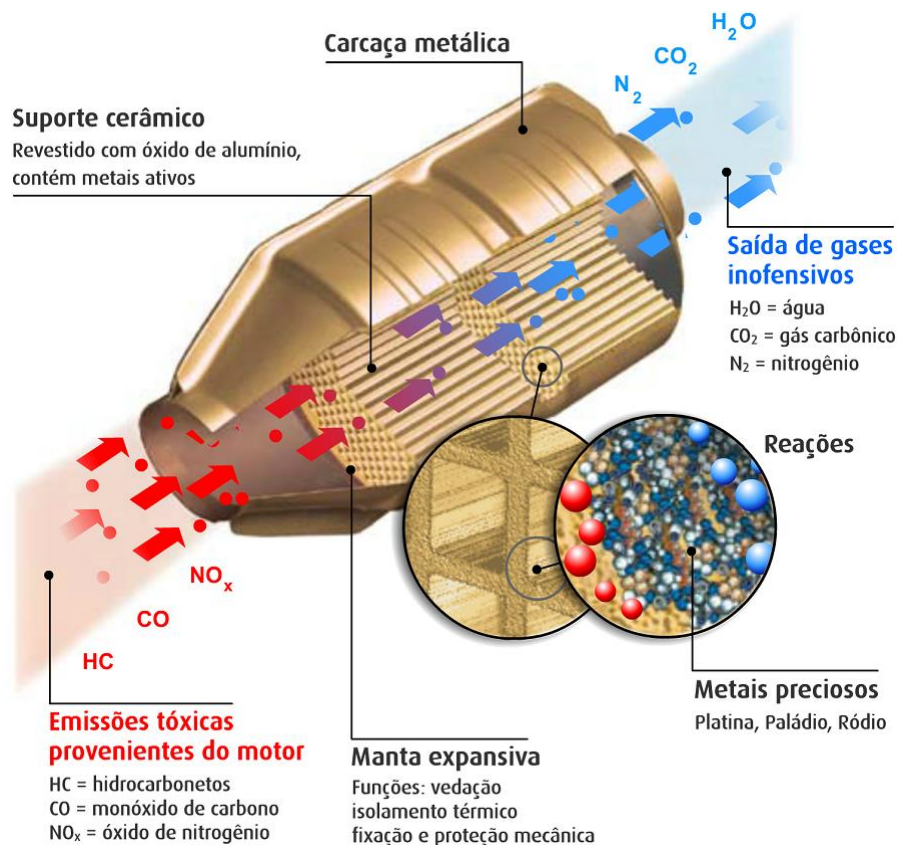
FONTE: Adaptado de (GUZZELLA e ONDER, 2010).



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.

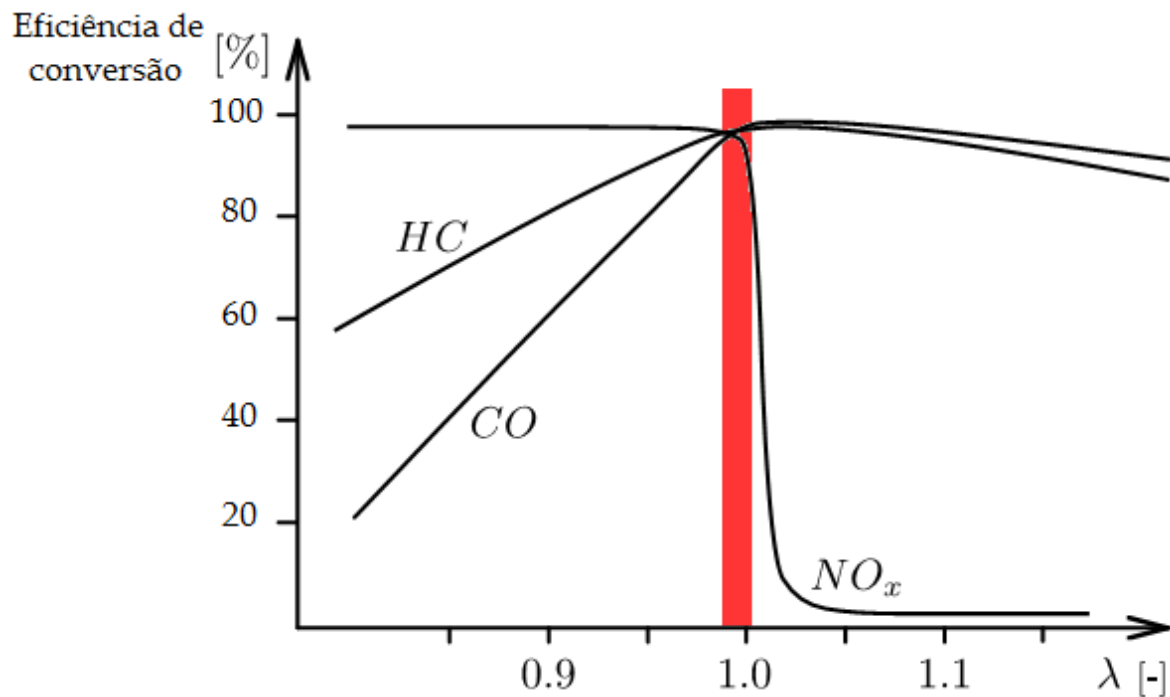


FONTE: (UMICORE, 2015).



Conversor Catalítico

Figura 5 – Taxa de conversão catalítica.



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



Sonda *Lambda*

- Equação de Nernst:

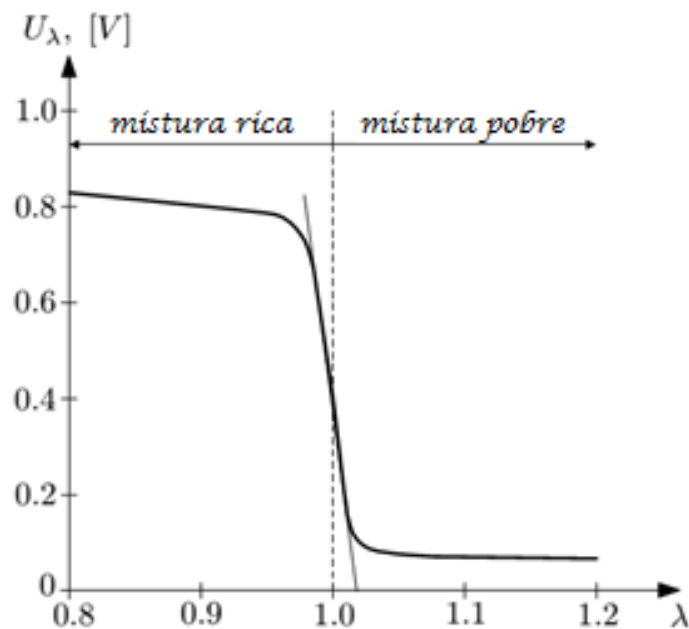
$$U_{\lambda} = t_{\text{ion}} \frac{RT}{4F} \ln \frac{p(\text{O}_2 \text{ ambiente})}{p(\text{O}_2 \text{ exaustão})}$$

Figura 6 – Sonda *Lambda*.



FONTE: (ETAS, 2011).

Figura 7 – Resposta do sensor *Lambda*.



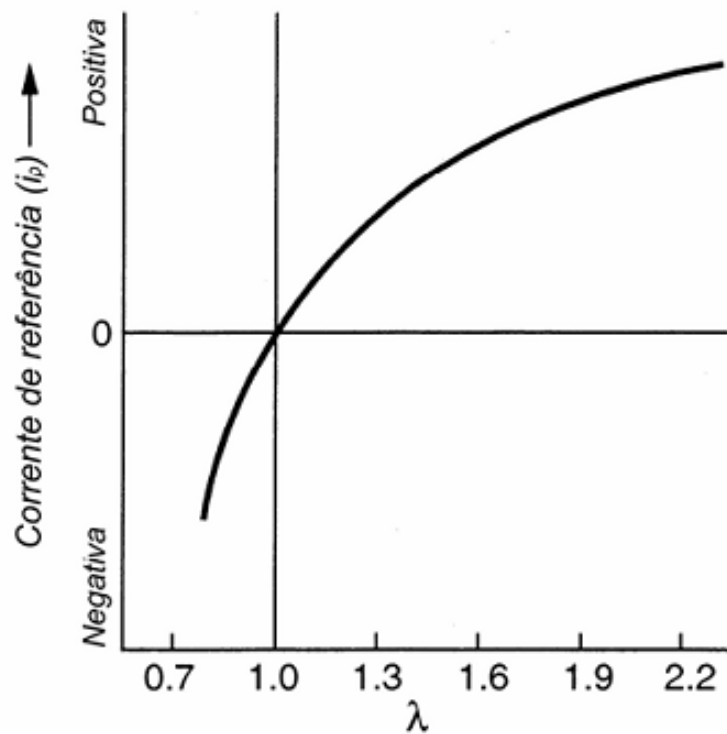
FONTE: (KIENCKE e NIELSEN, 2005).



Sonda *Lambda*

- Duas células de medição.
- Corrente de bombeamento i_p .

Figura 8 – Curva de resposta característica do sensor de banda larga.



FONTE: (PUJATTI, 2007).



Controle da mistura a/c

- Controle em malha aberta

Figura 9 – Diagrama de blocos do sistema em malha aberta.



- Estratégia *Speed Density*:

$$PV = m_a RT$$

$$m_a = V \eta_v \rho = \frac{V \eta_v \rho}{RT}$$

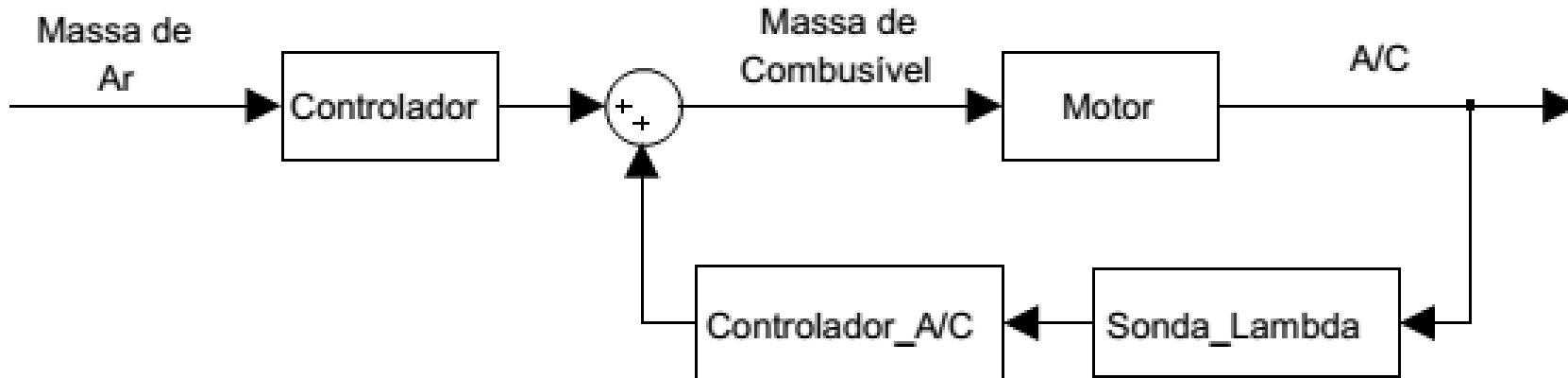
$$m_c = \frac{m_a}{\text{relação a/c}}$$



Controle da mistura a/c

- Controle em malha fechada

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



- Modelo para o sistema da mistura a/c

$$\frac{K_{l,e}}{1 + T_{l,e}s} e^{-sT_{d,e}}$$

$$T_{l,e} = \frac{2(Cil - 1)}{n * Cil}$$

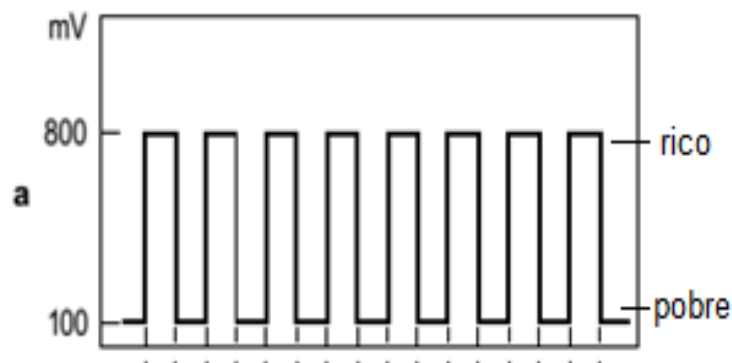
$$T_{d,e} = T_{\text{exaustão}} + T_{\text{queima}}$$



Controle da mistura a/c

- Controle PI
- Realimentação pela sonda *lambda* de banda estreita

Figura 11 – (a) Resposta do sistema em malha fechada (tensão do sensor *lambda*). (b) Resposta do controlador em malha fechada.

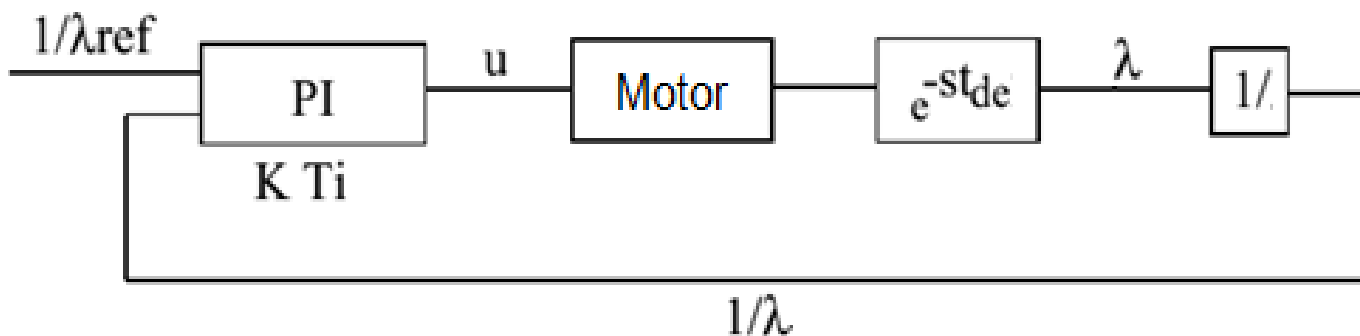




Controle da mistura a/c

- Controle PI
- Realimentação pela sonda *lambda* de banda larga

Figura 12 – Diagrama de blocos do sistema em malha fechada.



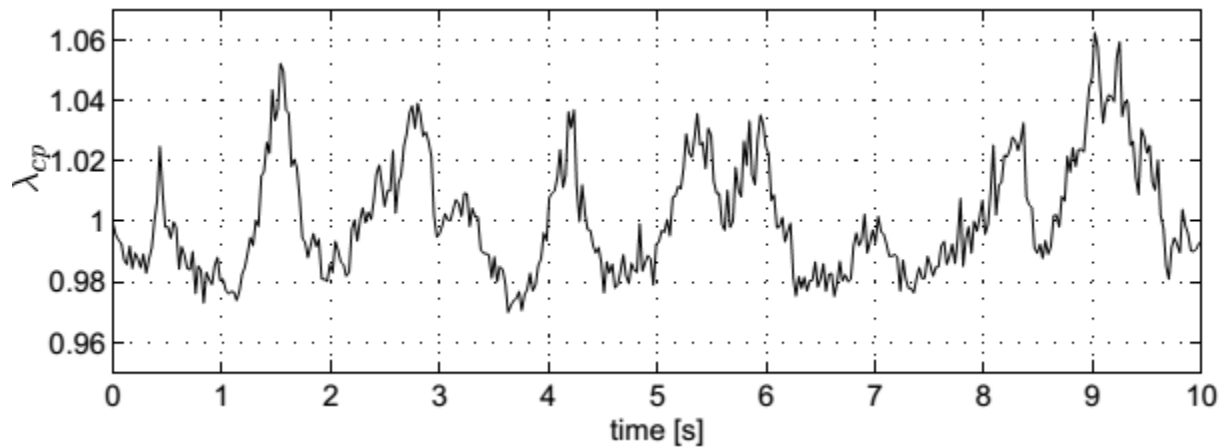
FONTE: (BERGGREN e PERKOVIC, 1996).



Controle da mistura a/c

- Controle PI
- Realimentação pela sonda *lambda* de banda larga

Figura 13 – Resposta do sistema em malha fechada – Referência $\lambda = 1$.



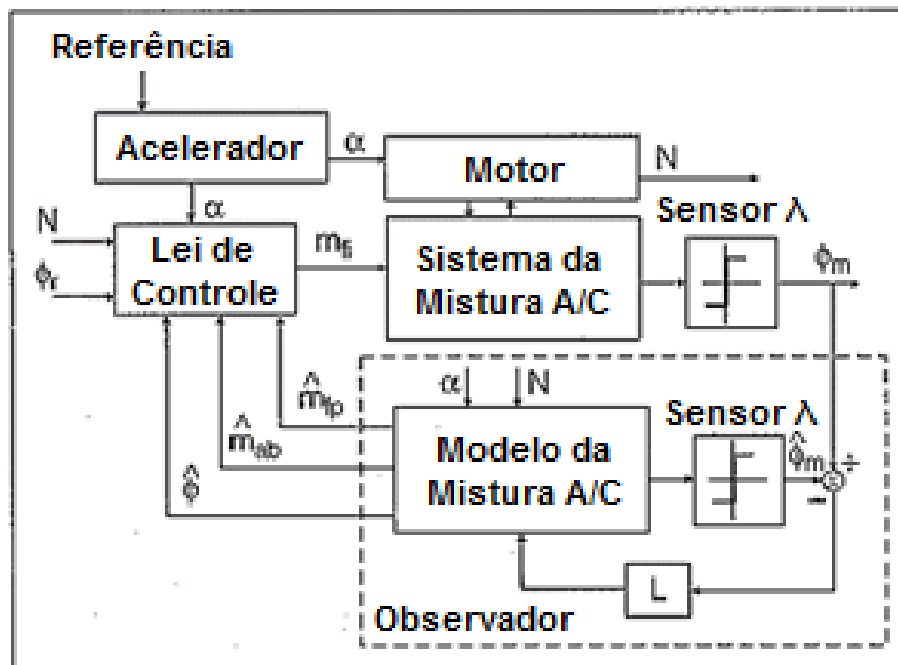
FONTE: (BERGGREN e PERKOVIC, 1996).



Controle da mistura a/c

- Controle por observador de estados
- Realimentação pela sonda λ de banda larga

Figura 14 – Diagrama de blocos do sistema com observador de estados.

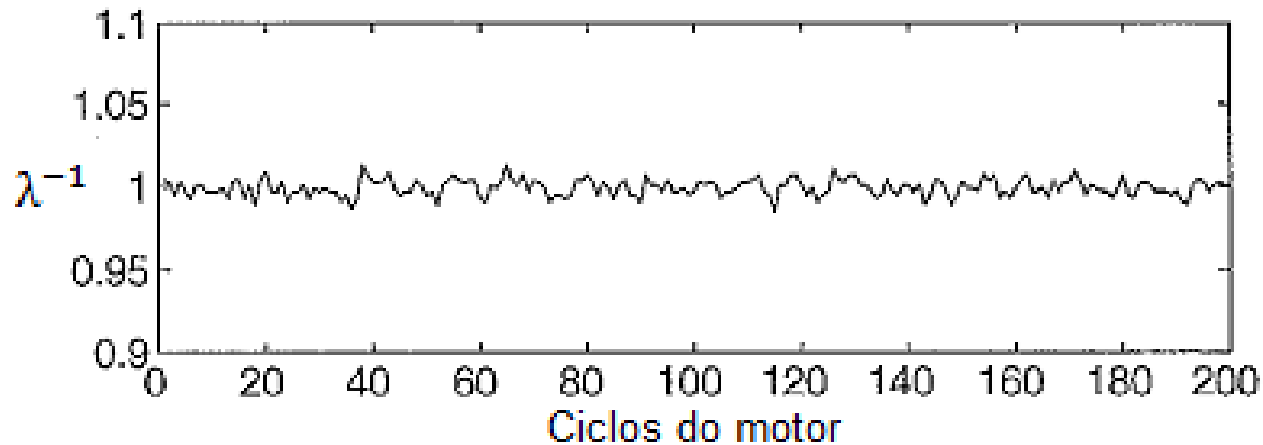


FONTE: Adaptado de (POWELL, FEKETE e CHANG, 1998).



- Controle por observador de estados

Figura 15 – Resposta do sistema em malha fechada – Referência $\lambda = 1$.



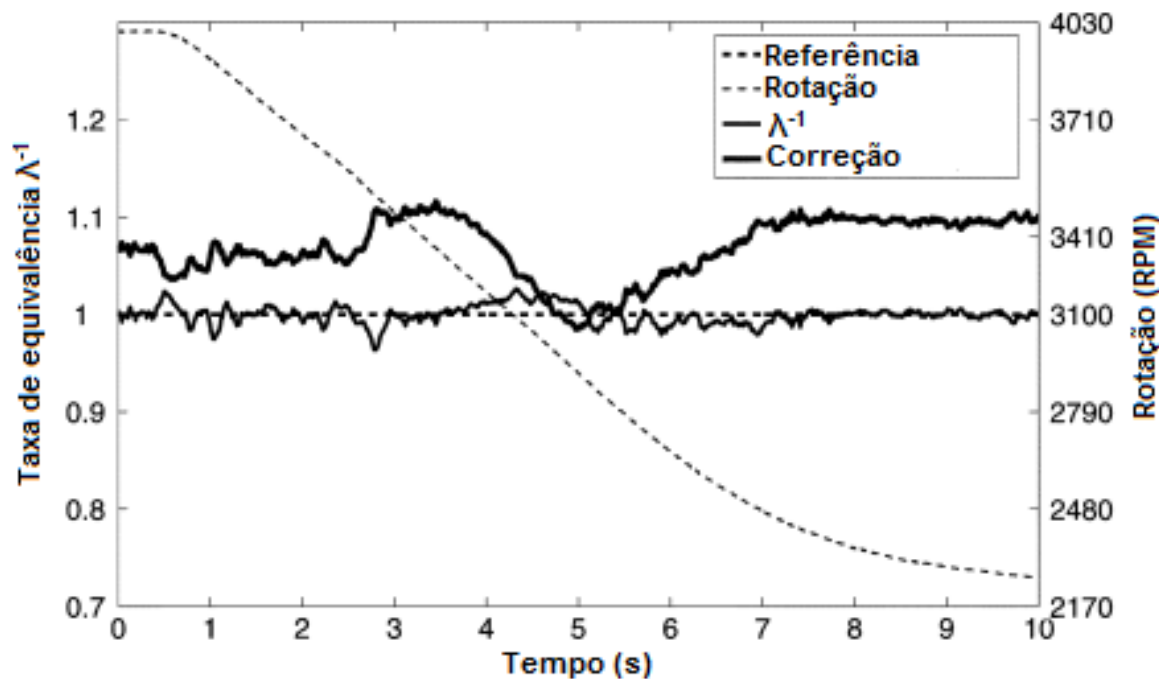
FONTE: (POWELL, FEKETE e CHANG, 1998).



Controle da mistura a/c

- Controle adaptativo
- Realimentação pela sonda λ de banda larga

Figura 16 – Resposta do sistema em malha fechada – Referência $\lambda = 1$.

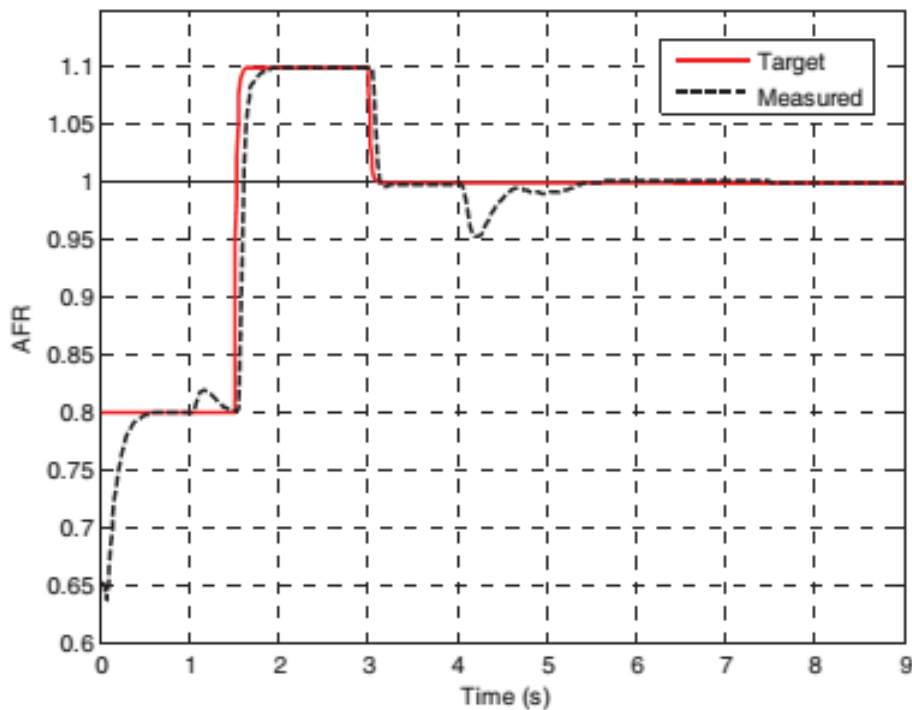


FONTE: (MUSKE, JONES e FRANCESCHI, 2008).



- Controle robusto
- Lógica *Fuzzy*

Figura 17 – Resposta simulada do sistema em malha fechada.

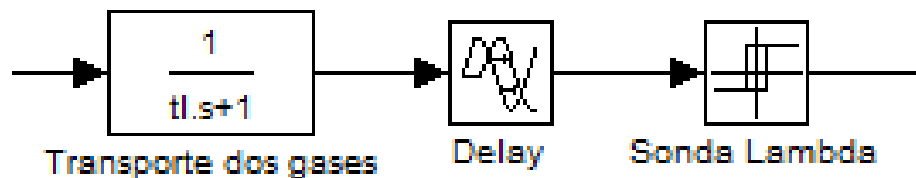


FONTE: (LAUBER, GUERRA e DAMBRINE, 2011).



- Definição do modelo:

Figura 18 – Modelo da mistura ar/combustível.



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

$$delay = 2 t_l$$

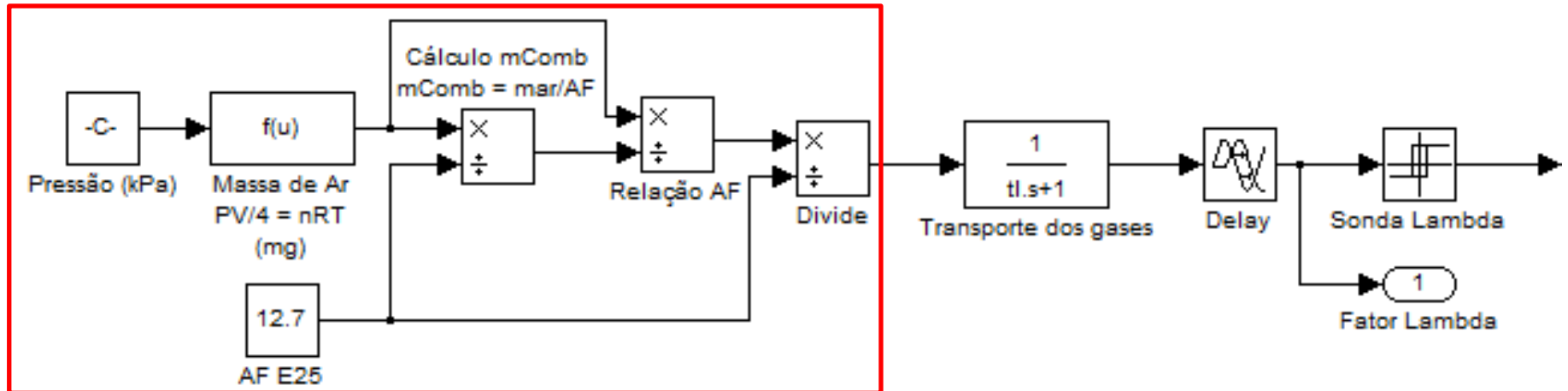
$$U_\lambda(v) = \begin{cases} 0, & \lambda > 1 \\ 1, & \lambda < 1 \end{cases}$$



METODOLOGIA

- Definição do modelo:

Figura 19 – Diagrama de blocos do sistema em malha aberta.

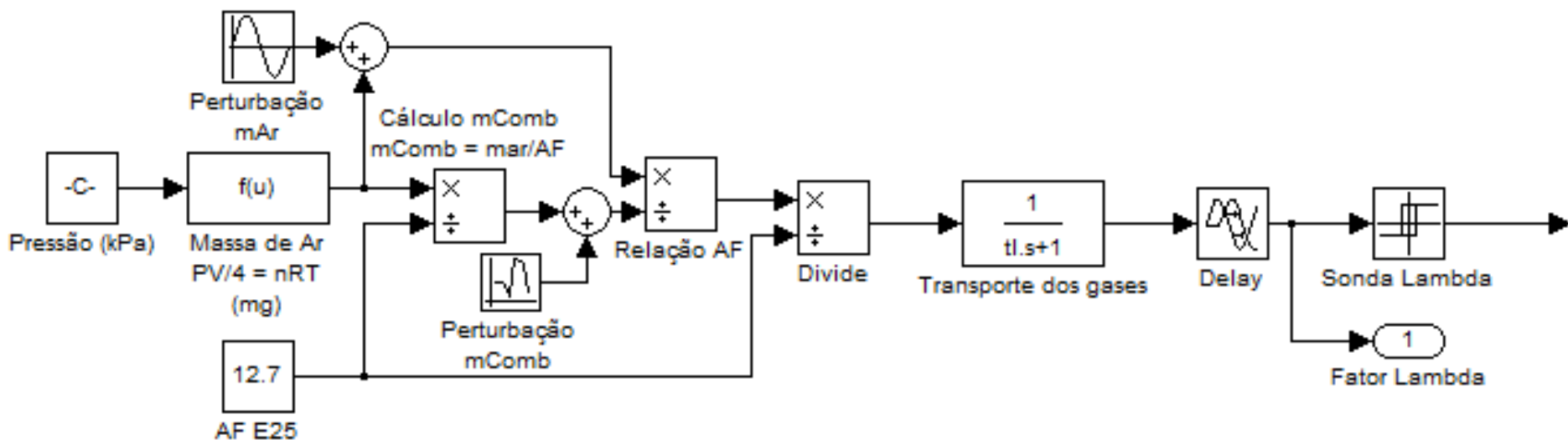


- E25 = 75% gasolina + 25% etanol.
- Relação ar/combustível = 12,7.



- Simulações em malha aberta:

Figura 20 – Diagrama de blocos do sistema em malha aberta com perturbações.

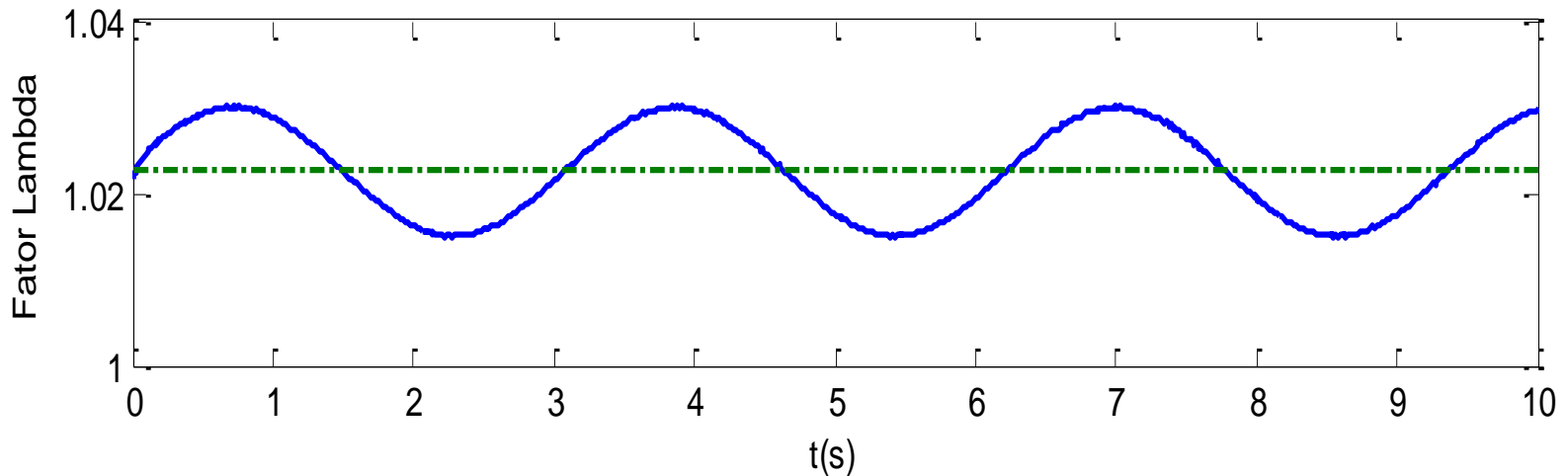


- Perturbações na massa de ar e na massa de combustível;



- **Simulações em malha aberta:**
- mAr: senoidal, freq. = 2rad, amplitude = 1mg, ref. = 3mg

Figura 21 – Resposta do sistema em malha aberta com perturbação na massa de ar.

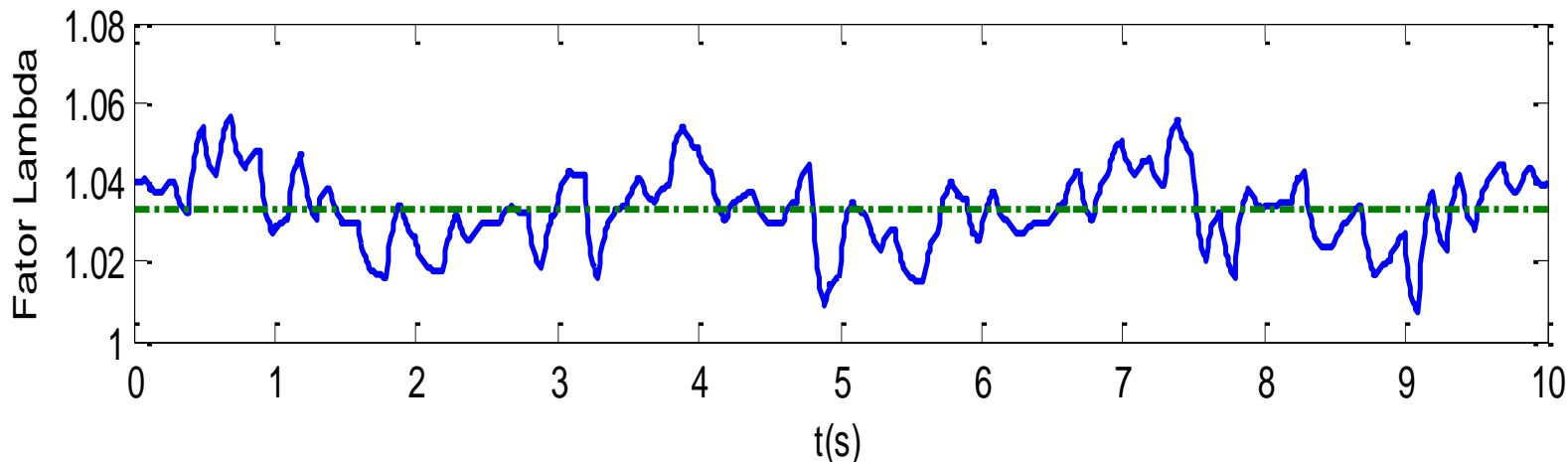


- *Lambda* médio = 1,023.



- **Simulações em malha aberta:**
- mComb: ruído branco, variância = 0,01mg, média = 1mg.

Figura 22 – Resposta do sistema em malha aberta com perturbação na massa de ar e de combustível.



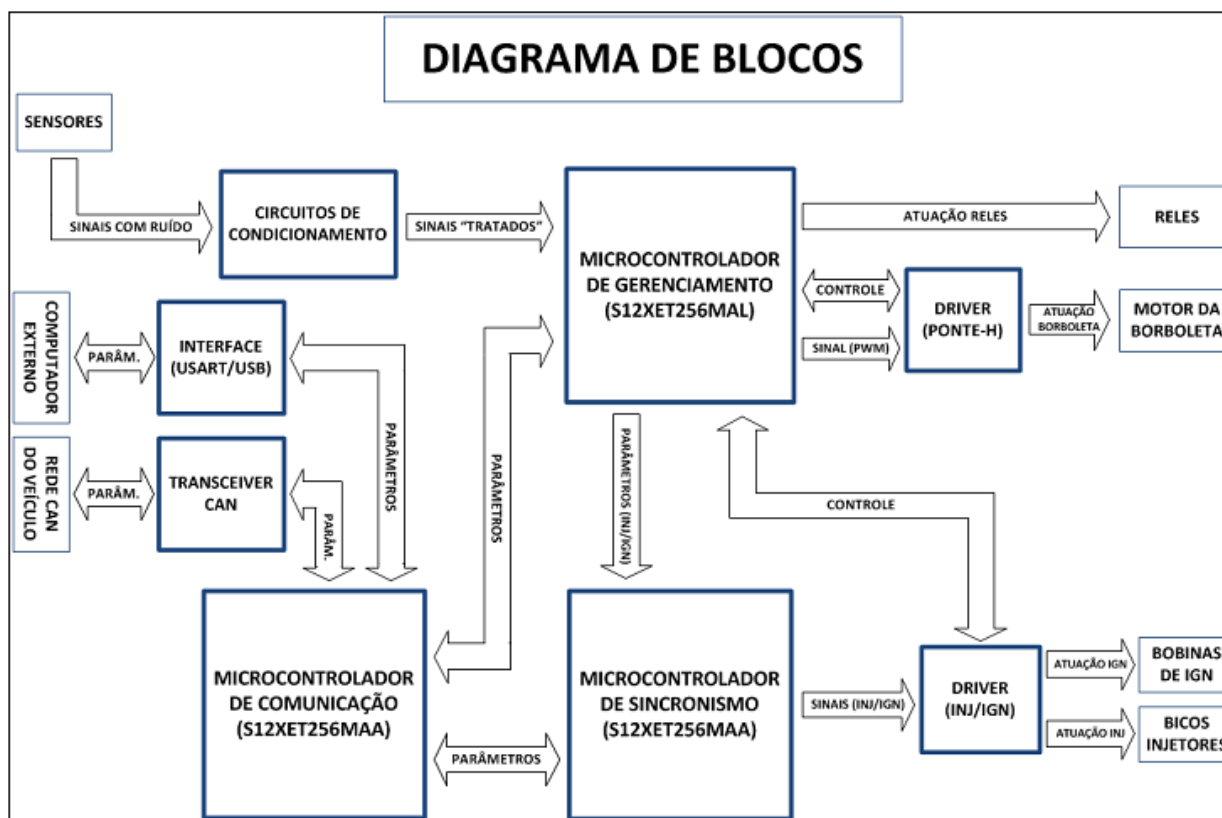
- *Lambda* médio = 1,033.



METODOLOGIA

- Unidade de gerenciamento eletrônico:

Figura 23 – Diagrama de blocos do *hardware* utilizado.



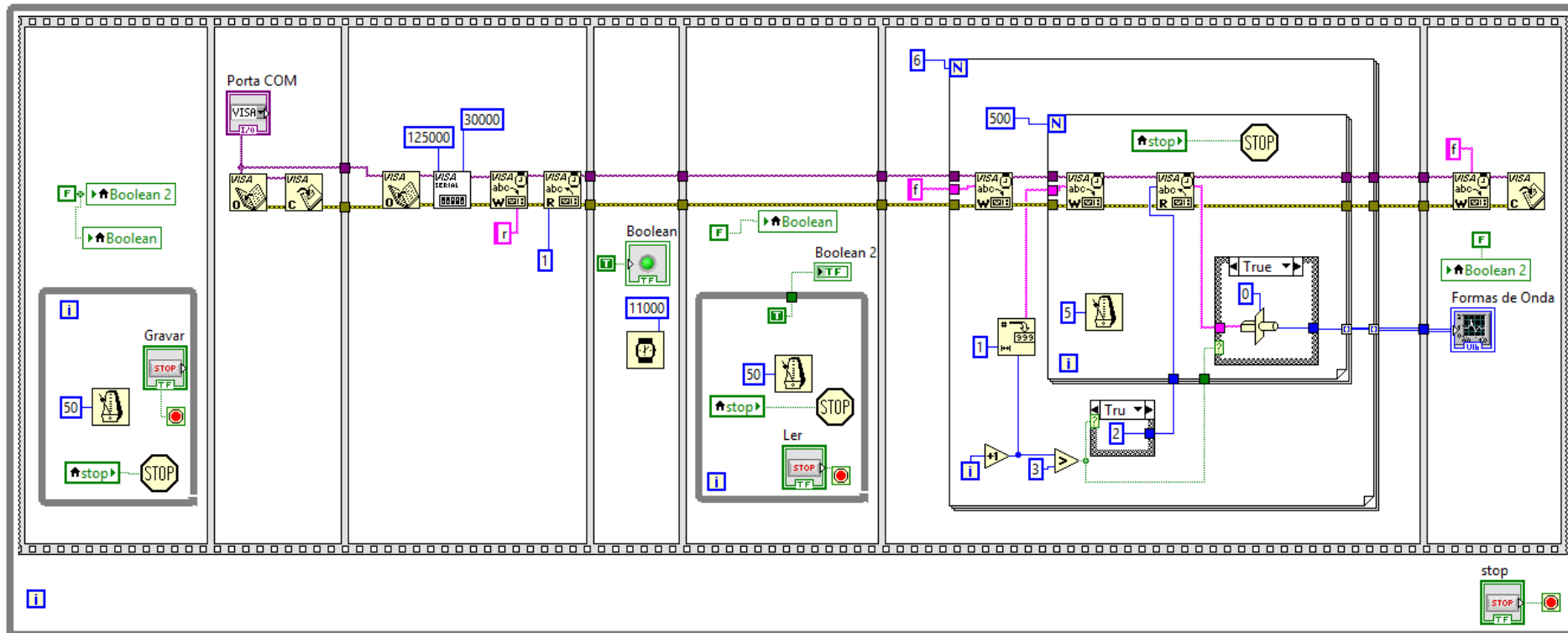
FONTE: (PEREIRA, 2013).



METODOLOGIA

- Aquisição dos dados:

Figura 24 – Software de aquisição de dados em LabView.

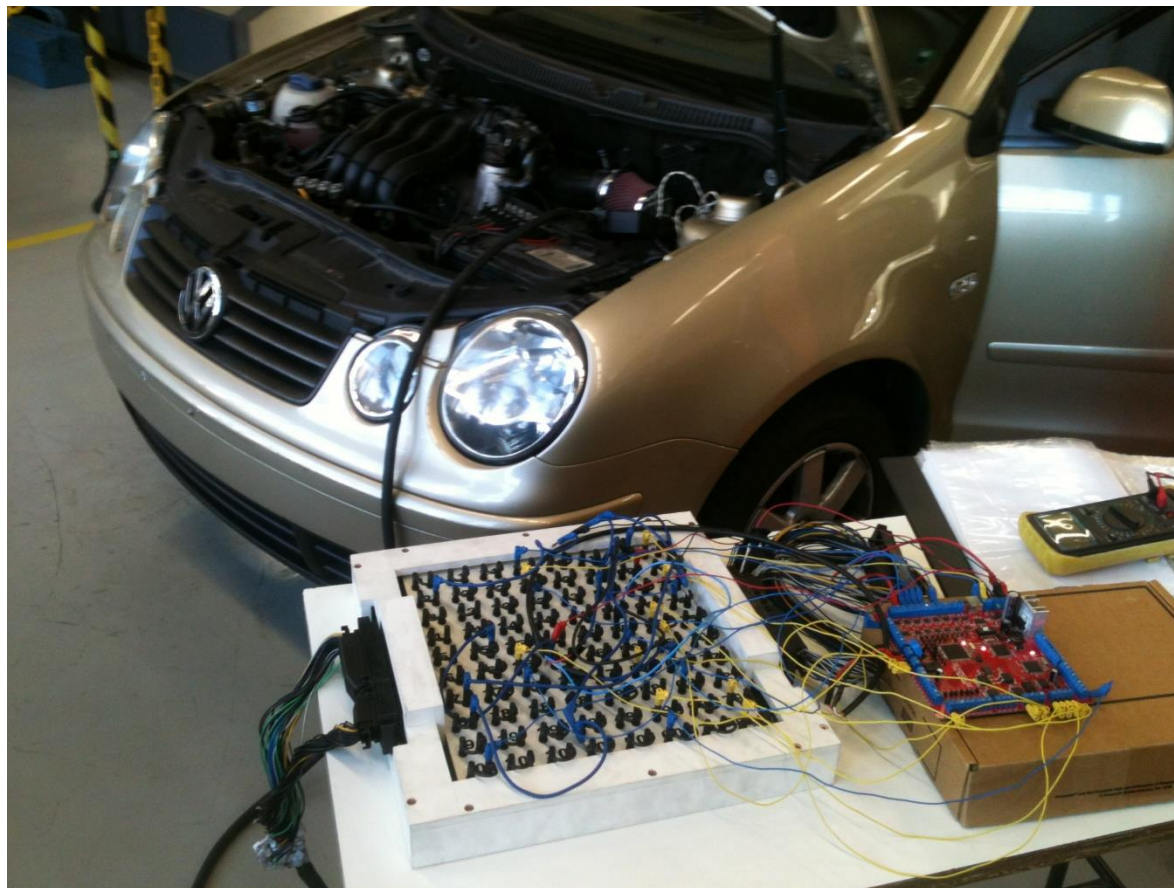




METODOLOGIA

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

Figura 25 – Motor utilizado nos testes.





PROJETO E RESULTADOS OBTIDOS

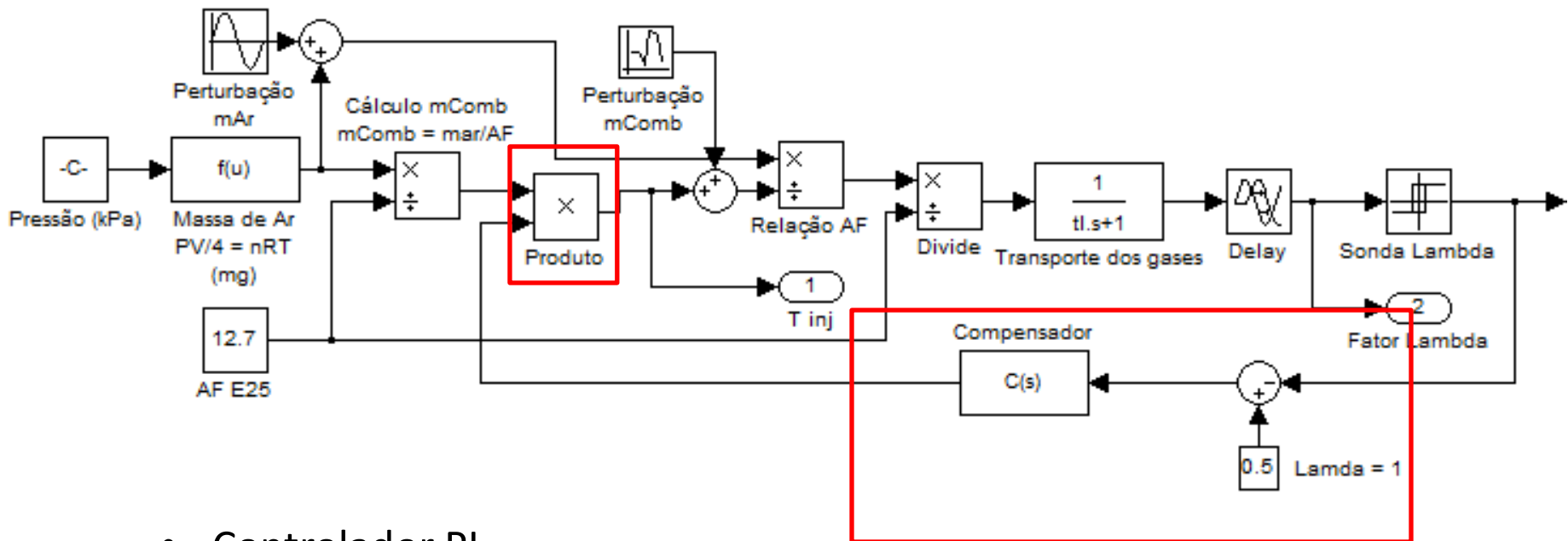
- Utilizando como realimentação a sonda lambda de banda estreita



PROJETO

- Definição do compensador.

Figura 26 – Diagrama de blocos do sistema em malha fechada.



- Controlador PI.

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



PROJETO

- Controlador PI no tempo discreto

$$C(z) = 1 + \left(P + IT_s \frac{1}{z-1} \right) e(z)$$

- Ganho integral

$$I = T_1 = \frac{2(C_{il} - 1)}{n * C_{il}} = \frac{2(4 - 1)}{n * 4} = \frac{3}{2n}$$

- Intervalo de integração

$$T_s = T_{ciclo} = \frac{120}{n}$$

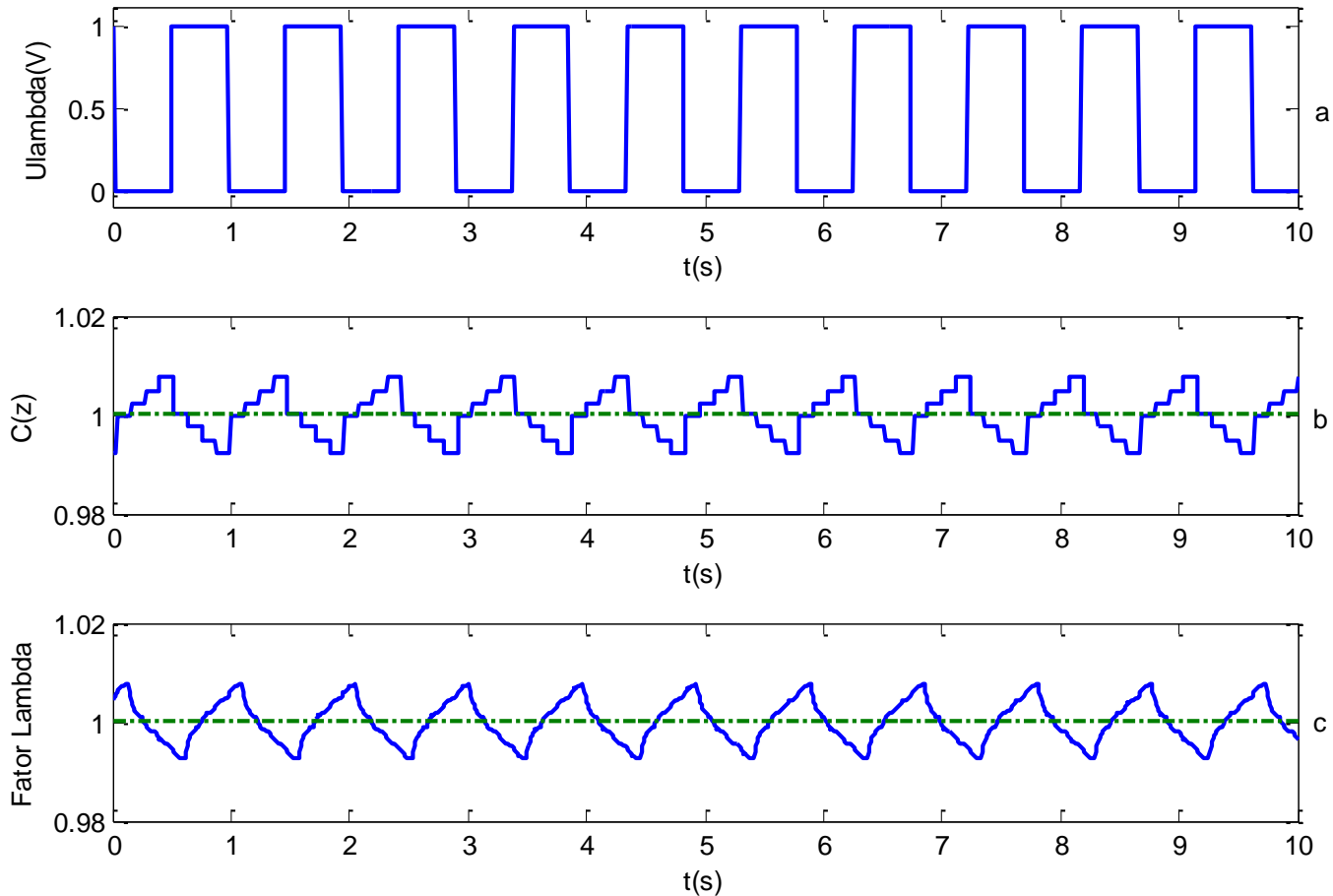
- Ganho proporcional

$$P = 0,01$$



- Simulações em malha fechada:

Figura 27 – Resposta do sistema em malha fechada.

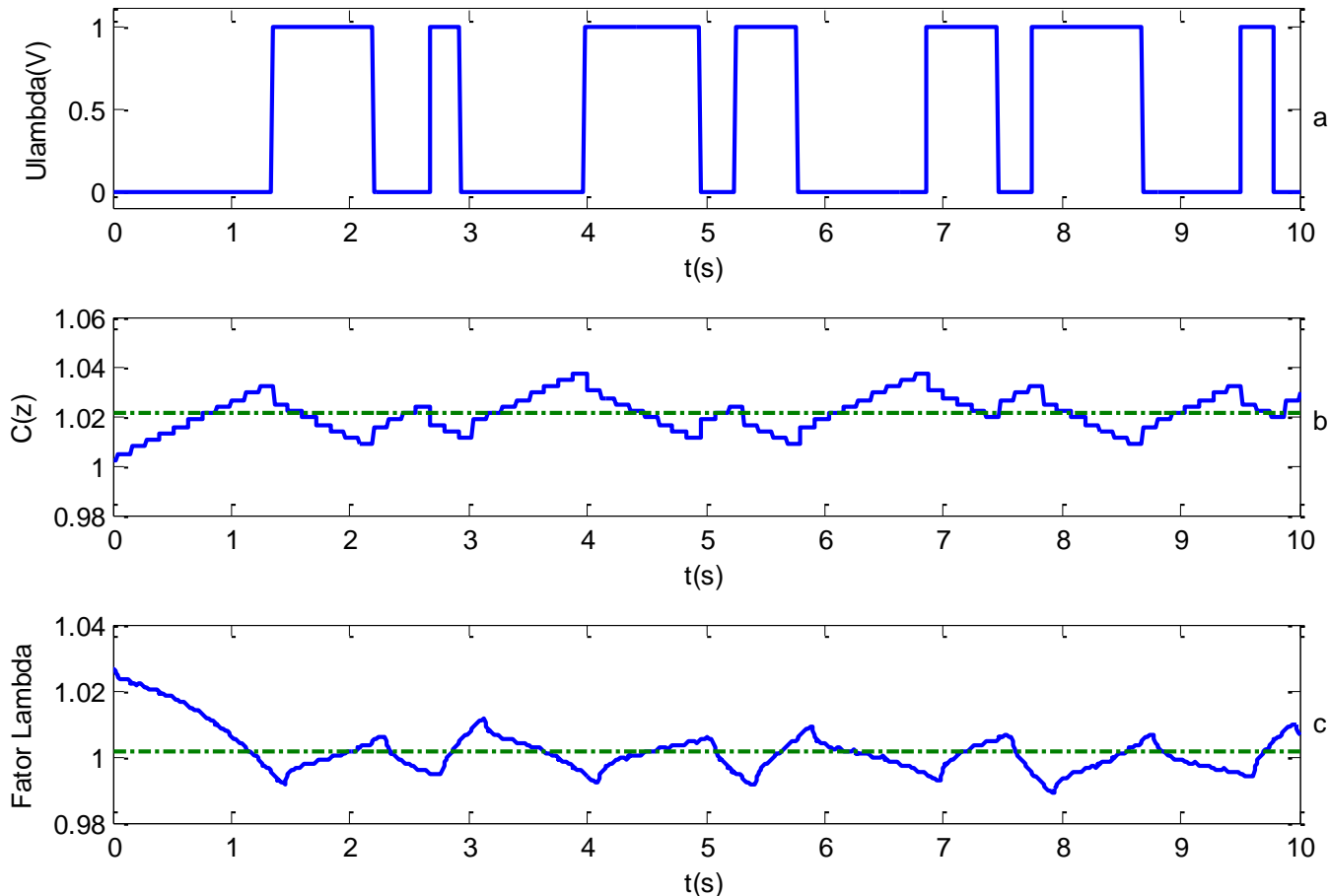


- λ médio = 1,000.



- **Simulações em malha fechada:**

Figura 28 – Resposta do sistema em malha fechada com perturbação na massa de ar.

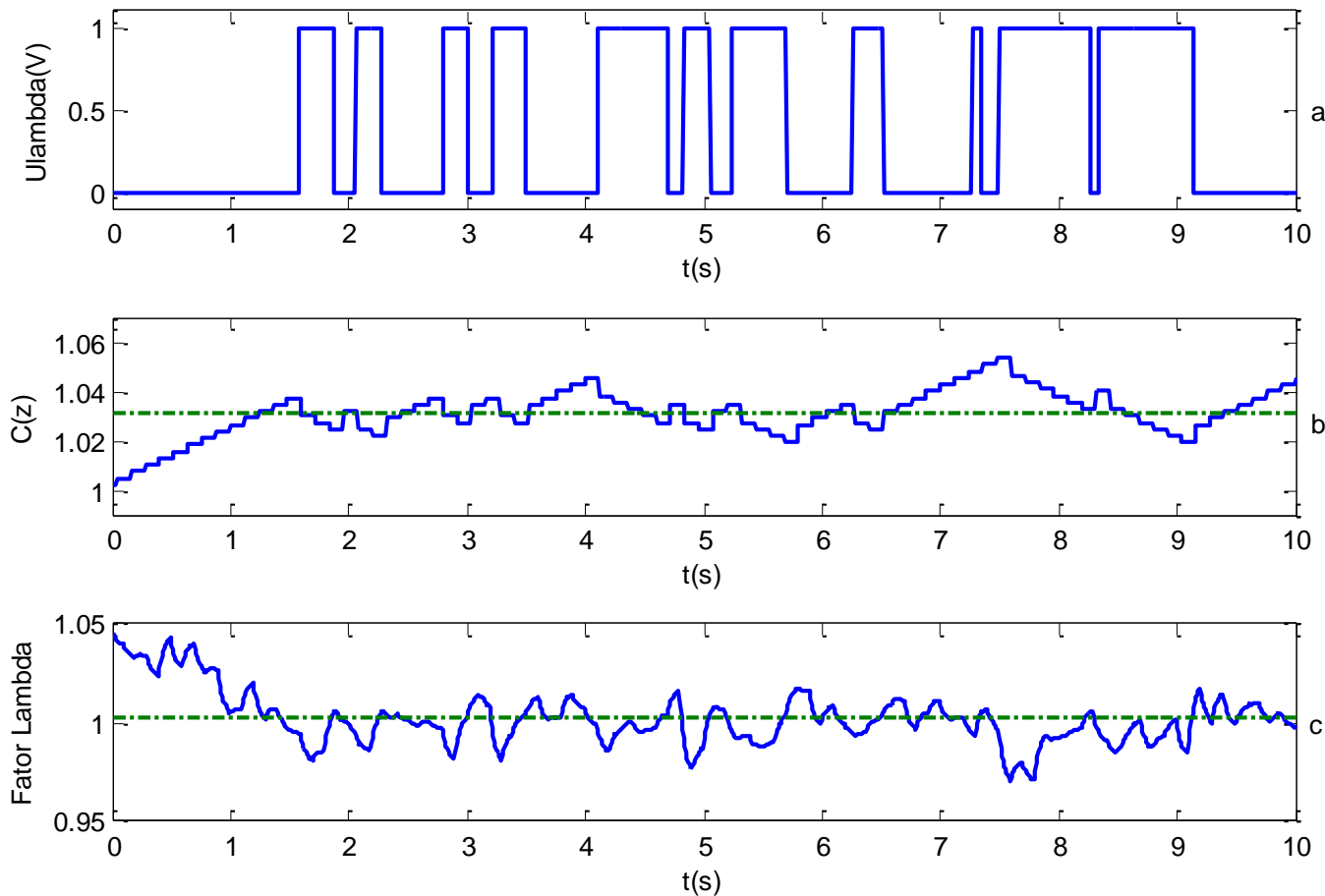


- *Lambda* médio = 1,002.



- **Simulações em malha fechada:**

Figura 29 – Resposta do sistema em malha fechada com perturbação na massa de ar e na massa de combustível.



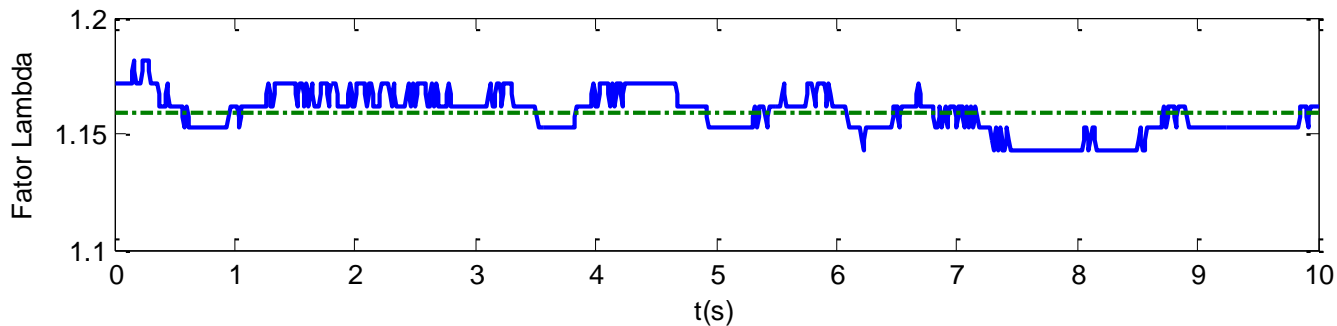
- λ médio = 1,002.



RESULTADOS OBTIDOS

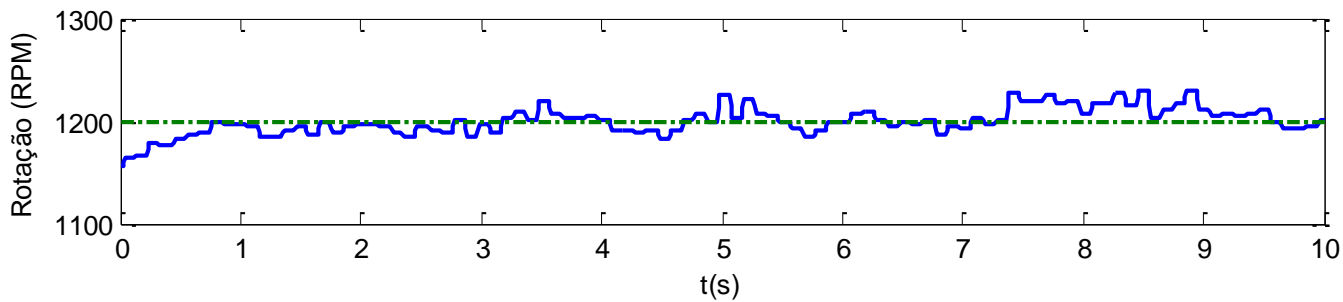
- **Análise da resposta do sistema real em malha aberta:**

Figura 30 – Resposta do sistema real em malha aberta.



- *Lambda* médio = 1,159.

Figura 32 – Variação da rotação no sistema real em malha aberta.



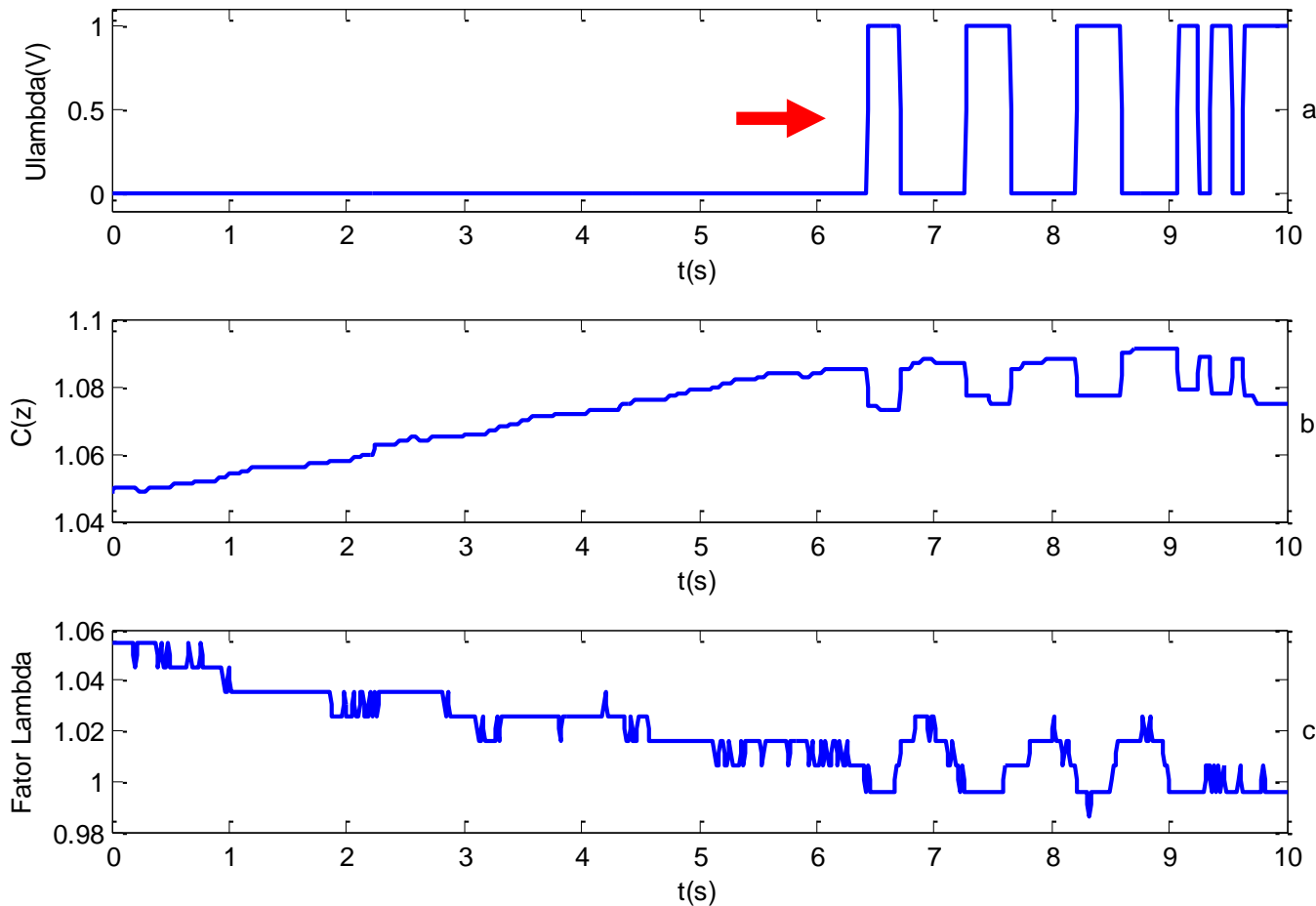
- Rotação média = 1200 rpm
- Variação ± 35 rpm.



RESULTADOS OBTIDOS

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

Figura 31 – Resposta dinâmica do sistema real em malha fechada.

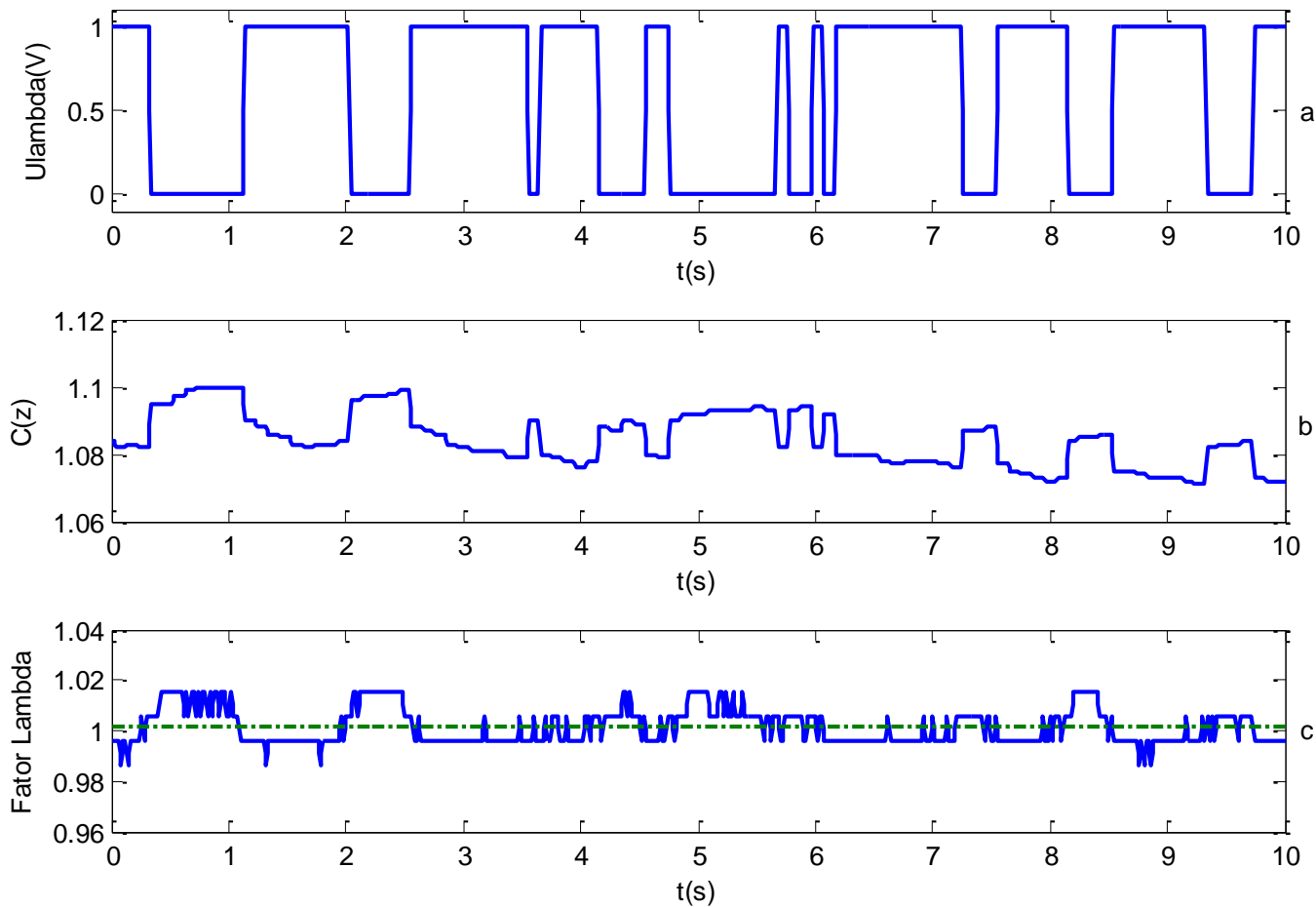




RESULTADOS OBTIDOS

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

Figura 32 – Resposta do sistema real em malha fechada.

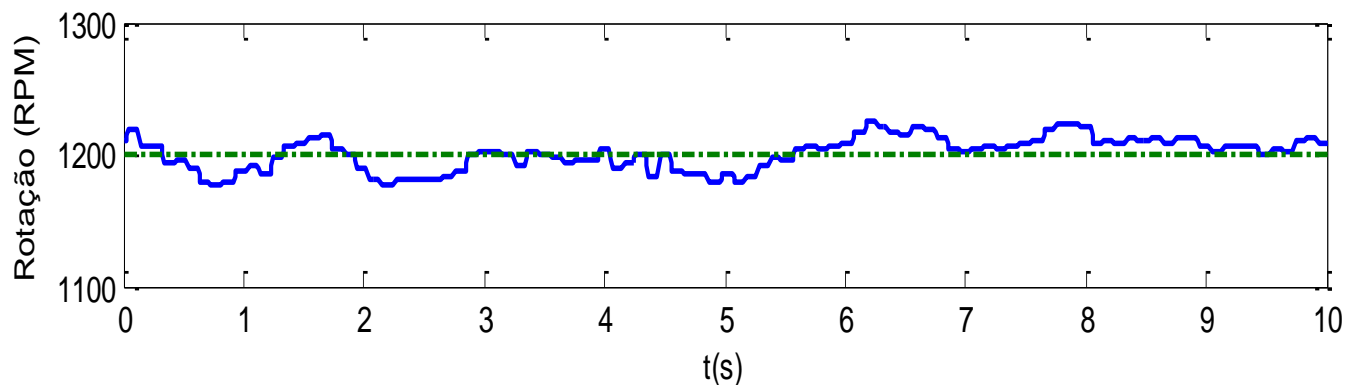


- Λ médio = 1,002.



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

Figura 33 – Variação da rotação no sistema real em malha fechada.



- Rotação média = 1200 rpm
- Variação ± 25 rpm

- Resposta dentro do esperado
- *Lambda* dentro do limite definido de 0,5%



PROJETO E RESULTADOS OBTIDOS

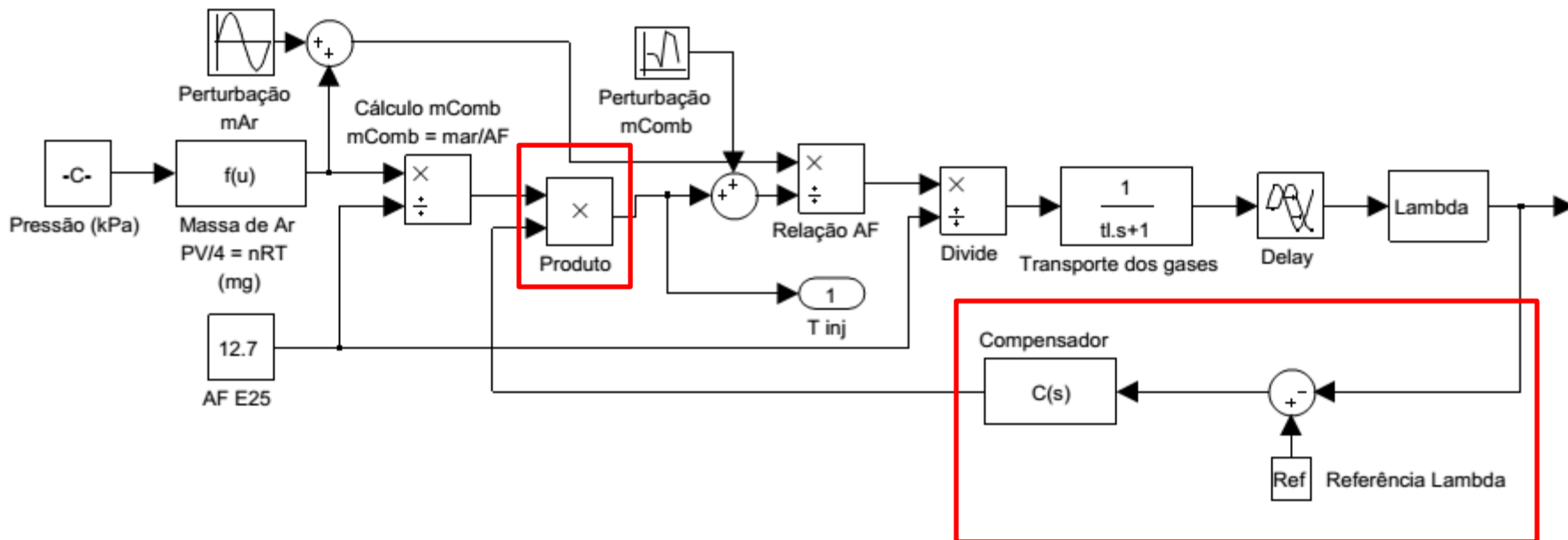
- Utilizando como realimentação a sonda lambda de banda larga



PROJETO

- Definição do compensador.

Figura 34 – Diagrama de blocos do sistema em malha fechada.



- Controlador PI.

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



PROJETO

- Controlador PI no tempo discreto

$$C(z) = 1 + \left(P + IT_s \frac{1}{z-1} \right) e(z)$$

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

- Ganho proporcional

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

- Ganho integral

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

- Intervalo de integração

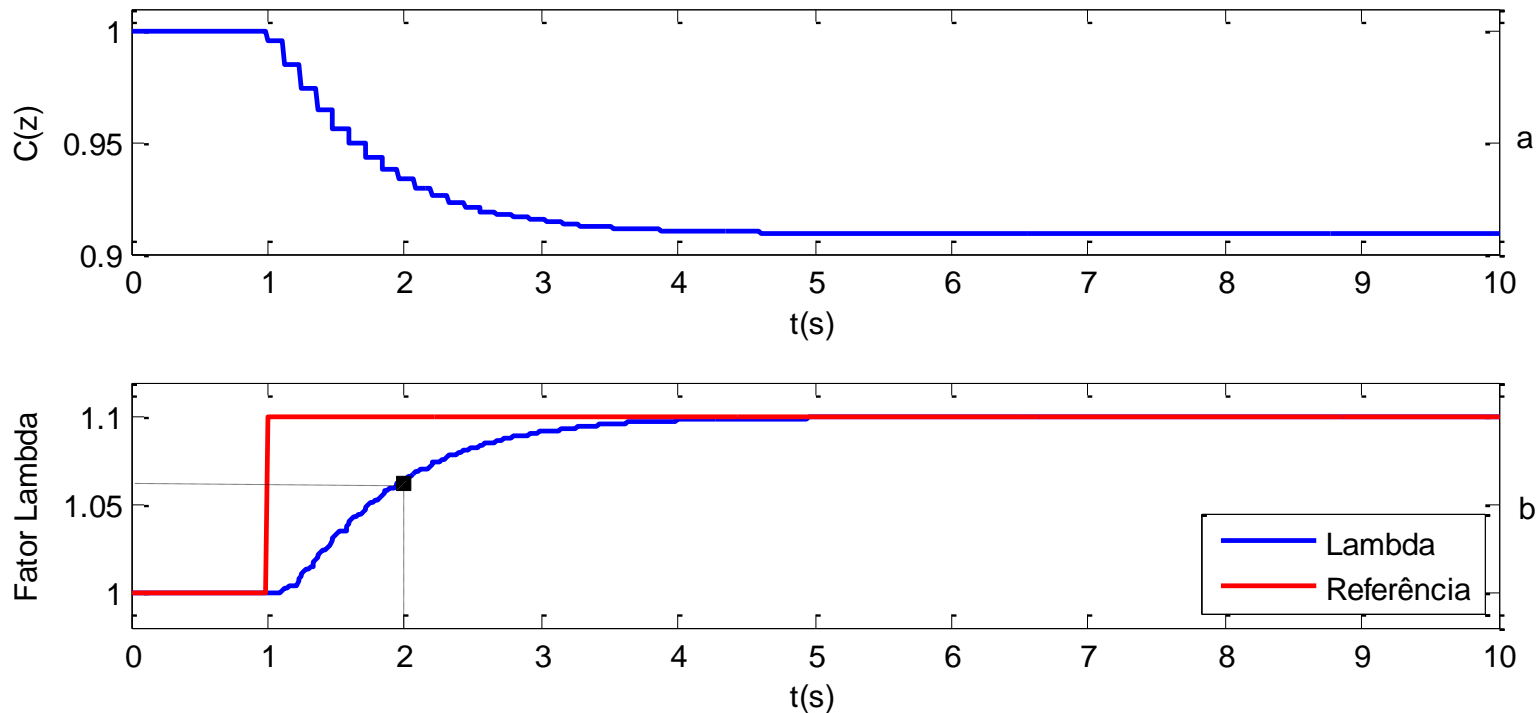
$$T_s = T_{ciclo} = \frac{120}{n}$$



RESULTADOS OBTIDOS

- Simulações em malha fechada:
- Tempos de resposta t_c de 1s, 2s e 4s

Figura 35 – Resposta ao degrau do sistema em malha fechada.

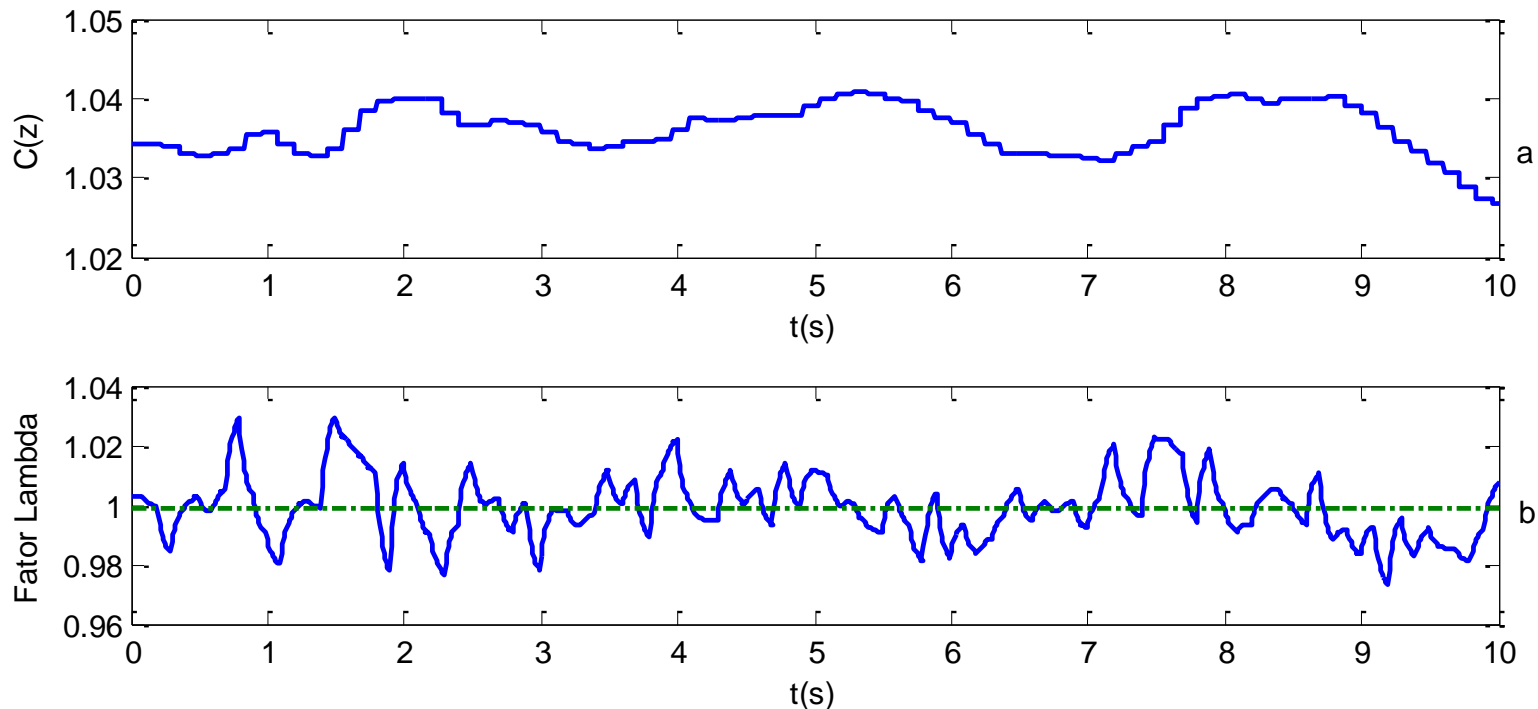


- $t_c = 1s$



- Simulações em malha fechada:

Figura 36 – Resposta do sistema em malha fechada com perturbação na massa de ar e na massa de combustível.



- $t_c = 1s$
- $Lambda$ médio = 0,9992.



- **Simulações em malha fechada:**

Tabela 1 – Comparativo da resposta simulada do sistema em relação ao tempo de resposta.

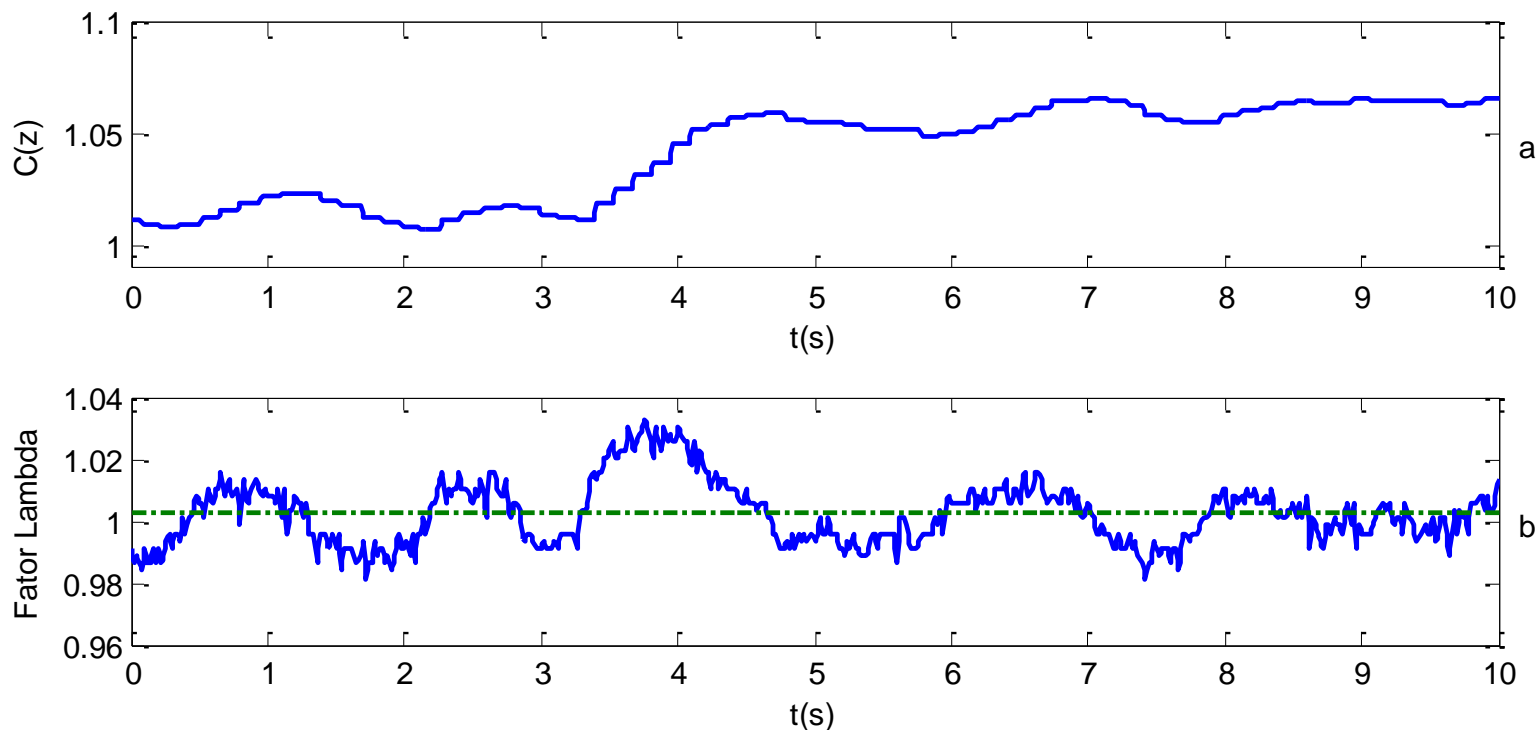
t_c (s)	Lambda Médio	Erro (%)
1	0,9992	0,08
2	0,999	0,1
4	0,9996	0,04



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 37 – Resposta do sistema real em malha fechada – RPM marcha lenta.



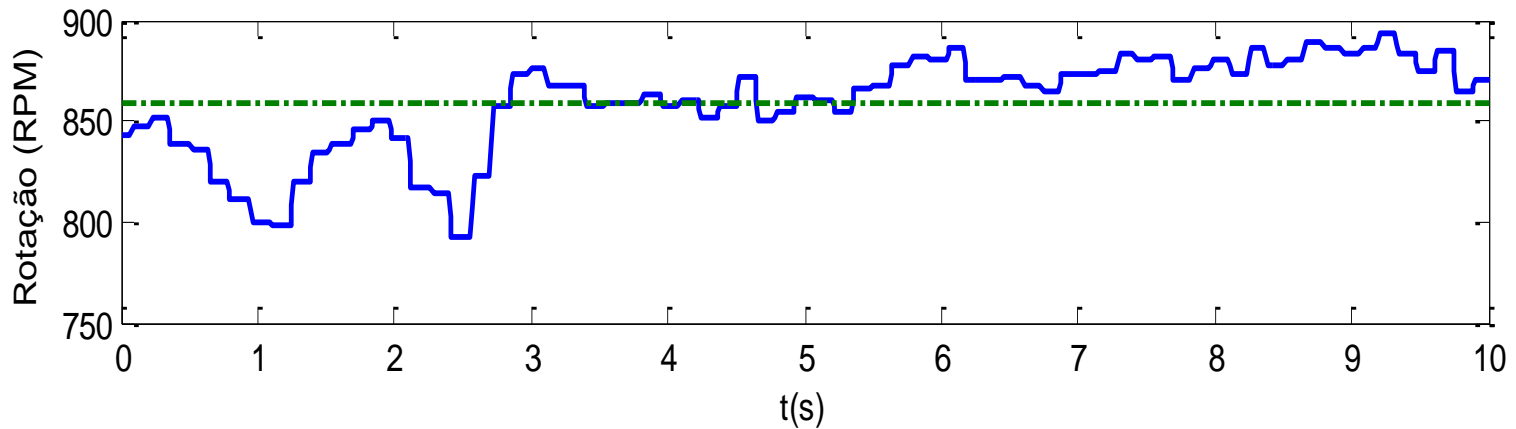
- λ médio = 1,002.



RESULTADOS OBTIDOS

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

Figura 38 – Resposta do sistema real em malha fechada.



- Rotação média = 860rpm
- Variação ± 100 rpm.



RESULTADOS OBTIDOS

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

Tabela 2 – Comparativo da resposta do sistema para diferentes valores de t_c e diferentes rotações.

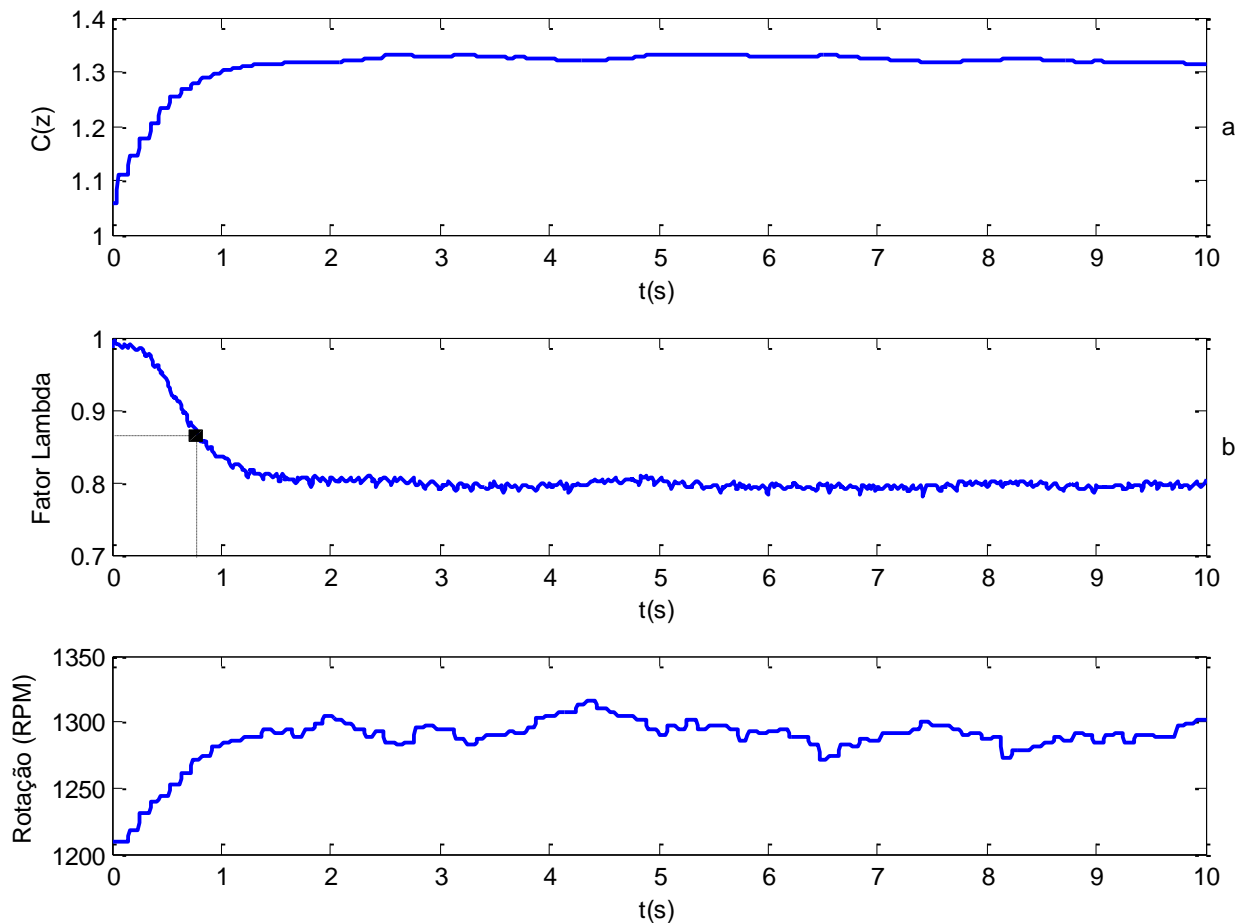
Tempo de resposta t_c (s)	Rotação (RPM)	Lambda médio	Erro lambda (%)	Varição rotação (RPM)
1	900	1,002	0,2	100
	1200	1,0013	0,13	40
	2000	0,9953	0,47	89
	3000	0,9955	0,45	93
2	900	1,0017	0,17	64
	1200	1,0006	0,06	86
	2000	0,9996	0,04	35
	3000	0,9956	0,44	61
4	900	1,0036	0,36	54
	1200	0,9983	0,17	66
	2000	0,9983	0,17	33
	3000	0,9951	0,49	76



RESULTADOS OBTIDOS

- Análise da resposta do sistema real em malha fechada:

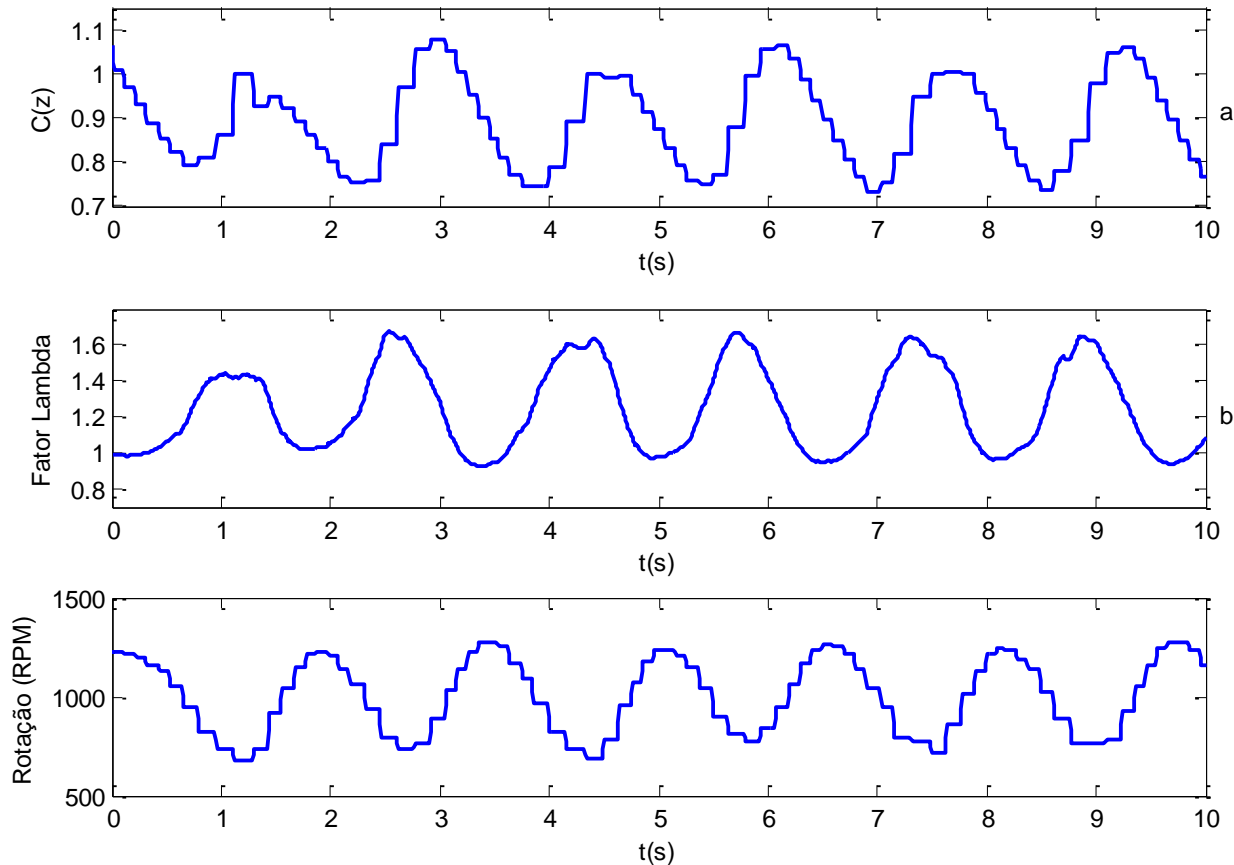
Figura 39 – Resposta ao degrau do sistema em malha fechada – $t_c = 1s$, referência 0,8 λ , referência de 1200 RPM.





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

Figura 40 – Resposta ao degrau do sistema em malha fechada – $t_c = 1s$, referência 1,2 λ , referência de 1200 RPM.

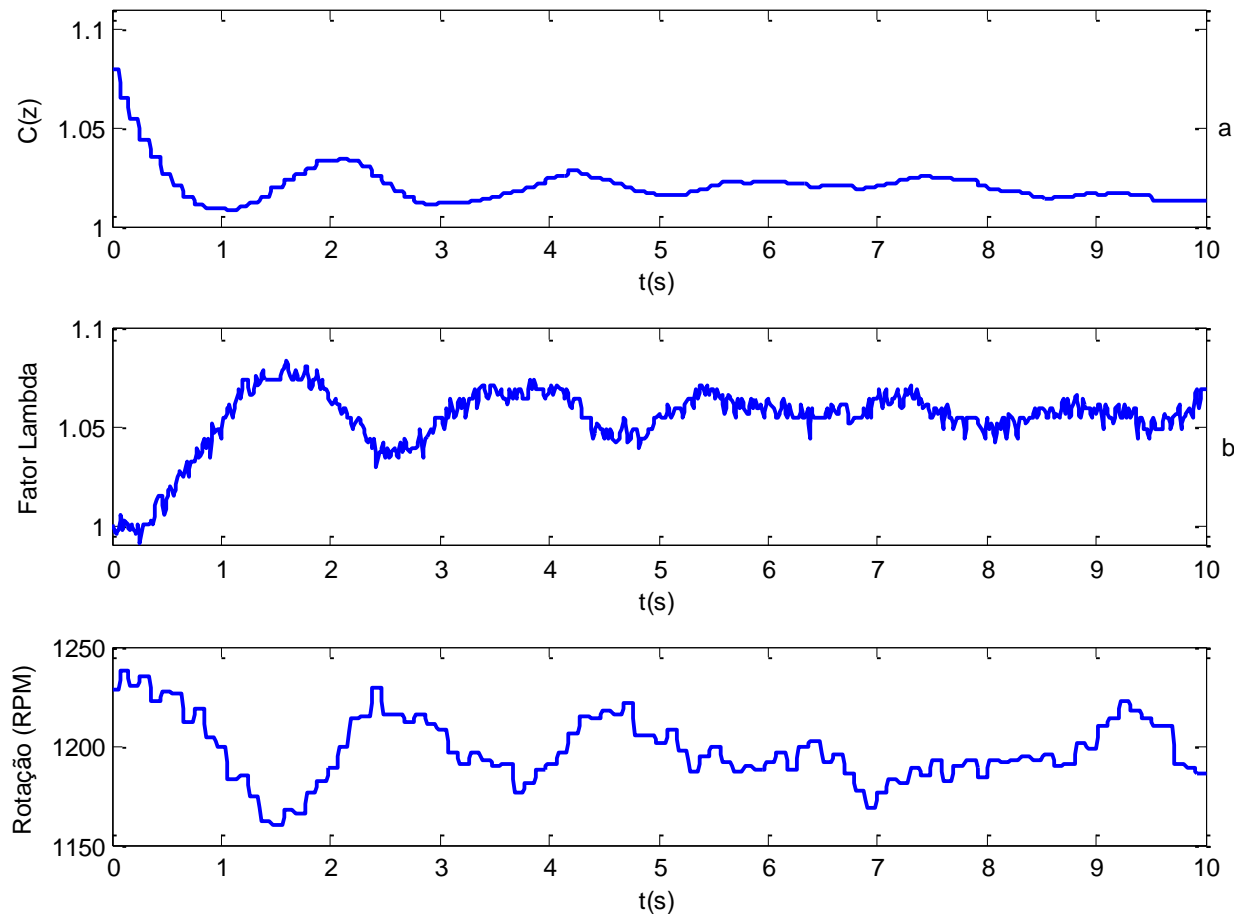




RESULTADOS OBTIDOS

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

Figura 41 – Resposta ao degrau do sistema em malha fechada – $t_c = 1s$, referência 1,05 λ , referência de 1200 RPM.





- $t_c = 2s$ apresentou o melhor compromisso estabilidade e desempenho



CONCLUSÕES

- Estudo do sistema e tipos de controle.
- Simulações do sistema em Simulink.
- Desenvolvimento do controlador.
- Teste do controlador no motor.
- *Lambda* médio com erro menor do que 0,5%.
- Respostas em degrau satisfatórias.



- Definição dos valores de t_c .
- Introdução de novas técnicas de controle.
- Estudo da resposta em mistura pobre.
- Realizar testes de emissões.
- Introdução de uma sonda *lambda* pós catalisador para avaliar sua eficiência.



- BALENOVIC, M. **Modeling and Model-Based Control of a Three-Way Catalytic Converter**. Tese de Doutorado. Technische Universiteit Eindhoven. Eindhoven, p. 179. 2002.
- BERGGREN, P.; PERKOVIC, A. **Cylinder Individual Lambda Feedback Control in an SI Engine**. Linköping University. Linköping. 1996.
- BOSCH. **ME - Motronic Engine Management**. 1ª. ed. Stuttgart: Robert Bosch GmbH, 1999.
- DENTON, T. **Automobile Electrical and Electronic Systems**. 3ª. ed. Londres: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004.
- ETAS, G. **Lambda Meter LA4 - User's Guide**. Stuttgart. 2011.
- GUZZELLA, L.; ONDER, C. H. **Introduction to Modeling and Control of Internal Combustion Engine Systems**. 2ª. ed. Zurique: Springer-Verlag, 2010.
- KIENCKE, U.; NIELSEN, L. **Automotive Control Systems**. 2ª. ed. Berlim: Springer, 2005.
- LAUBER, J.; GUERRA, T. M.; DAMBRINE, M. Air-fuel ratio control in a gasoline engine. **International Journal of Systems Science**. Vol 42. nº 2, Valenciennes, Fevereiro 2011. 277-286.
- MUSKE, K. R.; JONES, J. C. P.; FRANCESCHI, E. M. Adaptive Analytical Model-Based Control for SI Engine Air-Fuel Ratio. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**. Vol 16. nº 4, Villanova, Julho 2008. 763-768.
- PEREIRA, B. C. F. **Unidade de Gerenciamento Eletrônico de um Motor Volkswagen 2.0L: Projeto Otto II**. Escola Politécnica da USP. São Paulo. 2013.
- POWELL, J. D.; FEKETE, N. P.; CHANG, C.-F. Observer Based Air-Fuel Ratio Control. **IEEE Control Systems**, Stanford, Outubro 1998. 72-83.
- PUJATTI, F. J. P. Desenvolvimento de um Sistema de Gerenciamento Eletrônico para Motores de Ignição por Centelha. **Tese de Doutorado**. Universidade Federal de Minas Gerais., Belo Horizonte, 31 Agosto 2007. 221.
- UMICORE, A. C. Umicore, 2015. Disponível em: <http://www.unicore.com.br/nossosNegocios/catalysis/catalisador_automotivo/>. Acesso em: 10 Março 2015.



PEREIRA, B. S.; *et al.*. Conjuntos didáticos para o estudo de eletrônica automotiva. **Congresso Internacional PAEE**, Abril 2012.

PEREIRA, B. S.; *et al.*. Sistema de Diagnose Veicular On-Board em uma Plataforma de Gerenciamento Eletrônico. **Congresso SAE**, Setembro 2013.

PEREIRA, B. C. F.; *et al.*. Unidade de gerenciamento eletrônico de um motor Volkswagen 2.0L . **Congresso SAE**, Outubro 2014.

LIMA, L. L.; *et al.*. Identificação da combustão e da detonação em um motor a combustão interna utilizando a corrente iônica. **Congresso SAE**, Outubro 2014.



OBRIGADO