

**Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**

**Departamento de Engenharia Mecânica**

ISSN 1517-3534

**BT/PME/0624**

---

**Projeto de Controladores Múltiplos  
Modelos para Manutenção da Relação  
Ar/Combustível em Motores de  
Combustão Interna Movidos a Gás Natural**

---

**Fernando Sousa e Freitas Junior  
Agenor de Toledo Fleury**



Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP

Departamento de Engenharia Mecânica

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Departamento de Engenharia Mecânica

Diretor: Prof. Dr. Ivan Gilberto Sandoval Falleiros

Vice-Diretor: Prof. Dr. José Roberto Cardoso

Chefe do Departamento: Prof. Dr. Ronaldo de Breyne Salvagni

Suplente do Chefe do Departamento: Prof. Dr. Amilton Sinatora

Conselho Editorial:

Prof. Dr. Décio Crisol Donha

Prof. Dr. José Roberto Simões Moreira

Prof. Dr. Celso Pupo Pesce

Prof. Dr. Linilson Rodrigues Padovese

Prof. Dr. Guenther Carlos Krieger Filho

Coordenador Técnico:

Prof. Dr. Décio Crisol Donha

Suplente: Prof. Dr. José Roberto Simões Moreira

Esta é uma publicação da Escola Politécnica da USP/ Departamento de Engenharia Mecânica, fruto de pesquisas realizadas por docentes e pesquisadores desta Universidade

**Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**  
**Departamento de Engenharia Mecânica**

ISSN 1517-3534  
**BT/PME/0624**

---

**Projeto de Controladores Múltiplos  
Modelos para Manutenção da Relação  
Ar/Combustível em Motores de  
Combustão Interna Movidos a Gás Natural**

---

**Fernando Sousa e Freitas Junior**  
**Agenor de Toledo Fleury**

28 AGO 2006



Escola Politécnica - EPBC



31200054151

**São Paulo - 2006**

O presente trabalho é resumo da tese de doutorado apresentada por Fernando Sousa e Freitas Junior, sob orientação do Prof. Dr. Agenor de Toledo Fleury: "Técnicas e Controle de Emissões Baseadas em Múltiplos Modelos para Motores de Combustão Interna Movidos a Gás Natural", defendida em 31/10/2003, na EPUSP.

A íntegra da tese encontra-se à disposição com o autor e na Biblioteca de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica/USP.

#### FICHA CATALOGRÁFICA

1538332

Freitas Junior, Fernando Sousa e

Projeto de controladores múltiplos modelos para manutenção da relação/ar combustível em motores de combustão interna movidos a gás natural / Fernando Sousa e Freitas Junior, Agenor de Toledo Fleury. -- São Paulo : EPUSP, 2006.

19 p. -- (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia Mecânica ; BT/PME/0624)

1. Poluição ambiental (Controle) 2. Motores de combustão interna 3. Combustíveis gasosos I. Fleury, Agenor de Toledo I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica III. Título IV. Série

ISSN 1517-3534



# Projeto De Controladores Múltiplos Modelos Para Manutenção Da Relação Ar/Combustível Em Motores De Combustão Interna Movidos A Gás Natural

Fernando Sousa e Freitas Jr.  
e-mail: ffreitas@usp.br

Agenor de Toledo Fleury  
e-mail: agfleury@ipt.br

## Resumo

O objetivo deste trabalho é o estudo de técnicas avançadas de controle de emissões de gases poluentes emitidos por motores de combustão interna movidos a gás natural. No artigo são aplicadas três técnicas para efetuar o controle da injeção de combustível e do avanço de ignição: técnica do Controlador Preditivo Generalizado (GPC), técnica do Controlador Linear Quadrático (LQR) e técnica de Controle  $H_\infty$  via Inequações Matriciais Lineares (LMI). A cada uma dessas técnicas foram desenvolvidas uma estrutura de múltiplos modelos visando abordar a vasta região de operação de um motor. O desempenho de cada controlador é medido pela eficiência em manter a razão combustível/ar em torno de 1% de desvio máximo em relação ao valor estequiométrico. Os resultados obtidos mostram ser possível controlar os níveis de emissões desse tipo de motor adequando-o às normas internacionais, melhorando, assim, a qualidade de vida das pessoas.

## Abstract

The objective of this work is the study of advanced control techniques for the reduction of pollutant gases generated by internal combustion engines powered by natural gas. In this paper three techniques are applied to control the fuel injection and the ignition timing: the Generalized Predictive Control (GPC), the Linear Quadratic Regulator (LQR) and  $H_\infty$  Control by Linear Matrix Inequalities (LMI). To each one of those techniques were developed a multiple model structure seeking to include the vast operation region of the engine. The controller's performance is measured by the efficiency in maintaining the fuel/air ratio around 1% of maximum deviation in relation to the stoichiometric value. The results show the possibility of controlling pollutant emission generated by this kind of engine to conform to international emission standards, improving life quality.

**Palavras-Chave:** Controlador GPC, Controlador LQR, Controlador LMI, Múltiplos Modelos, Motor de Combustão Interna, Gás Natural.

# 1 Introdução

Nos últimos anos, uma das principais metas da Engenharia Automotiva está concentrada na redução de emissões de gases poluentes gerados por Motores de Combustão Interna (MCI). No Brasil e nos países do primeiro mundo, tal meta foi impulsionada pelo considerável aumento do número de veículos nos grandes centros urbanos e principalmente pela aprovação de leis que restringem a emissão de poluentes gerados por um MCI.

Uma vez que os MCI's são máquinas de funcionamento muito complexo, as pesquisas sobre reduções de emissões estendem-se sobre as mais diferentes áreas, entre as quais o uso de combustíveis alternativos e o gerenciamento eletrônico têm ganhado destaque. Na última década, muitos trabalhos foram publicados ressaltando a importância do uso de combustíveis menos poluentes, por exemplo, o gás natural (TILAGONE *et al.*, 2000; WEEKS e MOSKWA, 1995). Já o gerenciamento eletrônico tornou-se possível devido ao desenvolvimento das mais diferentes áreas de pesquisa, tais como de sensores, de válvulas de injeção, de propagação de chamas, do estudo de catalisadores, etc.. O uso intensivo de eletrônica resulta em ter um melhor aproveitamento do combustível e menor emissão de poluentes, além de estender a vida útil do motor.

As restrições nos níveis de emissões têm se tornado progressivamente mais exigentes ao longo dos anos. Um dos principais objetivos do projeto de controle do motor é o desenvolvimento de controladores visando gerenciar o funcionamento dos sistemas do motor para reduzir os níveis de emissões e, ao mesmo tempo, manter um desempenho adequado.

Os aspectos importantes do motor para o projeto de um controlador são dirigibilidade, economia de combustível e redução de emissões. Dirigibilidade está associada à suavidade de operação e a disponibilização de potência. Economia de combustível está intimamente relacionada a emissões de poluentes: quanto maior o consumo, maiores as emissões. Dentre os poluentes emitidos pelos MCI, há três gases de grande impacto sobre a qualidade do ar ambiente: Monóxido de Carbono (CO), Óxido de Nitrogênio ( $NO_x$ ) e Hidrocarbonetos (HC).

A composição da mistura de ar e de combustível é um parâmetro importante no controle dos processos de combustão e emissões de um motor, e tem fortes efeitos sobre todas as variáveis importantes, tais como potência, economia de combustível e emissões. A composição da mistura que satisfaça a todos esses desempenhos não é única. Uma mistura rica é desejável para altas potências de saída, ao passo que uma mistura estequiométrica é desejável para baixos níveis de emissões, enquanto que uma mistura pobre pode fornecer melhor economia de combustível. As decisões devem ser tomadas considerando todos esses desempenhos onde as diferentes composições são selecionadas de acordo com o modo de operação do motor.

Outro parâmetro importante no controle de um MCI é o instante de ignição. O instante de ignição da centelha deve ainda ser ajustado de forma a assegurar



uma boa eficiência térmica do motor, com baixos índices de emissão de poluentes e ausência de detonação. Uma combustão eficiente caracteriza-se pelo prosseguimento da chama durante todo espaço da câmara de forma contínua e sem mudança abrupta de sua velocidade. Caso haja início da queima sem a ocorrência de centelha, ocorre o fenômeno denominado auto-ignição, gerado principalmente por misturas ricas e/ou elevadas pressões no interior do cilindro.

A emissão de poluentes está diretamente relacionada ao combustível utilizado e ao ciclo de operação que o veículo deve atender. Por exemplo, um ônibus tem predominantemente um ciclo dinâmico transitório, ao contrário de veículos de passeio cujos sistemas de injeção de combustível e de ignição funcionam com base em mapas estáticos. Em geral, ônibus são equipados com motores movidos a diesel que são responsáveis por grande quantidade de particulados sólidos, monóxido de carbono, hidrocarbonetos e óxidos de nitrogênio emitidos para a atmosfera.

Em grandes cidades como São Paulo, a poluição do ar causada por ônibus (com uma frota ao redor de 12.000 unidades) e caminhões é considerada um problema grave, a tal ponto que uma recente lei de transporte público impõe que as empresas de ônibus procurem soluções alternativas para minimizar o problema.

Neste artigo, o objetivo do controlador é minimizar os níveis de emissões de gases poluentes emitidos por motores de combustão interna movidos a gás natural. A maneira de se conseguir esse objetivo é através do controle da relação combustível/ar, mantendo-a em torno de 1% de desvio máximo em relação ao valor estequiométrico. Uma vez que, diminuir os níveis de emissões é o objetivo deste trabalho, durante todo este tempo estaremos preocupados em manter a relação combustível/ar ( $\phi$ ) o mais próximo possível do valor estequiométrico ( $\phi_{st}$ ).

Diante da importância de manter a mistura com variações muito pequenas em relação ao valor estequiométrico, fica evidente a necessidade do desenvolvimento de modelos e de técnicas avançadas de controle que minimizem os efeitos dos transitórios sobre as emissões de poluentes, principalmente em veículos pesados. Como será visto adiante, isso acarreta um complexo problema de controle dadas as não linearidades envolvidas e a vasta região de operação de um motor, em termos de velocidades, consumos e cargas.

## 2 Modelo do Motor

Um Motor de Combustão Interna (MCI) envolve vários fenômenos físicos de difícil descrição. Assim, torna-se praticamente impossível, com as ferramentas hoje disponíveis, considerar todos os efeitos na modelagem. Durante o projeto de um controlador, são necessárias simplificações, porém sem abandonar considerações que permitam aproximar a dinâmica de um MCI. Neste sentido, os modelos utilizados para efeito de controle devem ser os modelos minimamente complexos que representem o comportamento global do sistema com boa aproximação.

O modelo a ser utilizado com a intenção de simular o ambiente dinâmico de

um MCI representa um motor de seis cilindros com seis litros de capacidade volumétrica e movido a gás natural. O modelo obtido é não linear e constituído por três subsistemas dinâmicos, que descrevem de um modo simplificado os fenômenos que envolvem o funcionamento de um MCI. Os três subsistemas em que o motor é dividido são: o subsistema do coletor de admissão, o subsistema de combustão e subsistema da dinâmica rotacional.

O modelo do motor foi implementado no ambiente MatLab-Simulink<sup>TM</sup>. Na implementação, foram utilizados subsistemas independentes para cada uma das dinâmicas associadas ao modelo. A forma modular facilita a implementação e a visualização das entradas e saídas de cada um dos três subsistemas que compõem o motor, conforme pode ser visto na Figura 1.

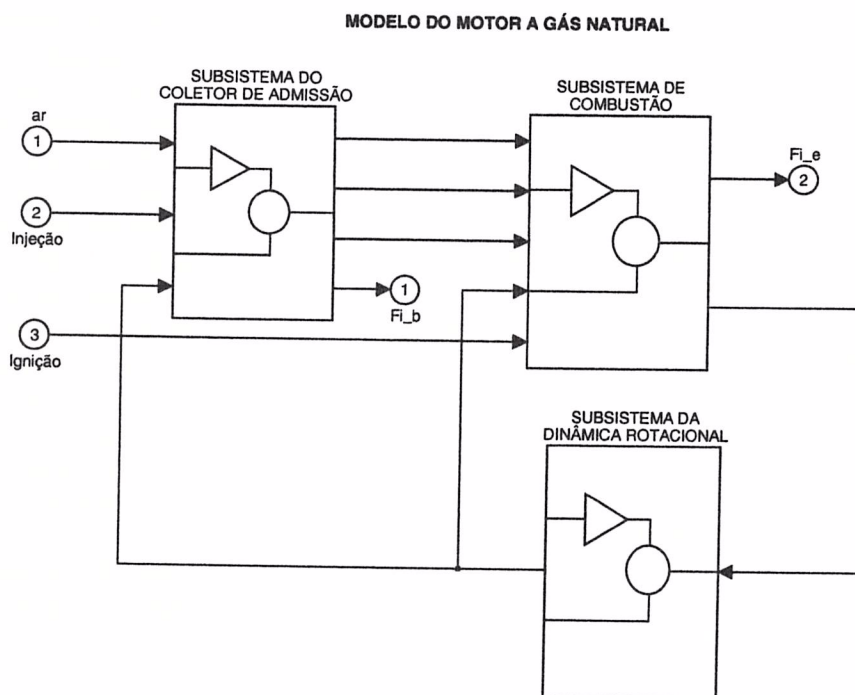


Figura 1: Diagrama do motor e da relação de entradas e saídas entre os subsistemas

Para a implementação de qualquer controlador baseado em modelo é necessário obter um modelo matemático (linear ou não) da planta em estudo. Neste artigo apresenta-se três técnicas de controle (GPC, LQ e LMI) baseadas em múltiplos modelos, onde cada uma delas utiliza-se de uma particular estratégia de chaveamento entre os modelos. O controlador GPC utiliza de um modelo linear identificado a priori, enquanto os controladores LQ e LMI necessitam de um modelo linear na forma de espaço de estados.



### 3 O Controlador GPC

Neste trabalho, utiliza-se o GPC básico proposto por CLARKE et al. (1987a e b) e adaptado para as aplicações em motores LOPES (1996), e está baseado num sistema linear discreto, invariante no tempo com duas entradas e duas saídas representado pela forma polinomial:

$$A(q^{-1}) \cdot y(t) = B(q^{-1}) \cdot u(t-1) + \frac{C(q^{-1})}{\Delta} \xi(t) \quad (1)$$

com

$$A(q^{-1}) = I + a_1 \cdot q^{-1} + a_2 \cdot q^{-2} + a_3 \cdot q^{-3} + a_4 \cdot q^{-4} \quad (2)$$

$$B(q^{-1}) = b_0 + b_1 \cdot q^{-1} + b_2 \cdot q^{-2} + b_3 \cdot q^{-3} + b_4 \cdot q^{-4} \quad (3)$$

$$C(q^{-1}) = I + c_1 \cdot q^{-1} + c_2 \cdot q^{-2} + c_3 \cdot q^{-3} + c_4 \cdot q^{-4} \quad (4)$$

onde

- $y(t)$  é um vetor  $2 \times 1$  que representa a seqüência temporal das saídas da planta;
- $u(t)$  é um vetor  $2 \times 1$  que representa a seqüência temporal das entradas da planta;
- $\xi(t)$  é um vetor  $2 \times 1$  que representa a seqüência temporal de um ruído branco Guaussiano entradas da planta;
- $A(q^{-1})$ ,  $B(q^{-1})$  e  $C(q^{-1})$  são matrizes polinomiais quadradas de ordem 2 e representam a descrição da planta;
- $q^{-1}$  é o operador atraso, isto é  $q^{-1}f(t) = f(t-1)$  para uma seqüência temporal qualquer;
- $\Delta$  é uma matriz polinomial diagonal da forma:

$$\Delta = \begin{bmatrix} 1 - q^{-1} & 0 \\ 0 & 1 - q^{-1} \end{bmatrix}$$

lembrando que  $1 - q^{-1}f(t) = f(t) - f(t-1)$ , assim, cada elemento da diagonal de  $\Delta$  é o operador diferença;

- $I$  é a matriz identidade de ordem 2.

Os modelos representados pela equação 1 são conhecidos na literatura por modelos CARIMA - Controlled Auto Regressive and Integrated Moving Average, onde as matrizes  $A$ ,  $B$  e  $C$  são obtidas através da identificação de sistemas.

Controladores GPC são baseados na otimização do índice de desempenho  $J$  que utiliza explicitamente um preditor de saídas futuras até que um horizonte de predição, baseado na planta, seja atingido. A expressão para o índice de desempenho do GPC é:

$$J = E \left\{ \sum_{k=N_i}^{N_f} [y(t+k) - y_r(t+k)]^2 + \sum_{k=0}^{N_u} [\Gamma(\Delta u(t+k-1))]^2 \right\} \quad (5)$$

onde  $N_i$  é o horizonte inicial de predição,  $N_f$  é o horizonte final de predição,  $N_u$  é o horizonte de controle,  $y_r$  é o vetor de saída de referência e  $\Gamma$  é o peso na variação dos controles.

As ações de controle são admitidas nulas depois que se atinge um horizonte de controle. Assim, o GPC é usualmente classificado como uma estratégia de controle preditivo de horizonte finito, baseada em modelo. Neste artigo, admite-se projeto sem restrições. Desse modo, uma lei de controle analítica pode ser obtida, ao contrário do caso que inclui restrições de estado onde somente podem ser alcançadas soluções numéricas quasi-ótimas. Os principais aspectos da aplicação do GPC ao controle da relação de ar-combustível são discutidas em ((LOPES, 1996)).

## 4 O Controlador LQ

Seja um sistema linear invariante no tempo, da forma:

$$\begin{cases} \dot{x} = A \cdot x + B \cdot u \\ y = C \cdot x + D \cdot u \end{cases} \quad (6)$$

onde  $x$  é o vetor das variáveis de estado,  $u$  é o vetor de controle e  $y$  é a saída do sistema.

O controlador Linear Quadrático (LQ) está inserido na classe de controladores chamados de reguladores. Projetar um controlador LQ é resolver um problema de otimização, isto é, determinar a lei de controle que minimiza o Índice de Desempenho do sistema  $J$  definido por:

$$J = \int_0^{\infty} x^T \cdot Q \cdot x + u^T \cdot R \cdot u \, dt \quad (7)$$

Para isso deve-se projetar duas matrizes. A primeira, a matriz  $Q$ , pondera o erro tolerável nas variáveis de estado. A segunda, a matriz  $R$ , representa a energia



que deve ser fornecida ao sistema a fim de realizar o controle desejado. A matriz  $Q$  deve ser sempre semi-definida positiva, isto é,  $Q \geq 0$ . Já a matriz  $R$  deve ser sempre definida positiva, isto é,  $R > 0$ .

Através de manipulações matemáticas pode-se mostrar que a solução  $K$  que minimiza o índice de desempenho dado por (7) é dada por  $K = R^{-1} \cdot B^T \cdot P$  onde  $P$  é a solução da equação algébrica de Ricatti associada ao problema de minimização.

O sistema dado pelas equações 6 pode ser estabilizado por uma lei de controle por realimentação de estado do tipo  $u = -K \cdot x$  desde que seja controlável, isto é, desde que os autovalores de  $(A - B \cdot K)$  possam ser livremente posicionados no plano complexo através da mudança dos valores da matriz  $K$ . Assim, para se estabilizar o sistema, os pólos de malha fechada devem ser posicionados no semi-plano esquerdo do plano complexo, o que na prática implica em poder levar o estado para zero.

## 5 O Controlador LMI

Considere um sistema linear invariante no tempo e descrito pela planta generalizada:

$$\begin{cases} \dot{x} = A \cdot x + B_1 \cdot w + B_2 \cdot u \\ z_\infty = C_\infty \cdot x + D_{\infty 1} \cdot w + D_{\infty 2} \cdot u \\ y = C_y \cdot x + D_{y1} \cdot w + D_{y2} \cdot u \end{cases} \quad (8)$$

onde  $x$  é o vetor de estados,  $u$  é o vetor de entrada,  $w$  é o vetor de perturbações,  $y$  é o vetor de saídas medidas e  $z_\infty$  é uma função de desempenho a ser minimizada.

Supondo que se deseja fechar a malha através do uso de um controlador  $K$  do tipo

$$\begin{cases} \dot{x}_k = A_k \cdot x_k + B_k \cdot y \\ u = C_k \cdot x_k + D_k \cdot y \end{cases} \quad (9)$$

o sistema em malha fechada torna-se

$$\begin{cases} \dot{x}_{fech} = A_{fech} \cdot x_{fech} + B_{fech} \cdot w \\ z_\infty = C_{fech1} \cdot x_{fech} + D_{fech1} \cdot w \\ z_2 = C_{fech2} \cdot x_{fech} + D_{fech2} \cdot w \end{cases} \quad (10)$$

O problema de controle  $H_\infty$  via LMI resume-se em encontrar as matrizes  $A_k$ ,  $B_k$ ,  $C_k$  e  $D_k$  do controlador que estabilize internamente a planta dada pela equação 8, de modo a minimizar a função objetivo  $J$  dada pela norma  $H_\infty$  da função de transferência ( $T_{z_\infty w}$ ) de  $w$  para  $z_\infty$ , isto é:

$$J = \|T_{z_\infty w}\|_\infty = \max_w \bar{\sigma}[T_{zw}(jw)]$$

## 6 Estrutura de Múltiplos Modelos

Dada a grande região de operação do um motor e às não linearidades envolvidas, o uso de um único modelo (linear) informado ao controlador torna-se insuficiente para um bom desempenho do motor ao longo de toda a sua faixa de operação.

Assim, se o modelo linearizado deixar de ser válido ao longo do funcionamento do motor, é importante que exista a possibilidade do uso de um novo modelo para essa nova região. A sincronização dos modelos pode ser feita por uma estratégia de chaveamento, onde a incerteza de cada um dos vários modelos linearizados é comparada e o modelo mais adequado para aquela condição particular é selecionado.

Esse é o princípio dos Múltiplos Modelos, ou seja, uma técnica que permite dividir o domínio não linear em regiões onde modelos linearizados podem ser obtidos e disponibilizados de tal forma que o sistema de controle seja capaz de reconhecer a região que o sistema se encontra e selecionar o correspondente modelo linearizado, permitindo ao controlador calcular a ação de controle adequada. A técnica dos Múltiplos Modelos tem sido usada para controle de sistemas não lineares desde os anos 70 com bons resultados (Narendra e Balakrishnam, 1995).

O modelo não linear do motor representa o sistema real para este estudo de simulação. O mapa do motor é dividido em 17 regiões para o cálculo dos Múltiplos Modelos, onde cada região corresponde a um ângulo preestabelecido de abertura da válvula borboleta de entrada de ar, aumentando de  $10^\circ$  (vazão mínima) para  $90^\circ$  (vazão máxima). Os modelos linearizados são então obtidos (por identificação, no caso do GPC e por linearização, nos casos LQ e LMI) para cada região e implementados no bloco da Lógica dos Múltiplos Modelos (Figura 2).

## 7 Implementação do Controladores

O diagrama do simulador (Motor + Controlador + Lógica dos Múltiplos Modelos) que será utilizado pelas três técnicas aqui apresentadas pode ser visto na figura 2.



**MOTORGAS**  
**Simulador da Dinâmica de um Motor a Gás Natural em Malha Fechada com**  
**Controlador auxiliado por uma estratégia de Múltiplos Modelos para**  
**Controle da Injeção de Combustível e Ignição da Mistura**

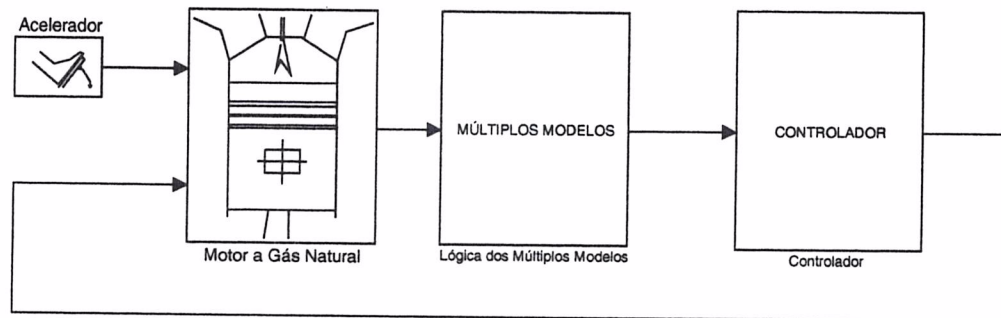


Figura 2: Diagrama geral do simulador do motor a gás natural

Vale ressaltar que todos os transitórios de variação da válvula borboleta (bloco acelerador - figura 2) foram suavizados pela função de transferência de 1ª ordem da forma:

$$s_{ped} = \frac{1}{s + 0.4} \quad (11)$$

Essa função de transferência foi baseada no tempo médio de resposta de um motorista para acionar o pedal do acelerador.

Apresenta-se agora as estratégias de chaveamento de cada um dos controladores MMLQ, MMGPC e MMLMI.

## 7.1 O MMGPC

A estrutura polinomial do controlador GPC permite a utilização de uma estratégia de chaveamento dos múltiplos modelos mais eficiente que a formulação em espaços de estado utilizada pelos controladores LQ e LMI.

No MMGPC todos os 17 modelos linearizados estão rodando ao mesmo tempo, e portanto, são amostradas 17 funções de erros em intervalos regulares. Supondo que em um determinado momento o *i*-ésimo modelo tem o menor valor absoluto entre as funções-erro, então a lógica de chaveamento troca o atual modelo pelo *i*-ésimo modelo. Portanto, para o próximo passo, a ação de controle será calculada baseada no *i*-ésimo modelo e os mesmos passos são repetidos em intervalos de tempo subsequentes.

A seguir apresentam-se alguns resultados das simulações do sistema em malha fechada onde foi efetuado um transitório (variações no pedal) de 50 para 90

graus, com o objetivo de analisar o desempenho do GPC auxiliado por múltiplos modelos, em manter a relação ar combustível próximo ao valor estequiométrico (em torno de 1% de desvio máximo).

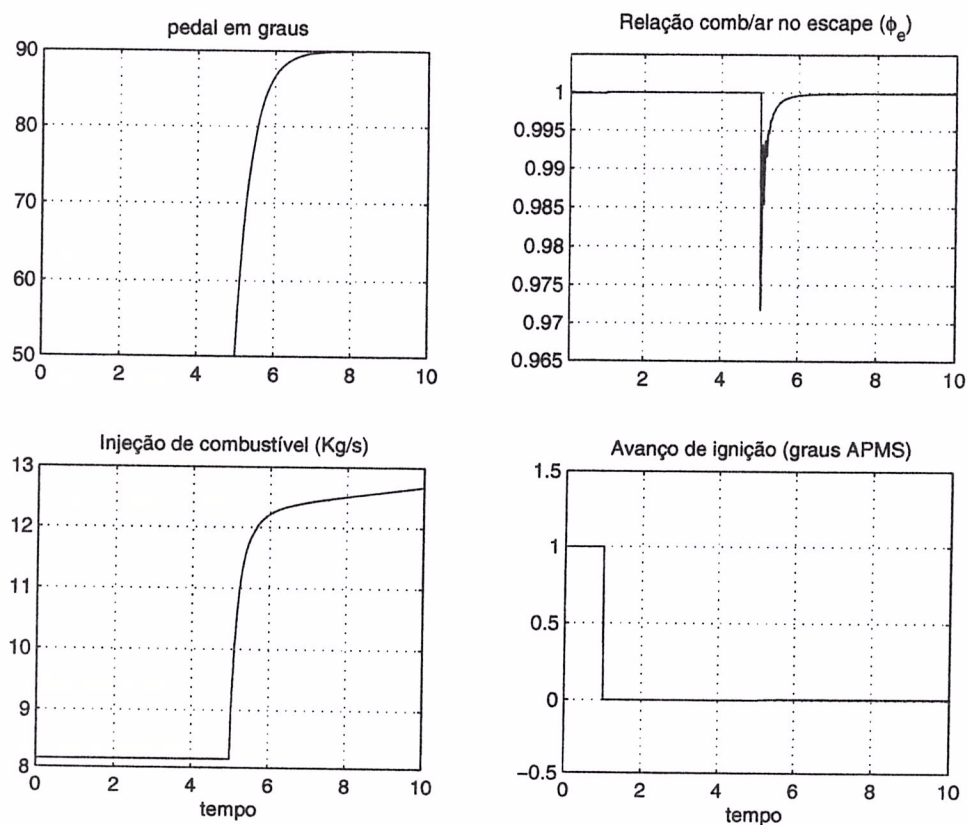


Figura 3: Variações da injeção de combustível, avanço de ignição, relação combustível/ar no escape e avanço de ignição para um transitório de 50° para 90° utilizando o controlador GPC com múltiplos modelos

A Figura 3 mostra o funcionamento do MMGPC no controle da relação combustível/ar quando se aplica um transitório de 50° para 90°. Pode-se observar a variação do valor da injeção de combustível e do avanço de ignição. Observe que mesmo neste transitório severo, onde foi efetuada uma variação de 40° na posição da válvula borboleta, foi possível controlar o sistema de modo que a razão combustível/ar no escape ( $\phi_e$ ) retorna ao valor estequiométrico igual a 1 depois de aproximadamente 0.3 segundos.



## 7.2 O MMLQ

A idéia implementada sobre o controlador LQ é uma estratégia de Múltiplos Modelos, onde é fornecido ao controlador dois modelos lineares a cada instante, de tal modo a prever a próxima faixa de operação do motor e, conseqüentemente, o próximo modelo linear a ser utilizado. Desse modo, as ações de controle serão baseadas não apenas em um único modelo linear, mas sim, numa combinação entre esses dois modelos. No caso de um MCI, por exemplo, se o motor encontra-se na posição de 52 graus de abertura de válvula borboleta então os modelos lineares de 50 e 60 graus seriam os modelos mais indicados para formarem essa combinação.

De um modo geral, admite-se que o sistema esteja em um determinado ponto de operação e, nessa situação, o controlador recebe dois modelos lineares: o modelo linear  $M_1$  e o modelo linear  $M_2$ , de maneira a cercar o ponto de operação atual. Então, em cada instante, o modelo a ser utilizado pelo controlador será expresso por:

$$M = (1 - \kappa) \cdot M_1 + \kappa \cdot M_2$$

para  $\kappa \in [0; 1]$ .

Esse tipo de combinação é chamada de combinação convexa e o resultado dessa estratégia de chaveamento é a troca contínua de um modelo para outro, conforme ilustrado na figura 4.

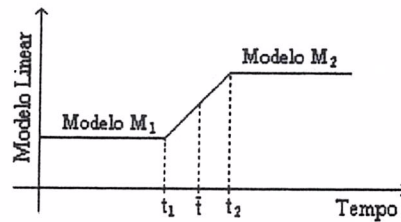


Figura 4: Chaveamento por combinação convexa de modelos lineares

Desse modo, quando a estratégia de chaveamento decidir que, em um determinado instante ( $t < t_1$ ), o melhor modelo é  $M_1$  então fazendo-se  $\kappa = 0$  o controlador tomará as decisões baseadas no modelo  $M_1$ . Porém, se o sistema caminhar ( $t_1 < t < t_2$ ) em direção a outro ponto, onde o melhor modelo é  $M_2$ , então fazendo-se  $\kappa$  variar continuamente entre 0 e 1 chega-se ao modelo  $M_2$  ( $t > t_2$ ).

Se mesmo assim o sistema continuar variando em direção a um novo modelo  $M_3$ , então o modelo  $M_1$  é substituído por  $M_3$  e recomeça-se uma nova combinação convexa entre  $M_2$  e  $M_3$ .

Apresentam-se os resultados de desempenho do MMLQ quando aplicado um transitório de 50 para 90 graus de variação na abertura da válvula borboleta.

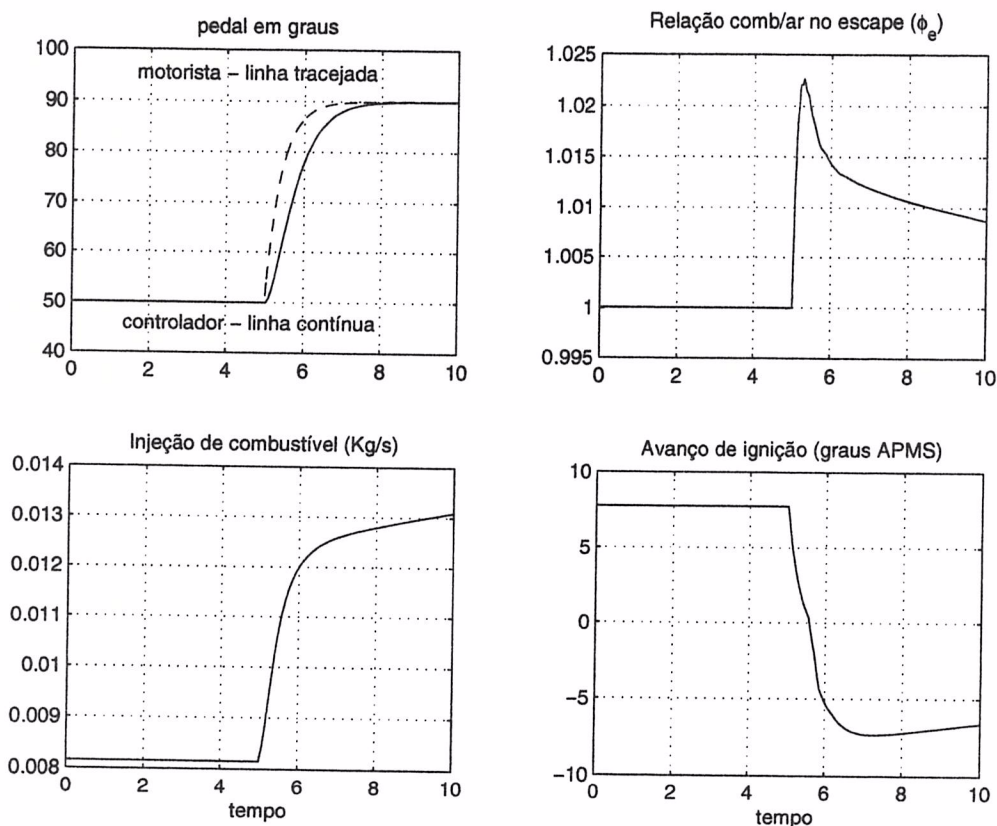


Figura 5: Variações da injeção de combustível, avanço de ignição, relação combustível/ar no escape e avanço de ignição para um transitório de 50° para 90° utilizando estratégias de chaveamento com combinação convexa acoplada ao controlador LQ

Observe na figura 5 o gráfico da variável  $\phi_e$  onde, apesar de o tempo de retorno ao valor estequiométrico da relação combustível/ar no escape ser praticamente o mesmo, a resposta transitória apresentou mudanças importantes. O gráfico de  $\phi_e$  mostra que o uso de combinação convexa na estratégia de chaveamento (em preto) retirou os picos de desvios do valor de  $\phi_e$  ocorridos a cada chaveamento no caso do MMLQ com chaveamento instantâneo (em vermelho). Observe ainda que a curva de injeção de combustível passa a ser suave, sem picos ou sobresaltos (em preto), o que implica em melhor dirigibilidade. O avanço de ignição também é afetado pela nova regra de tal forma que com essa nova estratégia pode-se evitar a saturação dos atuadores.

As variáveis vazão de ar, rotação do motor e pressão no coletor não sofreram mudanças em relação à estratégia anterior, conforme podem ser vistos nos gráficos da figura ???. O posicionamento da válvula borboleta definido pelo dispositivo "drive-by-wire" apresentou uma pequena modificação (linha preta em relação à vermelha) ao tentar acompanhar a posição do pedal que recebeu um transitório de 50 para 90 graus (linha azul).

### 7.3 O MMLMI

A estratégia de chaveamento utilizada com o LMI foi o posicionamento da válvula borboleta. Baseado na posição angular da válvula borboleta a lógica de chaveamento escolhe o modelo linear mais próximo correspondente a posição da válvula. Assim, se a válvula borboleta estiver com uma abertura de 58 graus o modelo escolhido pela lógica será o modelo linear em torno de 60 graus. Ainda para auxiliar, o controlador será utilizado um modelo para prever a quantidade de combustível injetado e que é baseado na medida da vazão de ar.

Para o desenvolvimento da estrutura proposta é utilizada uma medida indireta do fluxo de ar, ou seja, a quantidade de ar que passa pela válvula borboleta é obtida através de um modelo matemático. O modelo tem como entrada a posição da válvula borboleta e a pressão no coletor de admissão. Por essa razão, a medida da pressão no coletor é necessária e, assim, assume-se a existência de um sensor MAP para medir a pressão no coletor de admissão, porém não é incluído o modelo dinâmico desse sensor, apenas é considerado um atraso na leitura desse parâmetro. O atraso pode ser obtido observando que a menor frequência desse tipo de sensor é 92 Hz ((KING e WATSON, 2000)), ocorrido nas situações de alta depressão. Assim, é utilizado como atraso máximo do sensor MAP o valor  $\frac{1}{92}$  segundos.

Deste modo, a partir da medida da pressão ( $p$ ) e da posição angular da válvula borboleta ( $a$ ), será calculado o valor da vazão de ar através do seguinte modelo:

$$vz_{ar} = \begin{cases} 10^{-4} \cdot (-4 \cdot a^3 + 13 \cdot a^2 - a + 0.1) (-5 \cdot 10^{-8} \cdot p^2 + 0.0054 \cdot p + 39.6) & \text{se } p > 5.28 \cdot 10^4 \text{ Pa} \\ -0.076 \cdot a^3 + 0.24 \cdot a^2 - 0.019 \cdot a + 0.002 & \text{se } p \leq 5.28 \cdot 10^4 \text{ Pa} \end{cases} \quad (12)$$

O modelo dado pela equação 12 é alimentado pelo sensor de pressão absoluta e pela posição do pedal, visando calcular a vazão de ar que passa instantaneamente pela válvula borboleta e a partir desse valor obter a quantidade de combustível que gera a mistura estequiométrica. Essa estrutura forma a estratégia de supervisão do controlador e foi acoplada ao MMLMI. Assim, durante os transitórios, cada ação de controle é corrigida pelo modelo supervisor de modo a manter a mistura estequiométrica durante o maior tempo possível.



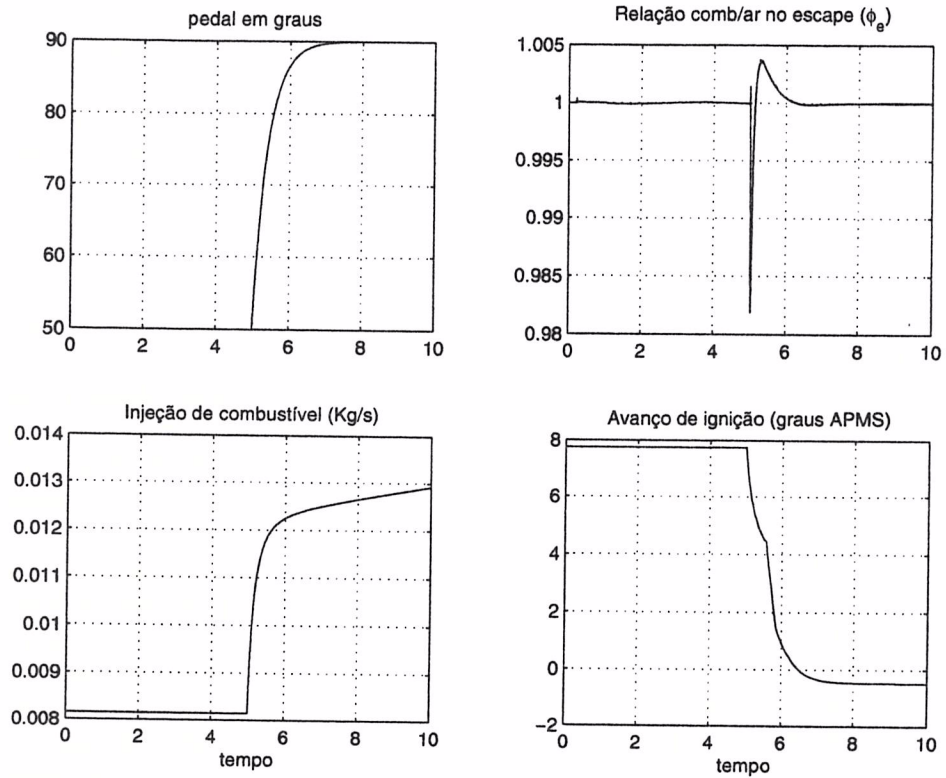


Figura 6: Variações do ângulo de abertura da válvula borboleta, injeção de combustível, avanço de ignição e relação combustível/ar no escape ( $\phi_e$ ), para um transitório de 50° para 90° utilizando o controlador LMI com múltiplos modelos

Na figura 6 pode ser visto o comportamento das variáveis injeção de combustível, avanço de ignição e relação combustível/ar no escape para um transitório de 50 para 90 graus. Porém, neste caso o modelo de supervisão auxilia o controlador MMLMI de tal modo que durante o transitório de 50 para 90 graus, a relação combustível/ar  $\phi_e$  apresentou uma excursão menor que 2% de desvio em relação ao valor estequiométrico.

## 8 Comparações entre os controladores MMGPC, MMLQ e MMLMI

Conforme foi descrito, cada técnica de controle exigiu a sintonização dos múltiplos modelos através de estratégias diferentes de chaveamento. Apesar do objetivo deste artigo não ser fazer comparações entre os desempenhos de cada uma das técnicas desenvolvidas, a comparação é inevitável uma vez que as técnicas

GPC, LQ e LMI foram aplicadas sobre uma mesma planta, ou seja, sobre um modelo simulador do ambiente de funcionamento de um motor de combustão interna. Por essa razão, faz sentido apresentar aqui um gráfico comparativo do desempenho em controlar a razão combustível/ar dentre os melhores resultados de cada uma das três técnicas de controle apresentadas neste trabalho.

Na figura 7 é mostrado os resultados de algumas variáveis do motor para um transitório de 50 para 90 graus aplicado à válvula borboleta. Os controladores MMGPC, MMLQ e MMLMI são representados, respectivamente, por linha contínua, linha traço-ponto e linha pontilhada.

Observa-se no gráfico da figura 7 que o MMLMI realmente apresentou um desempenho superior aos demais, pois conseguiu trazer o valor da razão combustível/ar no escape ( $\phi_e$ ) de volta à faixa de desvio máximo permitido em apenas 0.1 segundo. Além disso, o MMLMI permite uma excursão do valor da razão combustível/ar menor do que 2% de desvio em relação ao valor estequiométrico. Esse é um resultado inédito no controle da relação combustível/ar em transitórios longos de 40 graus de variação da válvula borboleta.

O MMLQ apresentou o pior resultado dentre os três controladores, pois o valor da variável  $\phi_e$  demora mais do que 2.0 segundos para retornar para dentro da faixa permitida.

O GPC mostrou ser uma técnica promissora, pois o MMGPC conseguiu trazer o valor da relação combustível/ar em pouco mais de 0.2 segundo. Porém, permitiu uma excursão de aproximadamente 3% de desvio em relação ao valor estequiométrico.

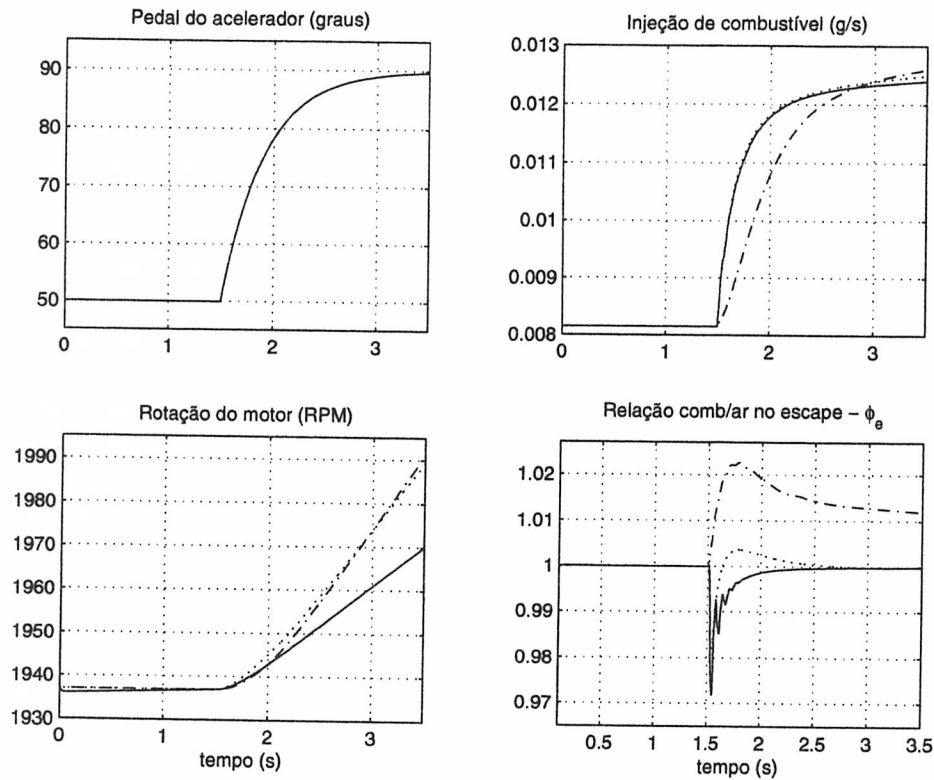


Figura 7: Gráfico comparativo dos valores da injeção de combustível, rotação e  $\phi_e$  dos controladores MMGPC, MMLQ e MMLMI, quando se aplica um transitório de 50° para 90°

Na figura 7 são apresentados os resultados das variáveis injeção de combustível e da rotação do motor para a respectiva variação do pedal do acelerador. Pode-se observar que tanto o MMLMI como o MMLQ foram mais eficientes na aceleração do motor (gráfico da rotação) do que o MMGPC, de tal modo que 2.0 segundos após o transitório a diferença de rotação chega a 20 rpm. Obviamente esse comportamento se deve ao fato de que tanto o MMLMI como o MMLQ permitiram mistura rica (valores de  $\phi_e > 1$ ) durante um pequeno intervalo de tempo, o que aumenta o torque gerado pelo motor. Ao passo que o MMGPC durante todo o transitório trabalhou com mistura pobre ( $\phi_e < 1$ ). Ainda na figura 7, vale destacar que, apesar do valor da injeção de combustível no MMLQ ser menor do que no MMLMI e no MMGPC, o seu valor de  $\phi_e$  permaneceu acima do valor estequiométrico (mistura rica) durante quase todo o transitório. Isso se deve ao fato de que no MMLQ a abertura da válvula borboleta também é comandada pelo controlador (sistema "drive-by-wire").



## 9 Conclusões

Os resultados de simulação alcançados demonstram que é possível controlar transitórios severos em um motor a gás natural em curtos intervalos de tempo com pequenas excursões fora dos valores nominais de operação.

Cada técnica apresentada neste trabalho teve suas particularidades. A formulação polinomial do controlador GPC permitiu o uso de uma estratégia de chaveamento mais inteligente, uma vez que foi possível comparar as saídas de cada um dos 17 modelos lineares e assim escolher aquele que melhor representava a dinâmica do motor naquele ponto de operação. Porém, a consequência dessa estrutura de chaveamento é um maior tempo de processamento do simulador com o MMGPC. O uso dessa estratégia mostrou que a escolha do modelo a ser utilizado pelo controlador não era baseado apenas na posição do pedal, mas também na rotação do motor. Esse comportamento se deve ao fato de que, no caso do GPC, cada modelo linearizado foi identificado baseado na carga e na rotação a que o motor está sujeito.

O controlador GPC apresentou bons resultados embora sua implementação prática dependeria de uma estrutura com alta capacidade de processamento. Porém, a sua implementação não requer um grande número de sensores ou atuadores, uma vez que o GPC tem como entrada a relação combustível/ar e fornece a quantidade de combustível e o avanço de ignição. Na prática, significa que o GPC exigiria apenas sensores do tipo lambda e injetores de combustíveis.

O controlador linear quadrático, dadas as suas características de regulador, necessitou da inclusão de outros dispositivos anexados aos múltiplos modelos afim de produzir melhores resultados. A formulação simples da lei de controle permitiu facilmente a inclusão do dispositivo "drive-by-wire", sem a necessidade de grandes mudanças no modelo. Além disso, a simplicidade da lei de controle permitiu o chaveamento por combinação convexa dos ganhos de controle, resultando em um comportamento mais uniforme de todas as variáveis e eliminando os picos indesejáveis que aparecem a cada troca de modelos. Vale destacar que durante o desenvolvimento da técnica do controlador linear quadrático não houve a preocupação com a implementação prática desse controlador, haja visto que a lei de controle por realimentação de estados, fornecida por este método, exige o conhecimento de todos os estados, o que implicaria na prática a necessidade do uso de observadores.

O LQ demonstrou ser um controlador razoável, de estrutura simples, exigindo pouca capacidade de processamento, mas não foi eficiente no controle de transitórios longos e por isso necessitaria de uma investigação mais cuidadosa. Devido à sua característica, o controlador LQ seria mais apropriado no controle de motores estacionários, sendo que a implementação prática ainda exigiria o desenvolvimento de um estimador de estados.

O desenvolvimento do controlador via inequações matriciais lineares foi baseado nos modelos lineares em espaço de estados. A formulação escolhida foi um

controlador  $H_\infty$  onde o índice de desempenho foi minimizado utilizando as ferramentas fornecidas pelo LMI. O modelo da planta utilizado inclui uma variável de perturbação externa de tal modo que a formulação utilizada foi razoavelmente simples diante de todas as ferramentas que a técnica do LMI oferece. Por exemplo, não foram anexados modelos de incertezas, o que certamente aumentaria a robustez do controlador. Do mesmo modo, não se utilizou da poderosa formulação LPV para controladores com parâmetros variantes no tempo. Mesmo assim, o LMI mostrou ser uma técnica de controle robusta já nas primeiras simulações. No desenvolvimento dos múltiplos modelos foram investigadas diversas estratégias de chaveamento cujos resultados foram imprescindíveis para o desenvolvimento de um modelo supervisor capaz de auxiliar no controle da quantidade de combustível injetado durante os transitórios. A introdução desse modelo se baseou na experiência obtidas ao longo de todo este trabalho, onde simulações mostraram que erros na quantidade de injeção de combustível eram responsáveis pela maioria dos casos de instabilização do sistema. Além disso, a injeção de combustível afeta diretamente o objetivo de controle, ou seja, a relação combustível/ar no escape. O MMLMI anexado à estrutura para supervisionar a quantidade de combustível forneceu melhores resultados quando comparado às outras duas técnicas utilizadas.

O trabalho realizado apontou as dificuldades encontradas em projetar controladores para MCI's, onde se tornou evidente a importância de se possuir um bom modelo, dado que este é a representação da realidade e base de todo o trabalho de controle.

O controlador LMI apresentou resultados inéditos no controle de transitórios longos e possibilitou trabalhar com o simulador em toda a sua faixa de operação e com pouca capacidade de processamento. A implementação prática do LMI também seria simples como no caso do GPC, exigindo sensores lambda e injetores de combustíveis. Porém, devido ao modelo supervisor, também seria necessário um sensor de pressão, muito utilizado nos veículos atuais e conhecido como sensor MAP.

Este trabalho mostrou as dificuldades de um projeto de engenharia e a importância de um bom planejamento para se conseguir bons resultados. Diante disso, este trabalho mostrou que é possível o controle dos níveis de emissões em MCI's de modo a adequá-lo aos padrões exigidos pelos órgãos que regulamentam o setor e proporcionar melhor qualidade de vida nos grandes centros urbanos.

## Referências

- CLARKE, D. W., C. MOHTADI e P. S. TUFFS (1987a). Generalized predictive control - part I: The basic algorithm. *Automatica* **23**(2), 137–148.
- CLARKE, D. W., C. MOHTADI e P. S. TUFFS (1987b). Generalized predictive control - part II: Extensions and interpretations. *Automatica* **23**(2), 149–160.
- KING, D. H. e G. R. WATSON (2000). *Computadorized engine control*. fifth edition ed.. DELMAR - Thomson Learning.
- LOPES, J. A. (1996). **Um controlador preditivo generalizado (GPC) aplicado ao problema de controle da relação ar-combustível em motores ciclo Otto, operando com gás natural, com vistas em redução de emissões**. Dissertação(Mestrado) Escola Politécnica, USP. São Paulo,1996.
- TILAGONE, R., G. MONNIER, A. SATRE, Y. LENDRESSE, J. PERSONNAZ, D. CULLERIER e F. TURNIN (2000). Development of a lean-burn natural gas-powered vehicle based on a direct-injection diesel engine. *SAE paper 2000-01-1950*.
- WEEKS, R. W. e J. J. MOSKWA (1995). Transient air flow rate estimation in a natural gas engine using a nonlinear observer. *SAE paper 940759*.





## BOLETINS TÉCNICOS

## TEXTOS PUBLICADOS

- BT/PME/0001 – Controle Ativo de Ruído em Dutos Usando Algoritmo Genético – JAMES CUNHA WERNER, JOSÉ SOTELO JÚNIOR
- BT/PME/0002 – Metodologia de aplicação de Forças para Análise Dinâmica Estrutural de Motores de Combustão Interna – EDUARDO BUENO NIGRO, AGENOR DE TOLEDO FLEURY
- BT/PME/0003 – Calibração de Padrões Metrológicos Utilizando Visão Computacional – FLAVIUS PORTELLA RIBAS MARTINS, FRANCISCO EMÍLIO BACCARO NIGRO
- BT/PME/0004 – Análise Computacional da Intensificação da Transferência de Calor Através de Geradores de Vórtices em Trocadores de Calor Compactos com Duas Fileiras de Tubos – ROGÉRIO RODRIGUES JÚNIOR, JURANDIR ITIZO YANAGIHARA
- BT/PME/0005 – Modificações na Estruturas de Escoamentos Turbulentos em Canais Devido a Adição de Polímeros. Mecanismos da Redução de Atrito – GUILHERMO VILALTA, JAIME P. ORTIZ
- BT/PME/0006 – Estudo Numérico de Jatos Evaporativos – EDVALDO ANGELO, JOSÉ ROBERTO SIMÕES MOREIRA
- BT/PME/0007 – Estudo da Resposta Dinâmica de Pressão de Fluidos Incompressíveis em Tubos Elásticos – FLÁVIO SPINOLA BARBOSA, JAYME PINTO ORTIZ
- BT/PME/0008 – Investigação Experimental da Influência de Geradores de Vórtices em Trocadores de Calor Compactos com duas Fileiras de Tubos em Arranjo Alternado – JUAN JOSÉ GONZÁLEZ BAYÓN, JURANDIR ITIZO YANAGIHARA
- BT/PME/0009 – Estudo Experimental de Jatos Evaporativos – MARCELO MENDES VIEIRA, MARCELO SILVA GUIMARÃES, JOSÉ R. SIMÕES MOREIRA
- BT/PME/0010 – Sistema para o Ensaio de Turbinas de Tesla – RICARDO LUIZ LABOZETO, CARLOS CHING TU, JOSÉ R. SIMÕES MOREIRA
- BT/PME/0011 – Mecanismos de Desgaste de Rodas Ferroviárias – LUIZ HENRIQUE DIAS ALVES, AMILTON SINATORA
- BT/PME/0012 – Sistema Tetra Combinado de Cogeração. Avaliação Exergética e Termoeconômica – DOMINGO WILSON GARAGATTI ARRIOLA, SILVIO DE OLIVEIRA JÚNIOR
- BT/PME/0101 – Modelo de Comportamento Termodinâmico de uma Bomba Multifásica do Tipo Duplo Parafuso – CELSO YUKIO NAKASHIMA, SILVIO DE OLIVEIRA JR.
- BT/PME/0102 – Contact Simulation Between Truck Tires and the Roadway Concerning the Tread Wear – ARGEMIRO LUIS DE ARAGÃO COSTA, LINILSON R. PADOVESE
- BT/PME/0103 – Subsídios para Utilização da Base de Dados Corporativa na Atividade de Projetos – RENATO VIZIOLI, PAULO CARLOS KAMINSKI
- BT/PME/0104 – Controle de Vibrações de um Braço Rotativo Flexível pelo Movimento de uma Massa sobre o Braço – FREDERICO RICARDO FERREIRA DE OLIVEIRA, AGENOR DE TOLEDO FLEURY
- BT/PME/0105 – Modelo de Reator a Plasma para Tratamento de Cinzas de Incineração – RENATO ALFREDO SCHRÖTER, MÍRIAM ROCCHI TAVARES
- BT/PME/0106 – Projeto e Simulação de um Controlador Fuzzy para Condução de uma Composição Ferroviária – MARIA PADILHA GANDARA MENDES, AGENOR T. FLEURY
- BT/PME/0107 – Análise Experimental e Simulação de Vibrações Induzidas por Bombas em Sistemas de Combustível de Aeronaves – WEBER DE BRITO BARBOSA, AGENOR TOLEDO FLEURY
- BT/PME/0108 – Modelos Numéricos Aplicados à Vulcanização de Pneus – EDUARDO GONÇALVES PINHEIRO, LINILSON RODRIGUES PADOVESE
- BT/PME/0201 – Avaliação das Mudanças Ocorridas no Desenvolvimento de Produtos Devidas à Utilização de Modelos Produzidos por Prototipagem Rápida – JOÃO HENRIQUE SILVEIRA ALVES DE OLIVEIRA, PAULO CARLOS KAMINSKI
- BT/PME/0202 – Biomechanical Modeling and Optimal Control of Human Posture With Algorithms Based on Consistent Approximations Theory – LUCIANO LUPORINI MENEGALDO, AGENOR DE TOLEDO FLEURY
- BT/PME/0203 – Filtro Estendido de Kalman Aplicado à Tomografia por Impedância Elétrica – FLÁVIO CELSO TRIGO, RAUL GONZÁLEZ LIMA
- BT/PME/0204 – Simulador Hidrodinâmico para Estudos “In Vitro” do Sistema Cardiovascular - EDIR BRANZONI LEAL, JAYME PINTO ORTIZ, DOMINGOS GUERINO SILVA
- BT/PME/0205 – Uma Metodologia para a Especificação e Seleção de Máquinas para Processos de Manufatura, Através da Análise do Custo Total do Processo – RICARDO CARDIA CARDOSO, PAULO CARLOS KAMINSKI

- BT/PME/0206 – Desenvolvimento de Novos Produtos: Uma Proposta de Metodologia – ANTONIO CARLOS DE OLIVEIRA, PAULO CARLOS KAMINSKI
- BT/PME/0207 – Simulação Térmica de um Sistema Antigelo de um Aerofólio – GUILHERME ARAÚJO LIMA DA SILVA, OTÁVIO DE MATTOS SILVARES
- BT/PME/0208 – Simulação Numérica do Escoamento ao Redor de um Agrupamento de Quatro Cilindros em Diversas Configurações – RICARDO BECHT FLATSCHART, JULIO ROMANO MENEHINI, FÁBIO SALTARA
- BT/PME/0209 – Sistemática para Avaliação de Instalações de Ar Condicionado em Edifícios de Escritórios e Similares sob Óptica do Usuário – FÚLVIO VITTORINO, MARCOS DE MATTOS PIMENTA
- BT/PME/0210 – Proposta de Método para Caracterização de Propriedades Termomecânicas de Filmes Finos Utilizando Dispositivos MEMS – MARCELO SILVA GUIMARÃES, AMILTON SINATORA
- BT/PME/0211 – Modelagem, Simulação e Controle da Glicemia em Pacientes Diabéticos Hospitalizados – JOSE AUGUSTO LOPES, AGENOR DE TOLEDO FLEURY
- BT/PME/0212 – Sistema de Monitoramento e Detecção de Transição de Regime de Lubrificação em Mancal de Deslizamento – ELVYS MERCADO CURI, LINILSON R. PADOVESE
- BT/PME/0213 – Controlador de Posição Linear Hidro-Pneumático – SIDNEY NOGUEIRA PEREIRA DE JESUS, LINILSON R. PADOVESE
- BT/PME/0214 – Fadiga de Contato e Mapa de Desgaste de Discos Metálicos Não-Conformes Solicitados por Contato de Rolamento Cíclico – JOÃO TELÉSFORO NÓBREGA DE MEDEIROS, DENIOL KATSUKI TANAKA
- BT/PME/0215 – Modelo Preditivo da Emissão da Emissão e Dispersão no NO<sub>x</sub> Gerado em Usinas Termoelétricas como Instrumento de Análise de Inserção e Capacidade de Suporte Regional da Qualidade do Ar – JEAN CESARE NEGRI, CLEMENTE GRECO, SILVIO DE OLIVEIRA JUNIOR
- BT/PME/0216 – Concepção, Desenvolvimento e Teste de um Lavador de Gases – RYSZARD MAJEWSKI, ARLINDO TRIBESS
- BT/PME/0217 – Modo de Operação de Busca de Aproximado Ótimo Aplicado a Sistemas de Posicionamento Dinâmico – EDUARDO AOUN TANNURI, CELSO PUPO PESCE, DECIO C. DONHA
- BT/PME/0218 – Um Modelo para Análise da Instabilidade dos Reforçadores no Processo de Fabricação de Tubos Estruturados – MARCELO A. L. ALVES, PAULO C. KAMINSKI
- BT/PME/0219 – Sintonia de Controladores PID por Algoritmos por Genéticos – GERSON RISSO, DECIO CRISOL DONHA
- BT/PME/0220 – Relação entre Microestrutura e Resistência a Cavitação de Ligas Fundidas Baseadas no Sistema Fe-Cr-Ni-C – MARCIO GUSTAVO DI VERNIERI CUPPARI
- BT/PME/0301 – Ar Condicionado Automotivo: Caracterização e Avanços Tecnológicos – JOSÉ ALBERTO ÁVILA, ARLINDO TRIBESS
- BT/PME/0302 – Influência do Tamanho de Partículas Abrasivas no Coeficiente de Atrito Cinético de Aços com Diferentes Durezas – GIUSEPPE PINTAÚDE, AMILTON SINATORA
- BT/PME/0303 – Estudo do Desgaste e Atrito de um Par Metálico sob Deslizamento Lubrificado – MARCIA MARIE MARU, DENIOL KATSUKI TANAKA
- BT/PME/0304 – Sistema de Ar Condicionado com Insuflamento pelo Piso em Ambientes de Escritórios: Avaliação do Conforto Térmico e Condições de Operação – BRENDA CHAVES COELHO LEITE, ARLINDO TRIBESS
- BT/PME/0305 – Performance Comparative Study of Brazilian Small Engines of 1.0L Displacement – MARCELO MARCOS POLTRONIERI, RONALDO DE BREYNE SALVAGNI, OMAR MOORE DE MADUREIRA
- BT/PME/0306 – Basic Design of a Front, Directional and Suspended Traction Shaft of Farm Tractors – ROSALVO BERTULLUCCI FILHO, RONALDO DE BREYNE SALVAGNI, OMAR MOORE MADUREIRA
- BT/PME/0307 – Development of a Continuous Variable Transmission Project for Vehicles Powered with 1.0 Liter Displacement Engine – WALTER SILVERIO PELLIZZARI JR., RONALDO DE BREYNE SALVAGNI, OMAR MOORE DE MADUREIRA
- BT/PME/0308 – Considerações Gerais sobre a Vibração Torcional em Componentes de Trem de Força de Veículos Comerciais – CELSO APARECIDO JOAO, PAULO CARLOS KAMINSKI
- BT/PME/0309 – Aplicação do Seis Sigma e da Metodologia DMAMC a um Processo de Identificação e Solução de Problemas Durante a Corrida Piloto de um Projeto Automotivo – RICARDO MAAME FANUCCHI, PAULO CARLOS KAMINSKI
- BT/PME/0310 – Qualidade no Processo de Desenvolvimento do Produto na Indústria Automotiva – MÁRIO DOS SANTOS BARROCO, PAULO CARLOS KAMINSKI
- BT/PME/0311 – Escolha de Sistemas de Ar Condicionado – HUGO LAGRECA FILHO, ARLINDO TRIBESS
- BT/PME/0312 – Seleção de Centrais Termoelétricas Utilizando Gás Natural e Bagaço de Cana – CAIO DE PAULA LEITE, ARLINDO TRIBESS
- BT/PME/0401 – Análise do Escoamento de Fluidos Refrigerantes Alternativos ao HCFC 22 em Tubos Capilares Adiabáticos – FLÁVIO AUGUSTO SANZOVO FIORELLI, OTÁVIO DE MATTOS SILVARES



- BT/PME/0402 – Engenharia do Valor e Custo-Alvo como Metodologia de Trabalho no Processo de Desenvolvimento de Produtos – UGO IBUSUKI, PAULO CARLOS KAMINSKI
- BT/PME/0403 – Avaliação de Impacto Ambiental Produzido por Usinas Termelétricas com Enfoque na Poluição Atmosférica – Estudo de Caso<sup>3</sup> - ANTONIO GONÇALVES DO CURRAL, JAYME PINTO ORTIZ
- BT/PME/0404 – Flexibilização em uma Planta de Conceito de Produção Modular: Um Estudo Comparativo entre a GM de Gravataí e GM de São José dos Campos – LANDER OZAKI, MAURO ZILBOVICIUS
- BT/PME/0405 – Rudimentos da Mecânica dos Pneumáticos – WILLIAM MANJUD MALUF FILHO, MARCELO MASSARANI
- BT/PME/0406 – Diagnóstico de Falhas Através da Análise de Vibrações pelo Método de Sinais Residuais na Manutenção Preditiva de Indústrias de Papel e Celulose – LUIZ FERNANDO RIBEIRO ROCHA, LINILSON RODRIGUES PADOVESE
- BT/PME/0407 – Avaliação da Contaminação em Óleos Lubrificantes de Rolamentos Através da Análise do Óleo e da Assinatura dos Sinais de Vibrações – MARCELLO ATTILIO GRACIA, LINILSON RODRIGUES PADOVESE
- BT/PME/0408 – Simulação Aplicada à Otimização de Suspensões Veiculares Voltada à Melhoria de Conforto – DANIEL VILELA, EDILSON HIROSHI TAMAI
- BT/PME/0409 – Proposta de um Método de Projeto de Próteses de Membros Superiores com a Utilização da Engenharia e Análise do Valor – GUSTAVO LONGHI DE CARVALHO, MARCELO MASSARANI
- BT/PME/0410 – Indicadores Exergéticos para Avaliação do Impacto Ambiental de Processos de Conversão de Energia – CARLOS HUMBERTO MORA BEJARANO, SILVIO DE OLIVEIRA JÚNIOR
- BT/PME/0411 – Estratégias de Controle para Sistema de Condicionamento de Ar em Aeronaves de Passageiros – WALLACE HESSLER LEAL TURCIO, ALBERTO HERNANDEZ NETO
- BT/PME/0501 – Análise Comparativa de Fluxo em Fístula Arteriovenosa - KLEIBER LIMA DE BESSA, JAYME PINTO ORTIZ
- BT/PME/0502 – Estudo do Efeito de Suporte de Modelo de Túnel de Vento Tipo Sting – ADSON AGRICO DE PAULA, JULIO ROMANO MENEGHINI, JOSÉ AUGUSTO PENTEADO ARANHA
- BT/PME/0503 – Simulação Numérica Bidimensional de Escoamento Transversal ao Redor de um Cilindro Circular, Utilizando o Fractional Step Method – ALISON BONACCORSI, JULIO ROMANO MENEGHINI, FÁBIO SALTARA
- BT/PME/0601 – A Otimização do Valor do Produto Aplicada ao Projeto de Componentes Automotivos em Produção – GUIDO MUZIO CANDIDO, PAULO CARLOS KAMINSKI
- BT/PME/0602 – Construção Funcional: Uma Abordagem do Desenvolvimento de Componentes Individuais da Carroceria, com Foco no Veículo Completo, Integrando o Produto, o Processo e a Manufatura – JEFFERSON RIGHETTO, PAULO CARLOS KAMINSKI
- BT/PME/0603 – Aplicação da Metodologia "Design for Six Sigma" (DFSS) em Projetos Automotivos – ALEXANDRE FIORAVANTI, PAULO CARLOS KAMINSKI
- BT/PME/0604 – Avaliação Experimental de Condições de Conforto Térmico em Automóveis de Passeio Utilizando Manequim – ANDRÉ BUSSE GOMES, ARLINDO TRIBESS
- BT/PME/0605 – Tecnologia de Embalagem CKD para Peças Estampadas e Conjuntos de Carroceria de Veículos Automotivos – BRAULIO BARRIOS VEIGA, ARLINDO TRIBESS
- BT/PME/0606 – Dimensionamento e Avaliação do Ciclo de Refrigeração de Sistema de Climatização Automotivo – EDUARDO OLIVEIRA DOS SANTOS, ARLINDO TRIBESS
- BT/PME/0607 – Avaliação Comparativa de Sistemas Híbridos de Cogeração a Gás Natural e Bagaço de Cana – LEONARDO MONECI ZAMBONI, ARLINDO TRIBESS
- BT/PME/0608 – Avaliação Numérica de Ambientes com Insuflamento de Ar Frio pelo Piso – MARCELO PUSTELNIK, ARLINDO TRIBESS
- BT/PME/0609 – Avaliação e Validação de Sistemas de Air Bag em Veículos de Passeio – WASHINGTON HENRIQUE FREITAS DA SILVA, ARLINDO TRIBESS
- BT/PME/0610 – Proposta de Análise da Contribuição dos Componentes do Conjunto Propulsor de um Veículo em Aceleração no Ruído Externo Gerado (Pass-By Noise – PBN) – Estudo de Caso com Veículo Comercial Leve – JOSÉ LINCOLN LOPES CAVALCANTI, SYLVIO REYNALDO BISTAFÁ
- BT/PME/0611 – Análise Teórica Experimental da Impregnação de Moldes com Mantas por Polímero Tipo Poliéster – LUIZ ALBERTO PAOLIELLO ALVIM, MARCOS DE MATTOS PIMENTA
- BT/PME/0612 – Análise do Coeficiente de Atrito no Ensaio do Anel para o Forjamento a Quente – CARLOS BÖRDER, AMILTO SINATORA
- BT/PME/0613 – Redução de Poluentes Gasosos e de Material Particulado por Meio do Uso de Combustíveis a Base de Óleos Vegetais como Substituto ao Óleo Diesel – CARLOS KAZUAKI YAZAKI, MAURÍCIO ASSUMPÇÃO TRIELLI
- BT/PME/0614 – Efeito da Temperatura do Líquido de Arrefecimento na Produção de Emissões Poluentes de Motor de Ignição por Faisca – FERNANDO CORRADINI, MAURÍCIO ASSUMPÇÃO TRIELLI
- BT/PME/0615 – Projeto de Microposicionador para Máquina de Medição de Circularidade – LEONARDO MASSUNARI LIEU, AGENOR DE TOLEDO FLEURY

- BT/PME/0616 – A Aplicação da Simulação no Processo de Desenvolvimento de Produtos na Indústria Automobilística – EMERSON FISCHLER, DOUGLAS LAURIA
- BT/PME/0617 – Influência do Acabamento Superficial no Desempenho de Bronzinas – SAMANTHA UEHARA, ROBERTO MARTINS DE SOUZA
- BT/PME/0618 – Estudo para Aplicação da Tecnologia Multi Combustível no Mercado Automobilístico Brasileiro – ALEXSANDER DAVID GASPAROTTO, MARCELO MASSARANI
- BT/PME/0619 – Processo de Análise e Direcionamento de Projeto de Powertrain para o Melhor Consumo de Combustível Veicular – JORGE RADOSEVIC RUPCIC, MARCELO MASSARANI
- BT/PME/0620 – Modelagem do Fluxo de Halon-1301 em Sistemas de Extinção de Fogo das Unidades Auxiliares de Potência Instaladas em Aeronaves – JOSÉ LUIS FRANCO FERNANDEZ, JAYME PINTO ORTIZ
- BT/PME/0621 – Sistemas Controlados de Propulsão de Veículos Automotores – CLAYTON VINICIUS FERRAZ, DECIO CRISOL DONHA
- BT/PME/0622 – Diagnóstico Automático de Defeitos em Rolamentos Baseado em Lógica Fuzzy – RODRIGO YOSHIKI FUJIMOTO, LINILSON RODRIGUES PADOVESE
- BT/PME/0623 – Gerenciamento do Valor em Veículos Automotivos – ROBERTO VACCARI FILHO, MARCELO MASSARANI