

PROJETO DE CONTROLADORES GPC PARA CONTROLE DA RELAÇÃO AR/COMBUSTÍVEL EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA MOVIDOS A GÁS NATURAL

Agenor T. Fleury ♦, ♠

Fernando S. Freitas Jr. ♣, ♠

- ♦ IPT/Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
Divisão de Mecânica e Eletricidade/DME
Agrupamento de Sistemas de Controle
Caixa Postal 0141, ZC 01064-970, São Paulo, SP, Brasil,
e-mail: agfleury@ipt.br
- ♠ Escola Politécnica, Universidade de São Paulo,
Departamento de Engenharia Mecânica
Caixa Postal 61548, ZC 05508-900, São Paulo, SP, Brasil,
e-mail: ffreitas@usp.br
- ♣ Bolsista de Doutorado, CNPq

Resumo

Nos últimos anos, uma das principais linhas de pesquisa na área Automotiva tem-se concentrado na redução de emissões de poluentes gerados por motores de combustão interna. Nesse contexto, o uso de combustíveis alternativos e o gerenciamento eletrônico tem ganhado destaque. Várias propostas se baseiam no uso de mistura estequiométrica com a presença de catalisador para reduzir as emissões de Óxidos de Nitrogênio. Porém a eficiência de conversão do catalisador é altamente dependente da relação ar/combustível e a mistura deve ser mantida dentro de 1% de desvio em relação ao valor de estequiométrico. Isso acarreta um complexo problema de controle dadas as não linearidades envolvidas e a vasta região de operação do motor. Este artigo trata do controle da razão ar/combustível em torno do valor estequiométrico para um motor de combustão interna movido a gás natural, onde se utilizam abordagens *Gain Scheduling* e a técnica dos Múltiplos Modelos que permite a divisão do domínio não linear em regiões onde modelos linearizados possam ser utilizados. Essas duas estratégias tem como base Controladores Preditivos Generalizados (GPC) que utilizam injeção de gás e ângulo de ignição como variáveis de controle. As duas abordagens são simuladas em computador e seus resultados comparados.

Palavras-chave: Motores de Combustão Interna, GPC, Múltiplos Modelos, *Gain Scheduling*

1. INTRODUÇÃO

Um dos principais fatores que contribuíram para melhoria da qualidade dos motores de combustão interna (MCIs) foi o estabelecimento de leis restritivas sobre emissões de poluentes. Uma vez que MCIs são máquinas de dinâmica muito complexa, as pesquisas sobre reduções de emissões tem se espalhado sobre as mais diferentes áreas, como estudo de

catalisadores, novos materiais e propagação de chamas. Alguns avanços significativos, no entanto, devem-se à introdução do gerenciamento eletrônico e controle do motor. O uso intensivo de eletrônica embarcada permite menor consumo de combustível e menor emissão de poluentes, além de estender a vida útil do motor. Devido aos avanços nessa área, os novos veículos leves (carros de passeio) que fazem uso de sistemas eletrônicos supostamente deverão conseguir atender as leis sobre emissões nos próximos anos, visto que seu modo de operação pode ser aproximado pelo de regime permanente. Contudo não existem tecnologias disponíveis, a curto prazo, para os veículos de carga (caminhões e ônibus), os quais possuem como ciclo predominante o regime transitório já que há constantes trocas de marcha, acelerações e desacelerações.

Os problemas estão relacionados ao combustível empregado e ao ciclo de operação que o veículo deve atender. Em geral, ônibus são equipados com motores Diesel e o óleo Diesel é responsável por grande quantidade de partículas, 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) e caminhões é considerada um problema grave a tal ponto que uma recente lei de transporte público impõe que os ônibus rodem com gás natural visando reduzir poluição da cidade em alguns anos.

Como parte de um projeto que visa tornar possível o uso de gás natural em ônibus urbanos, o IPT tem pesquisado a influência de diferentes composições de gás natural no desempenho de motores, o projeto de novas câmaras de combustão e o estudo de sistemas de controle de ignição e injeção de gás natural sob condições transitórias.

Este trabalho refere-se ao último tópico e descreve o projeto de um ambiente de simulação para testar diferentes componentes e estratégias de controle. O enfoque é dado sobre os resultados simulados para um motor Diesel típico convertido para uso de gás natural e ignição por centelha e controlado por duas diferentes estratégias de Controle Preditivo Generalizado (GPC). Uma parte considerável dos esforços foi dirigido ao desenvolvimento de uma bancada completa de simulação de testes em motores, injeção de combustível e sistemas de ignição, controladores, sensores, atuadores e dispositivos especiais como turbocompressores e testes em dinamômetros, representado aqui sob a forma da Figura 1.

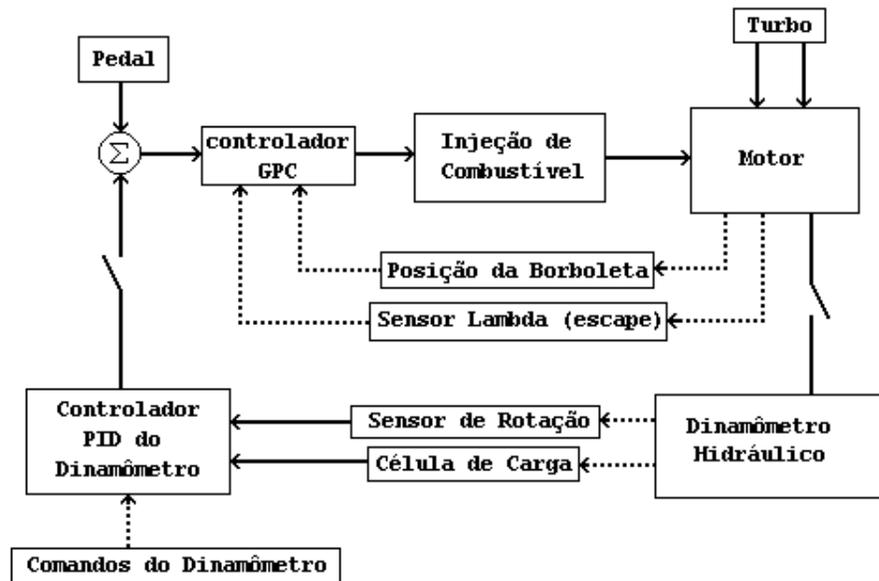


Figura 1. Diagrama do Simulador

O simulador está ainda em fase de finalização. Entretanto, a simulação dos módulos interconectados possibilitou o entendimento das complexas características do tema, como por exemplo, motor rodando sob um controlador GPC (Lopes, 1996), a dinâmica conjunta de um motor acoplado a um dinamômetro hidráulico (Fleury et al., 1997) e o uso de estratégia de Múltiplos Modelos com GPC para controle de um motor em operações transitórias (Fleury et al., 1999a e 1999b).

2. MODELO DO MOTOR

Três módulos principais são necessários para descrever a dinâmica de um motor de combustão interna com boa precisão: dinâmica do coletor de admissão, dinâmica de combustão e dinâmica rotacional incluindo torques de inércias. O diagrama de simulação completo é mostrado na Figura 2. Uma descrição mais detalhada de cada módulo pode ser encontrada em Lopes & Fleury (1995).

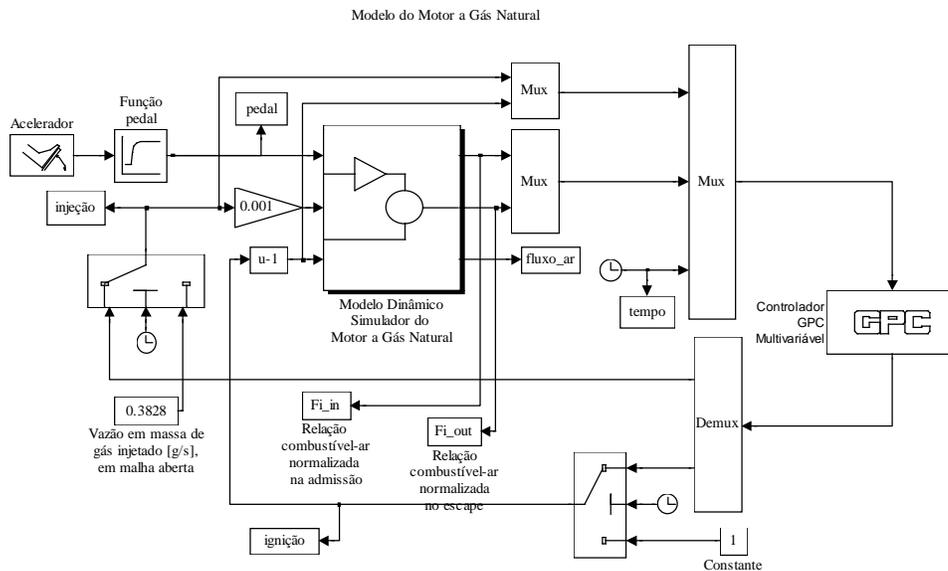


Figura 2. Modelo de Simulação do Motor: Esquema de Simulação Completo

3. INJEÇÃO DE GÁS E SISTEMAS DE IGNIÇÃO

Gás natural é considerado um dos mais importantes combustíveis alternativos da atualidade. Sua queima não gera SO_2 e nem emissão de partículas, além de exibir baixas emissões de CO e HC. Infelizmente, a emissão de NO_x é alta e deve ser controlada de algum modo. O desenvolvimento de motores à gás natural, capazes de satisfazer às severas exigências de emissões segue atualmente por duas vias: uso de mistura estequiométrica com catalisador de 3-vias; ou uso de mistura pobre com a presença de turbocompressor e intercoolers. Na maioria dos casos, a conversão de ciclo Diesel para Otto ocorre mantendo-se o sistema de mistura estequiométrica que reduz as emissões de CO e HC mas requer um catalisador de 3-vias para reduzir NO_x . Porém esta combinação implica em um complexo problema de controle, uma vez que mais de 1% de desvio na relação ar-combustível (em relação ao valor estequiométrico) pode corresponder a 50% de degradação na eficiência de

catalisador (Dan Cho & Oh, 1993). Por essa razão, a implementação de meios eletrônicos nos sistemas de controle de injeção/ignição é imperativa.

4. CONTROLADORES GPC

Controladores GPC (Clarke et al., 1987) são baseados na otimização de um índice de desempenho quadrático que utiliza explicitamente um preditor de saídas futuras até que um horizonte de predição, baseado no sistema real, seja atingido. 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 trabalho, 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 no trabalho de Lopes (1996).

5. ESTRUTURA DE MÚLTIPLOS MODELOS

Modelos lineares para projeto de controle são, em geral, válidos apenas numa estreita região em torno do ponto de operação. Por esta razão, para encontrar bom desempenho sob condições transitórias, o modelo escolhido para o projeto de controle deve mudar de acordo com as diferentes regiões de operação. A sincronização dos modelos pode ser feita por uma estratégia de Múltiplos Modelos, onde a incerteza de cada um dos vários modelos linearizados é comparada e o modelo mais adequado para aquela condição particular é selecionado. A técnica dos Múltiplos Modelos tem sido usada para controle de sistemas não lineares desde os anos 70 com bons resultados (Narendra & Balakrishnam, 1995). O esquema para simulação da estrutura Múltiplos Modelos (MMGPC) é mostrado nas Figuras 3 e 4. Na Figura 4, todos os 17 modelos linearizados estão rodando em computador, 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.

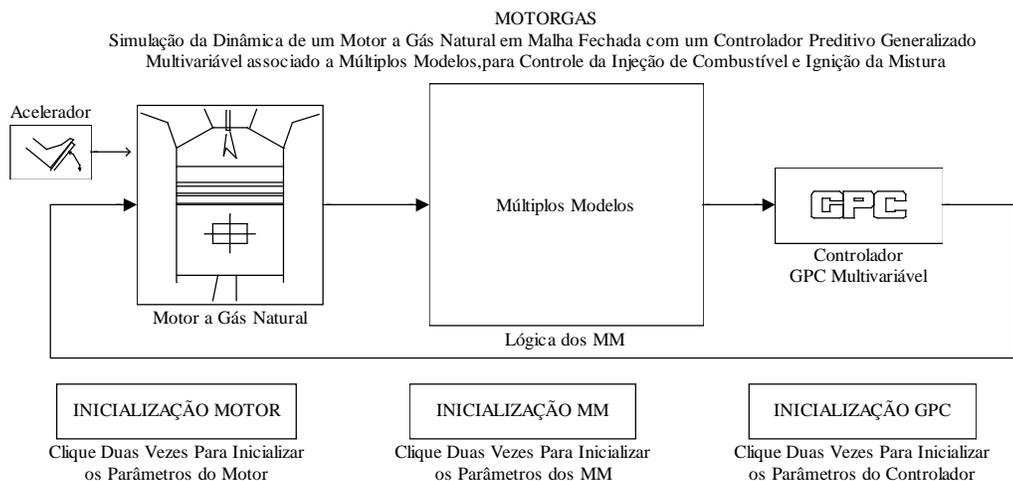


Figura 3. Esquema geral dos Múltiplos Modelos

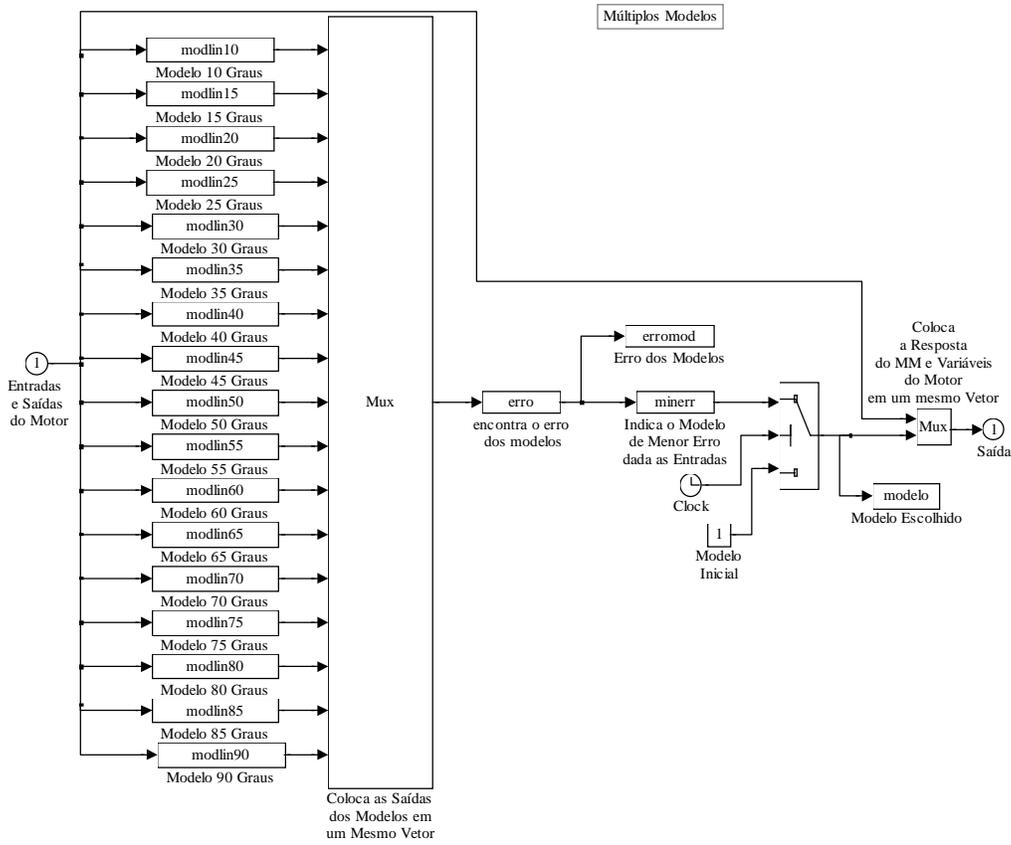


Figura 4. Esquema de Simulação dos Múltiplos Modelos

6. ESTRUTURA GAIN SCHEDULING

Gain Scheduling é também uma técnica de controle de sistemas não lineares conhecida há décadas (Astrom & Wittenmark, 1989). O *Gain Scheduling* original está baseado na identificação de diferentes condições operacionais do sistema dinâmico não linear e no uso de ganhos de controle pré-especificados para cada condição. Aqui, esta estratégia é modificada no sentido de calcular ganhos que são aplicados a 4 modelos linearizados do motor e, além disso, o controlador GPC também é ativado para produzir um controle mais refinado. A idéia dessa estratégia é adicionar ganhos pré-especificados para a malha de controle de modo a evitar grandes excursões da relação de ar-combustível que ocorrem quando o pedal do acelerador sofre mudanças rápidas. A estrutura básica para simulação do *Gain Scheduling* (GSGPC) é mostrada na Figura 5.

MOTORGAS
Simulação da Dinâmica de um Motor a Gás Natural em Malha Fechada com um Controlador
Preditivo Generalizado Multivariável associado a um Esquema de Compensação em Avanço
"Gain Scheduling" para Controle da Injeção de Combustível e Ignição da Mistura

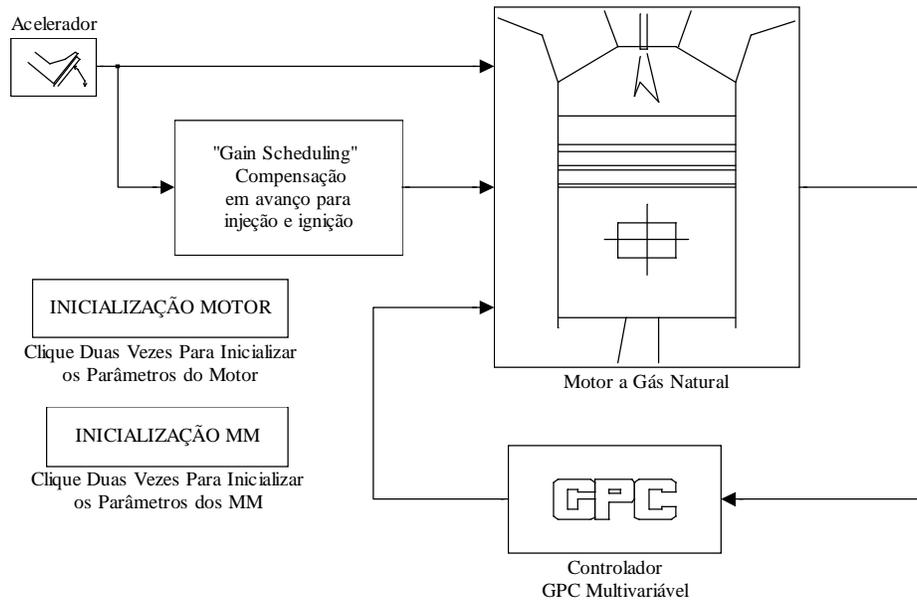


Figura 5. Esquema de Simulação *Gain Scheduling* com GPC

7. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

O modelo não linear do motor descrito na seção 2 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 15° (vazão mínima) para 90° (vazão máxima). Os modelos linearizados são então identificados para cada região (Fleury et al., 1999) e implementados de acordo com a Figura 4. Para o método *Gain Scheduling*, o mapa é dividido em 4 regiões (modelos de: 15°, 25°, 35° e 60°) que, juntamente com uma função de ganhos de injeção e ignição, auxiliam o GPC.

Dois transitórios severos são impostos ao motor no sentido de que são simuladas largas excursões do pedal por regiões onde o motor exibe forte comportamento não linear. As não linearidades do sistema são mais pronunciadas na faixa de 20 a 50 graus de variação angular da válvula borboleta.

A figura 6 mostra os resultados de um transitório de aceleração de 20° para 70°, imposto no instante 1.5s. O intervalo de tempo antes desse instante é usado para estabilizar o simulador em torno de um ponto de equilíbrio. Verifica-se que as duas estratégias conseguem controlar o motor fazendo-o retornar à faixa desejada de $\pm 1\%$ em menos de 0.2 segundos, apesar da situação crítica da mudança de 20° para 70°. O comportamento do MMGPC é superior por causar uma excursão máxima da ordem de 25% contra 40% do GSGPC.

A figura 7 mostra um transiente crítico de desaceleração com o pedal voltando de 50° para 30°. Como no caso anterior, os tempos de acomodação (em torno de 1%) para o MMGPC e para o GSGPC são da ordem de 0.2 segundos e a excursão máxima do MMGPC (5%) foi menor que a do GSGPC (12%).

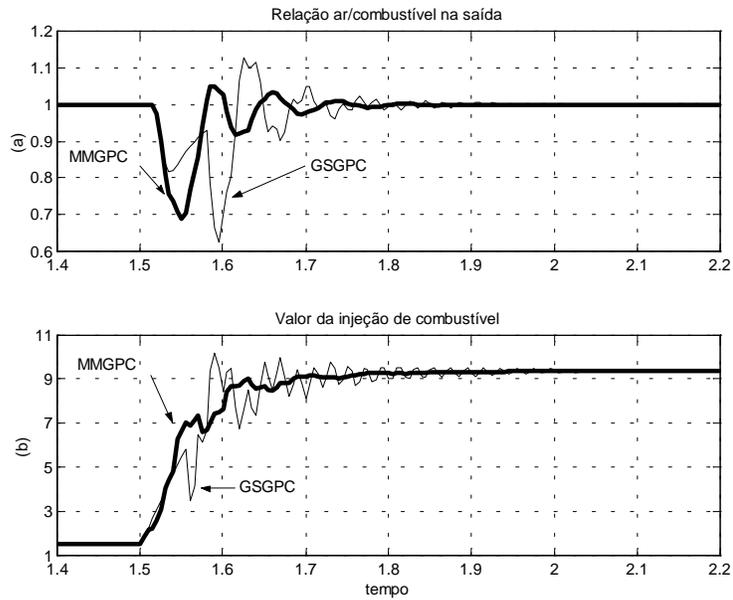


Figura 6. Simulação do transitório de 20 graus para 70 graus
(a) Relação A/C na saída ; (b) Injeção de combustível

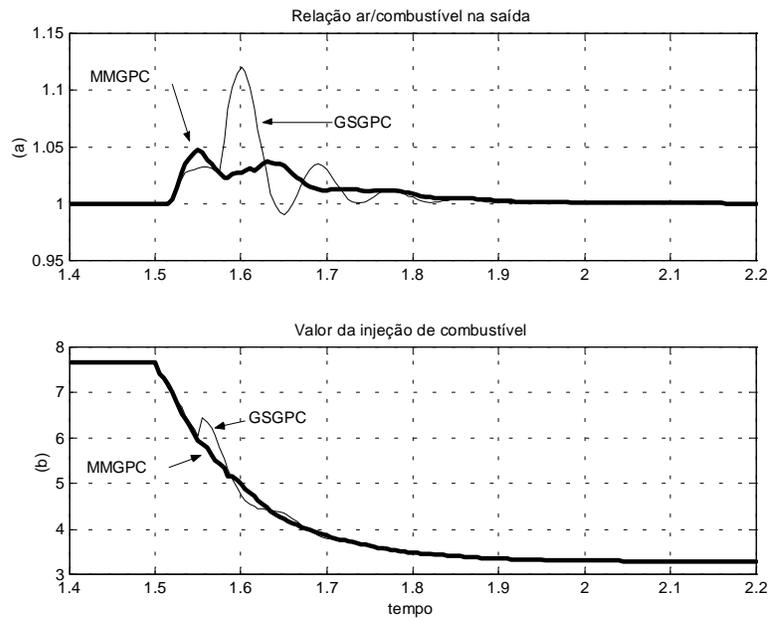


Figura 7. Simulação do transitório de 50 ° para 30 °
(a) Relação A/C na saída ; (b) Injeção de combustível

8. 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. A estratégia dos Múltiplos Modelos acoplada ao GPC mostrou ser uma técnica muito promissora embora sua implementação prática dependa de processadores com alta capacidade de processamento. A estrutura *Gain Scheduling* com GPC necessita ainda maiores investigações embora se verifiquem bons resultados com menor quantidade de processamento, quando comparados ao MMGPC.

Resultados anteriores obtidos pelos autores (Fleury et al., 1999b) comprovam que as estratégias mostradas no presente trabalho fornecem respostas muito boas em transitórios menos severos.

9. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP (Processo: 1993/00566-9) e ao CNPq (Processos: 300469/96-9 e 144269/1998-8) pelo apoio financeiro a parte desta pesquisa.

10. REFERÊNCIAS

- ASTRÖM, K.J. and WITTENMARK, B., 1989, "Adaptive Control", **Addison-Wesley Publishing Co.**
- CHANG, C. F., FEKETE, N. P., AMSTUTZ, A. and POWELL, J. D., 1995, "Air-Fuel Ratio Control in Spark-Ignition Engines using Estimation Theory", **IEEE Trans Contr Syst Techn**, v.3, (1), p.22-31
- CLARKE, D. W., MOHTADI, C. and TUFFS, P. S., 1987, "A Generalized Predictive Control – part I: The Basic Algorithm", **Automática**, v.23, n.2, p.137-148
- DAN CHO, D. and OH, H. K., 1993, "Variable Structure Control Method for Fuel-Injected Systems", **ASME J Dyn Syst Meas Contr**, v.115, p.475-481, September.
- FLEURY, A. T., YOSHINO, F. J. and HAYASHI, F., 1999a, "Natural Gas Internal Combustion Engines Control using Predictive Controllers and Multiple Models", **Applied Mechanics in the Americas**, v. 8, p.1193-1196.
- FLEURY, A. T., FREITAS JR, F. S. and LOPES, J. A., 1999b, "A comparison between Different Generalized Predictive Control Strategies for Air/Fuel Ratio Control in Natural Gas Internal Combustion Engines", **Eurodiname'99 Proceedings of the Dynamic Problems in Mechanics and Mechatronics**, Reimsburg, Germany, p.63-69,
- FLEURY, A. T., LOPES, J. A., MOSCATI, N. M., NIGRO, F. E. B. and TRIELLI, M. A., 1997, "Modelling and Simulation Results for a Natural Gas Internal Combustion Engine Coupled to a Hydraulic Dynamometer", **RBCM/J Braz Soc Mech Sciences**, v. XIX, n.2, p.121-137.
- 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 de Mestrado**, Universidade de São Paulo, 134 ps.
- LOPES, J. A. and FLEURY, A. T., 1995, "A Dynamic Model for Fuel Injection/Ignition Control of Natural Gas Internal Combustion Engines", **Proceedings DINAME 95/VI Symposium on Dynamic Problems in Mechanics**, Caxambu, MG, Brazil, p.57-60, March.
- MOSKWA, J. J., 1993, "Sliding Mode Control of Automotive Engines", **ASME J Dyn Syst Meas Contr**, v.115, p.687-693.
- NARENDRA, K. S. and BALAKRISHNAM, J., 1995, "Adaptive Control using Multiple Models", **IEEE Control Syst Magazine**, p.171-187, Feb.