

FERNANDO JUN YOSHINO
FUMIO HAYASHI

CONTROLE TRANSITÓRIO DE MOTORES A GÁS UTILIZANDO MÚLTIPLOS MODELOS

Tese apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para
obtenção de título de graduado em
Engenharia.

Área de Concentração:
Engenharia de Automação e Sistemas

Orientador: Agenor de Toledo Fleury

São Paulo
1997

AGRADECIMENTOS

Ao Professor e Orientador Dr. Agenor de Toledo Fleury, pelos fundamentos teóricos e pelo incessante estímulo

Ao Engenheiro José Augusto Lopes pelos constantes momentos de explanação e de discussão sobre assuntos de grande relevância

Ao Engenheiro Ney Ricardo Moscati pelos momentos de reflexão e aprofundamento em aspectos de fundamental importância

SUMÁRIO

RESUMO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 3 |
| 2. CASO DE ESTUDO | 4 |
| 3. MODELO DO MOTOR A GÁS NATURAL | 5 |
| 4. CONTROLADOR GPC | 9 |
| 5. PRINCÍPIOS BÁSICOS DA TEORIA DOS MÚLTIPLOS MODELOS..... | 11 |
| 6. IMPLEMENTAÇÃO DOS MÚLTIPLOS MODELOS..... | 13 |
| 6.1. IDENTIFICAÇÃO DOS MODELOS LINEARES..... | 13 |
| 6.2. IMPLEMENTAÇÃO DA ESTRUTURA DOS MÚLTIPLOS MODELOS | 17 |
| 7. RESULTADOS..... | 19 |
| 8. ANÁLISE DOS RESULTADOS | 30 |
| 9. CONCLUSÃO | 31 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 32 |

RESUMO

Este trabalho apresenta uma investigação sobre o problema de controle transitório da relação ar-combustível em motores a gás natural ciclo Otto, operando com mistura estequiométrica. Foi escolhido o Controle Preditivo Generalizado associado a Múltiplos Modelos como estratégia para alcançar o objetivo principal de redução da emissão de gases poluentes, através de um controle preciso da relação ar-combustível em condições transitórias, com desvios máximos de 1%.

Baseado no modelo não-linear e controlador GPC desenvolvido na tese de mestrado de José Augusto Lopes, foi modelado linearmente em várias posições de trabalho a planta não-linear e implementada a estrutura dos múltiplos modelos no programa MATLAB.

Dada esta nova estrutura, associando o controlador GPC, modelo não-linear do motor a gás e estratégia dos múltiplos modelos, simularam-se diversas condições de transitórios, buscando identificar o ganho de desempenho do controlador comparado com a estrutura anterior.

1. Introdução

O IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas) vem desenvolvendo, desde 1994, um projeto temático (FAPESP) que visa a redução de emissões em motores de combustão interna que operam com gás natural. Um dos assuntos abordados trata do desempenho de sistemas eletrônicos de injeção e de ignição para controle de transitórios no motor.

Nos transitórios de aceleração e desaceleração de um motor estequiométrico a gás, desvios na relação ar-combustível afetam fortemente o desempenho do motor com relação a emissões devido à variação na eficiência de conversão do catalisador. Uma alternativa para a solução ótima deste problema é utilizar um controlador GPC como regulador do sistema de injeção e ignição. Nesta estrutura de controlador preditivo, é necessário um modelo linear interno do motor, válido dentro de uma determinada região de operação. Como o motor é um sistema altamente não linear, o modelo interno utilizado deve ser diferente para cada região característica dada a necessidade do comportamento dos valores calculados no modelo serem próximos ao encontrado na relação ar-combustível real.

O trabalho de formatura tem como principal objetivo o controle transitório da relação ar-combustível em motores ciclo Otto a gás, utilizando a estratégia de Múltiplos Modelos. Este método busca o projeto de sistemas adaptativos de controle os quais sejam capazes de melhorar o desempenho do sistema em malha fechada, mesmo este sendo altamente não linear. Os múltiplos modelos são usados para descrever as diversas regiões de operação do motor, onde atua um controlador linear. Chaveando tais modelos é possível se aproximar o comportamento do modelo interno ao do sistema real, permitindo a escolha do controlador mais adequado à situação indicada.

Neste contexto, o projeto tem como pontos básicos o estudo do motor a gás e utilização da estratégia de controle por múltiplos modelos para um caso prático. Sendo assim, podemos definir os principais tópicos a serem abordados no trabalho de formatura:

- Estudo do modelo do motor a gás;
- Estudo do controlador GPC utilizado no problema;
- Princípios básicos da teoria de múltiplos modelos;
- Identificação dos modelos lineares;
- Implementação dos múltiplos modelos para o caso de estudo;
- Resultados obtidos na implementação de múltiplos modelos.

Os três primeiros tópicos foram implementados na primeira etapa do trabalho, referente ao primeiro semestre do ano, sendo a seguir complementados pelos demais itens na segunda etapa do projeto.

2. Caso de estudo

Controle Transitório de Motores a Gás utilizando Múltiplos Modelos

Tratando-se de motores médios e pesados, utilizados principalmente em caminhões e ônibus, temos como principal combustível o diesel. Tal combustível, entretanto, possui sérios problemas no que se refere a emissões de materiais particulados, enxofre e NOx, devido a substâncias componentes do diesel e características da ignição por compressão. Uma das alternativas para este problema é o uso do gás natural com ignição por centelha. Neste caso, os valores de emissões de particulados e compostos de enxofre são desprezíveis, tornando-o uma das principais alternativas para a conformidade dos veículos aos níveis de emissões que serão exigidos pela legislação brasileira dentro dos próximos anos.

Atualmente, os motores a gás natural existentes no Brasil são resultados de adaptações realizadas em motores diesel com sistemas de controle de injeção e ignição puramente mecânicos. Visando uma otimização da quantidade de gases emitidas e adequação à tecnologia existente, é necessário a implementação de sistemas de controle eletrônico na injeção e ignição dos motores a gás natural. A solução para o caso em regime permanente é bem resolvida através da adoção de mapas das curvas de injeção, onde são relacionadas as grandezas lidas nos sensores com as grandezas envolvidas na atuação. Porém, no caso dos ônibus, é notório o predomínio do regime transitório dada a necessidade de várias acelerações e desacelerações nas paradas realizadas nos pontos de ônibus. Neste caso a solução não é tão simples, não havendo uma solução considerada como definitiva como no caso do regime permanente.

A solução adotada pelo grupo de estudo do IPT foi a utilização do GPC (Controle Preditivo Generalizado) dadas as características de adaptabilidade e predição deste tipo de controle. Tais características são necessárias dada a incerteza envolvida no modelamento do motor, cujo funcionamento pode ser alterado por variáveis inerentes ao sistema, como desgaste de peças, e o problema de se ter um transitório como referência, exigindo que a ação de controle considere o instante futuro na sua atuação.

Esta solução, entretanto, exige um modelo interno da planta para a solução da lógica de atuação, como pode ser visto nos itens posteriores. Considerando como rotação média do motor um valor em torno de 1000 rpm, teremos no máximo décimos de segundos para a decisão da atuação no controlador. Isto torna inviável a adoção de um modelo não-linear como modelo interno do controlador. Apenas um modelo linear, onde o tempo de processamento da variável entrada-saída é quase instantâneo, poderá atender tal tempo de processamento. Porém, a utilização de um simples modelo linear não é capaz de armazenar todas as características necessárias da planta para uma larga faixa de trabalho das variáveis envolvidas. Desse modo, temos na utilização dos múltiplos modelos a solução necessária para a complementação da implementação do GPC, possibilitando um modelamento que agregue rapidez nas respostas e possibilidade de estudo de casos em várias condições de trabalho.

3. Modelo do motor a gás natural

Apesar de ser a principal variável a ser controlada no nosso problema, a quantidade de gases poluentes não pode ser medida em tempo real para a realimentação de controle do motor. Como procedimento geral, são utilizadas variáveis indiretas para se chegar a uma estimativa dos valores da concentração de gases poluentes. No nosso caso específico, foram utilizadas curvas típicas de emissões em função da relação ar-combustível e do avanço do ponto de ignição, baseados em dados empíricos obtidos em regime permanente.

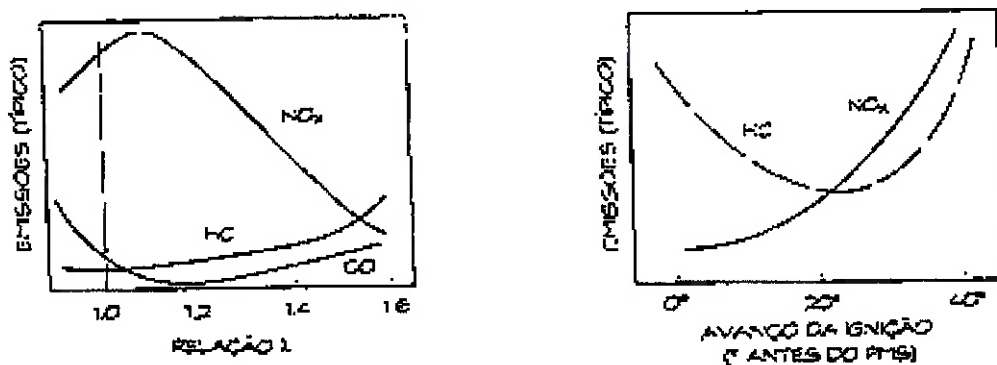


figura 1: Valores de emissões em função de λ e avanço de ignição

A relação λ do gráfico acima é a relação ar-combustível normalizada em comparação ao valor estequiométrico. Desse modo, para $\lambda=1$ temos uma relação estequiométrica, para $\lambda>1$ temos uma mistura com excesso de ar, ou mistura pobre, e para $\lambda<1$ temos uma mistura rica, com excesso de combustível.

A principal região de trabalho que se pode visualizar na figura é em torno do ponto de operação $\lambda=1.4$. Entretanto, para operação em tal região é necessário a utilização de equipamentos que aumentem a potência do motor, tais como turbocompressores e intercooler. Uma das alternativas à utilização de tais equipamentos, que acarretariam consideráveis aumentos nos custos, é a operação utilizando catalisadores de três vias em torno de $\lambda=1$, como pode ser visualizado abaixo:

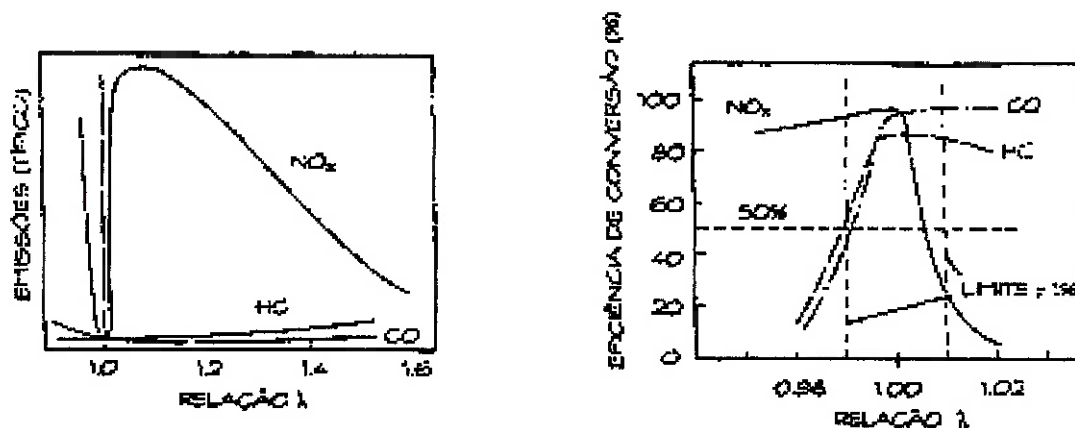


figura 2: Valores de emissões em função de λ e avanço de ignição para catalisador

Como pode ser visto na figura acima, existe a necessidade de um controle rápido e preciso dada a pequena faixa possível da variação de λ . Desvios em torno de 1% acarretam drástica queda no desempenho do catalisador, sendo considerado como especificação do projeto do controlador o funcionamento dentro desta faixa de valores para desempenho razoável do sistema no que se refere a emissões.

O funcionamento simplificado do motor e da sua unidade de controle pode ser descrito da seguinte maneira: a entrada do gás e do ar ocorre ao nível da borboleta, onde existe uma seção divergente-convergente responsável pela pré-homogenização da mistura. A relação ar-combustível é controlada por uma válvula de pressão que regula a quantidade de gás natural que entra no sistema. Após a mistura, temos a válvula borboleta, a qual representa uma perda de carga no escoamento regulando a quantidade da mistura que chega aos cilindros. Após passar pelo coletor de admissão e pela válvula de admissão, temos finalmente a combustão no cilindro e consequente geração do torque e rotação exigidos pelo veículo. Após sair pela válvula de escape e pelo coletor de exaustão, os gases resultantes da combustão passam por uma válvula lambda, onde é estimado a relação ar-combustível presente na câmara de combustão. Tal valor é repassado para a unidade de controle para que se possa realizar a atuação do controle. A atuação é realizada através da válvula de controle que regula a pressão de gás que entra no sistema. No final do processo, os gases resultantes da combustão passam pelo catalisador, para então serem expelidos para o meio ambiente.

Modelo do Motor a Gás Natural

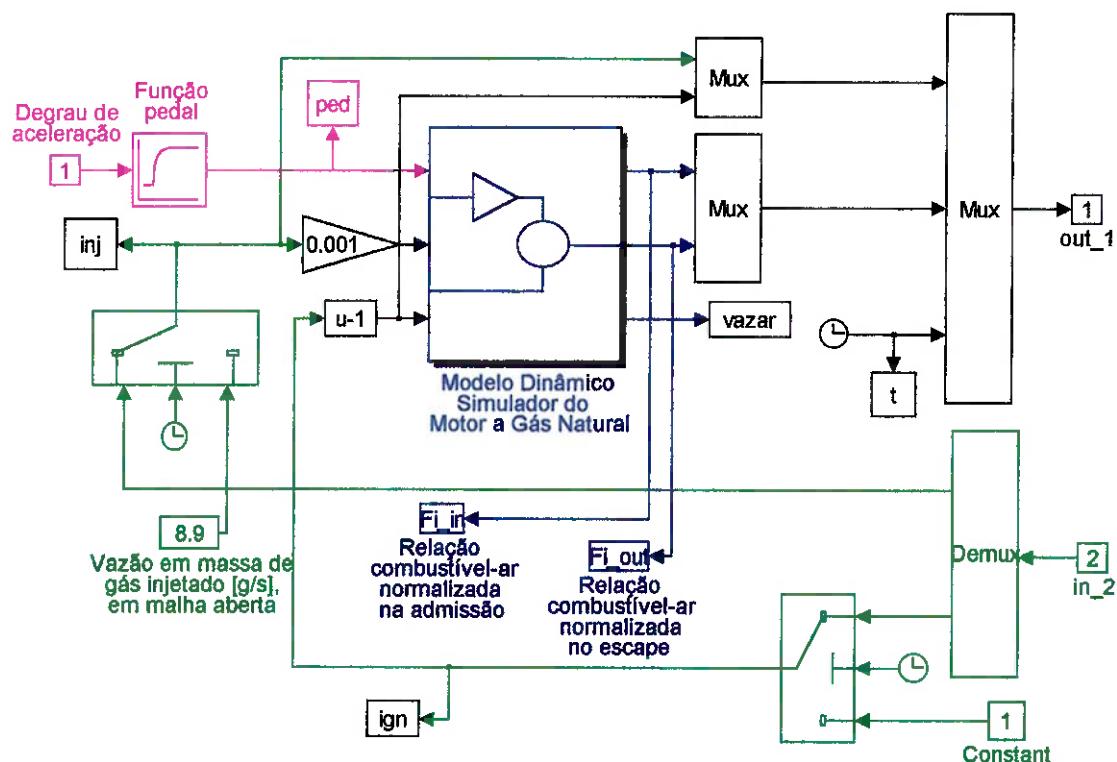


figura 3: Modelo do motor a gás implementado no programa Matlab

Desmembramento do Modelo do Motor a Gás Natural

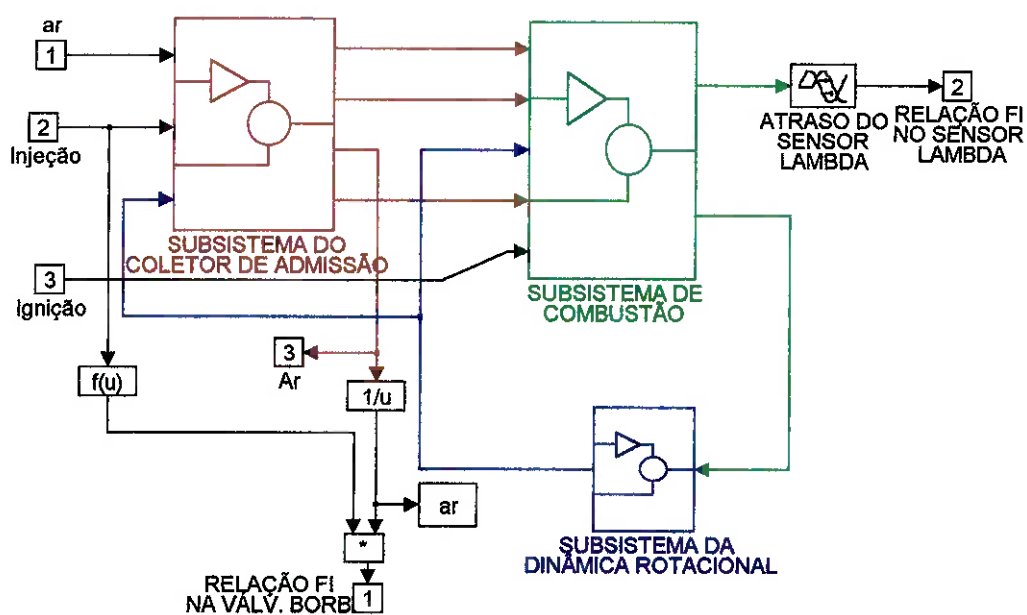


figura 4: Desmembramento do modelo do motor implementado no programa Matlab

O modelo do motor segue o processo descrito acima, subdividindo-se em três módulos:

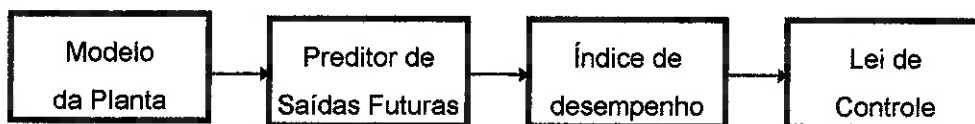
- Subsistema do coletor de admissão, onde é descrito a dinâmica do ar e combustível no coletor. Nesta etapa temos o escoamento passando pela válvula borboleta, pelo coletor de ar propriamente dito e pela válvula de admissão.
- Subsistema de combustão, basicamente um modelo de geração de torque a partir da vazão da mistura na câmara de combustão e da superfície de ignição estaticamente otimizada. Neste ponto temos a principal não-linearidade do modelo de estudo representada pela superfície de eficiência indicada e superfície de ignição utilizadas no modelo.
- Subsistema da dinâmica rotacional, que considera carga, atrito e inércia total sobre o eixo para determinar sua velocidade angular.

Todos os elementos constituintes deste modelo estão implementados computacionalmente através do programa MATLAB, possibilitando a simulação do funcionamento e visualização das principais variáveis envolvidas no processo de combustão do motor. É importante salientar que tanto o modelo do motor como o controlador GPC utilizados foram obtidos e implementados na tese de mestrado de José Augusto Lopes, havendo nesta etapa apenas o estudo destas implementações visando a utilização da teoria de múltiplos modelos em complemento ao desenvolvimento deste trabalho.

4. Controlador GPC

Dada a necessidade de um controle que atenda as especificações do caso de estudo, rapidez de resposta e variáveis da planta com comportamento dentro de uma faixa estreita de trabalho, mesmo quando submetido a transitórios, o Controlador Preditivo Generalizado ou GPC mostra-se como uma das principais soluções para o problema.

Um bom exemplo que esclarece o papel do controle preditivo é: 'ao se dirigir um carro numa estrada, e tendo-se uma curva à frente, a ação de controle do motorista sobre o volante não se baseia apenas na observação do que se encontra anteriormente à posição do carro (observável através do espelho retrovisor), mas também na observação da curva propriamente dita, que está à frente e cujo conhecimento prévio auxilia na antecipação da ação de controle'. Desse modo, controladores preditivos são mais eficientes no controle de variáveis em transitórios ou com variação considerável durante regime permanente, já que adequam a ação de controle realizada no instante atual com as possíveis flutuações que possam ocorrer no sistema.



O funcionamento do GPC pode ser descrito pelo esquema acima. A partir de um modelo da planta é construído um preditor ótimo através de manipulações algébricas. Tal preditor é utilizado para considerar as saídas futuras no índice de desempenho, o qual é otimizado para se chegar à decisão de controle mais adequada para o ponto de operação em estudo.

No caso de estudo, o modelo da planta utilizado internamente pelo controlador é uma estrutura linear parametrizada discretamente como pode ser visto abaixo:

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

com:

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2} + \dots + a_{nA} q^{-nA} \quad (2)$$

$$B(q^{-1}) = b_0 + b_1 q^{-1} + b_2 q^{-2} + \dots + b_{nB} q^{-nB} \quad (3)$$

$$C(q^{-1}) = 1 + c_1 q^{-1} + c_2 q^{-2} + \dots + c_{nC} q^{-nC} \quad (4)$$

Onde cada termo da equação 1 representa:

$A(q^{-1})$, $B(q^{-1})$ e $C(q^{-1})$ são parâmetros do modelo;

q é o operador atraso;

Δ é o operador diferença;

$y(t)$ e $u(t)$ são as saídas e entradas no instante t ;

$\xi(t)$ é um ruído branco, ou seja, ruído que possui várias escalas de frequência.

Os parâmetros do modelo, ou seja, $A(q^{-1})$, $B(q^{-1})$ e $C(q^{-1})$ são obtidos a partir de valores das entradas e saídas gerados na simulação do modelo não-linear em malha aberta.

O desenvolvimento algébrico detalhado do preditor, índice de desempenho e lei de controle pode ser encontrado na tese de mestrado de José Augusto Lopes, atendo-se o escopo deste item aos requisitos dos modelos internos do controlador necessários à predição, dada sua estreita relação com a implementação dos múltiplos modelos.

MOTORGAS
*Simulação da Dinâmica de um Motor a Gás Natural
 em Malha Fechada com um Controlador Preditivo Generalizado Multivariável,
 para Controle da Injeção de Combustível e Ignição da Mistura*

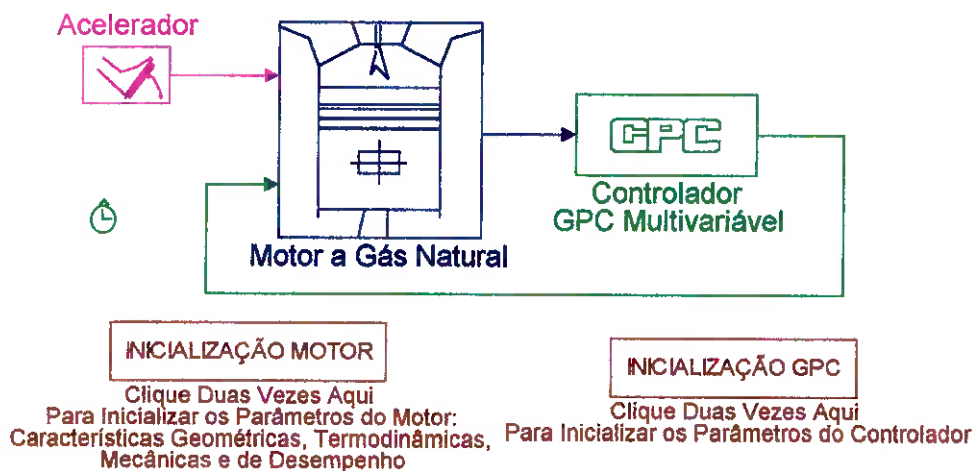


figura 5: Esquema do conjunto motor e controlador GPC implementado no programa Matlab

Na figura acima podemos visualizar a estrutura motor - controlador GPC implementado no programa Matlab. As variáveis de entrada do motor são o ângulo da válvula borboleta, o qual regula a quantidade da mistura ar-combustível que chega nos cilindros para combustão funcionando como o acelerador no caso real, quantidade de gás natural injetado e variação em relação ao mapa de ignição do motor. As duas últimas variáveis são as utilizadas pelo GPC na sua ação de controle, sendo o ângulo da borboleta responsável pela variação do comportamento da planta e onde será aplicado o transitório a ser estudado nos itens seguintes. As variáveis repassadas para o controlador pelo motor, além do ângulo da borboleta e variação em relação ao mapa de ignição, são a relação ar-combustível sobre a relação ar-combustível estequiométrica na válvula borboleta e no sensor lambda, o qual representam as variáveis a serem monitoradas para a ação de controle. Sendo assim, o modelo interno utilizado pelo controlador é um modelo linear MIMO (múltiplas entradas e múltiplas saídas, no caso, duas entradas e duas saídas) com estrutura linear parametrizada discretamente, definindo por completo os requisitos do controlador para seu modelo interno.

5. Princípios básicos da teoria dos Múltiplos Modelos

O uso de múltiplos modelos não é novo na teoria de controle. Na verdade, múltiplos filtros de Kalman foram propostos em 1970 por Lainiotis e Athans, no caso específico do controle de um avião F8, visando melhorar a acuracidade na estimação de resultados em problemas de controle. Muitas aplicações práticas apareceram nas décadas seguintes: controle de pressão arterial e funções cardíacas (Kaufman e Roy Rob, 1992), controle de falha em sensores lambda URV (Maybeck e Lane, 1994), controle de tráfego aéreo (Bar Shalom e Rang LI, 1993) e controle do braço de um robô manipulador (Narendra, Balakrishnan e Ciliz, 1993) podem ser citadas como exemplos.

As características da relação entrada-saída de um sistema podem mudar dependendo das condições de trabalho de uma planta real. Falhas no sistema, como problemas nos sensores e atuadores, distúrbios externos e variações de parâmetros da planta podem ser consideradas como condições de trabalho diferentes. Desse modo, se apenas um modelo de identificação é utilizado, este terá que se adaptar às novas condições antes que a apropriada ação de controle seja tomada. Em sistemas não-lineares, tal adaptação é possível, mas a lentidão deste processo resulta em grandes erros transitórios. Em sistemas lineares, um simples modelo não é adequado para identificar as mudanças no sistema. Desse modo, os múltiplos modelos são necessários tanto para identificar as diversas condições de trabalho, como também para um controle rápido e suficiente. Ambas características são primordiais no controle do motor dada a incerteza envolvida no seu modelamento e altas velocidades exigidas no processamento da lógica de controle.

Na definição dos vários modelos que irão caracterizar o sistema, a primeira etapa é a definição do domínio do vetor parâmetro da planta a ser considerado no problema. Tal vetor pode assumir infinitos valores, sendo assim é necessário definir regiões onde uma série de vetores parâmetro da planta possam ser representados por um só vetor e desse modo tenhamos caracterizado um único modelo para uma determinada região. Neste contexto temos a definição de um erro e_1 , o qual representará o critério de seleção entre um vetor pertencer ou não a um só conjunto, ou seja, a diferença entre se representar o vetor de parâmetro da planta pelo seu valor real e pelo valor representativo do seu subconjunto. Outro problema a ser resolvido é definir quais os parâmetros da planta definirão o vetor. Dependendo dos parâmetros escolhidos teremos a formação de um domínio diferente para solução, podendo não haver uma representação adequada da planta estudada. No nosso caso, tal processo será realizado no item do trabalho de formatura: Identificação dos modelos lineares.

São possíveis duas alternativas para o processo descrito acima, a primeira é a utilização de modelos adaptativos e outro é o uso de modelos fixos. No primeiro caso é estimado um modelo e através de um processo adaptativo se chega a um modelo que melhor representa os parâmetros da planta considerados. No segundo caso, temos os parâmetros do modelo da planta, regiões de validade e os modelos propriamente dito, definidos off-line, ou seja, na concepção do controlador. Sendo assim, tem-se a vantagem de se gastar pequeno tempo de

processamento na definição do modelo da planta, tornando-a mais viável que a primeira solução no nosso caso dada a necessidade de pequeno tempo de processamento na lógica de controle. A vantagem do primeiro caso é se chegar a modelos mais próximos da realidade já que nem sempre é possível prever todas as possibilidades envolvidas antes do funcionamento da planta. ou seja, não estamos utilizando o melhor modelo e sim aquele que possui menor erro dentre as várias opções.

Definido o domínio vetor dos parâmetros da planta e consequentemente os modelos representativos do sistema real, passamos ao controle propriamente dito. A estrutura de um sistema de controle utilizando múltiplos modelos pode ser visualizada na figura seguinte. Existem N modelos de identificação denotados por $\{\text{MODELO } i\}_{i=1 \text{ to } N}$ com as correspondentes saídas $\{y_i\}_{i=1 \text{ to } N}$. A todo instante, o erro de identificação é calculado $e_i = y_i - y$ e através de uma lógica de chaveamento é determinado qual será o modelo utilizado pelo controlador naquele momento. No caso particular do trabalho de formatura, teremos chaveados os modelos internos lineares utilizados pelo GPC. Esta etapa de desenvolvimento pode ser encontrada no item Implementação da estrutura dos múltiplos modelos.

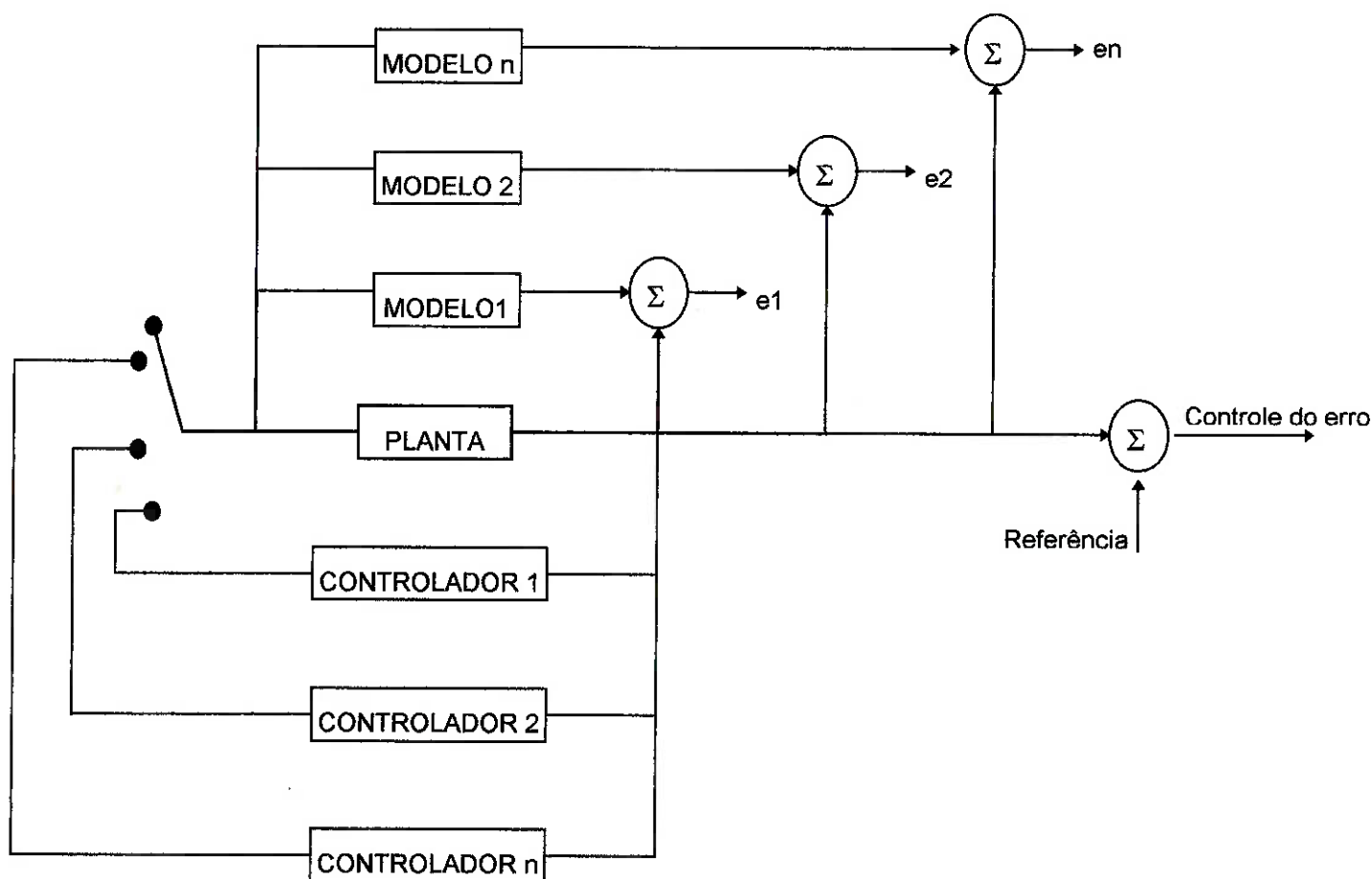


figura 6: Esquema básico de implementação dos múltiplos modelos

6. Implementação dos Múltiplos Modelos

A implementação da teoria dos múltiplos modelos para o caso do motor a gás natural pode ser separada em duas etapas básicas, como descrito no item Princípios básicos da teoria dos múltiplos modelos. Primeiramente temos a definição dos modelos lineares usados no chaveamento e em seguida a montagem da estrutura dos múltiplos modelos como descrito na figura 6. Tais etapas são descritas nos itens abaixo.

6.1. Identificação dos modelos lineares

A identificação dos modelos lineares consiste nas seguintes etapas:

- Simulação do motor em malha aberta configurando as variáveis do motor no ponto de trabalho adequado;
- Configuração dos parâmetros de modelamento;
- Modelamento linear propriamente dito;
- Verificação da validade do modelo linear através de uma simulação em malha fechada com o modelo obtido sendo utilizado internamente pelo controlador GPC;

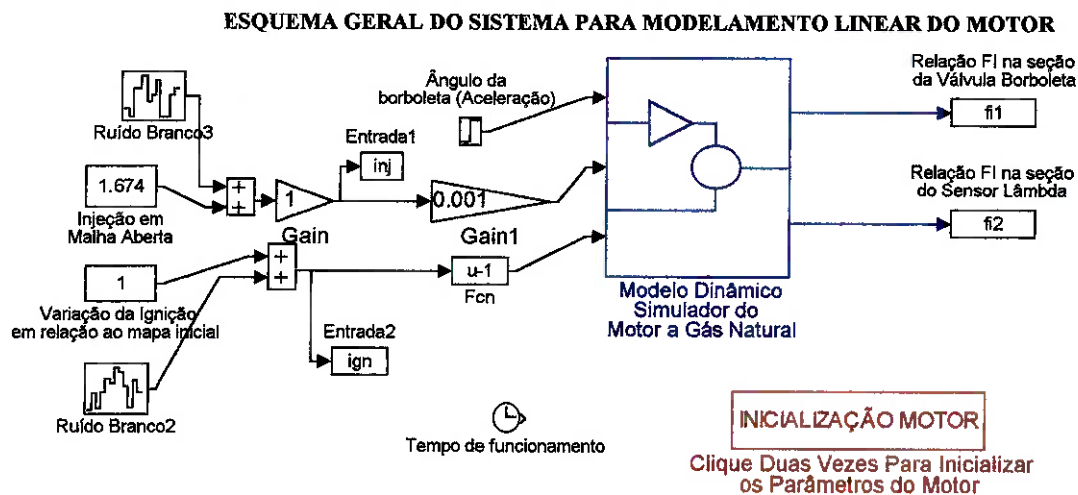
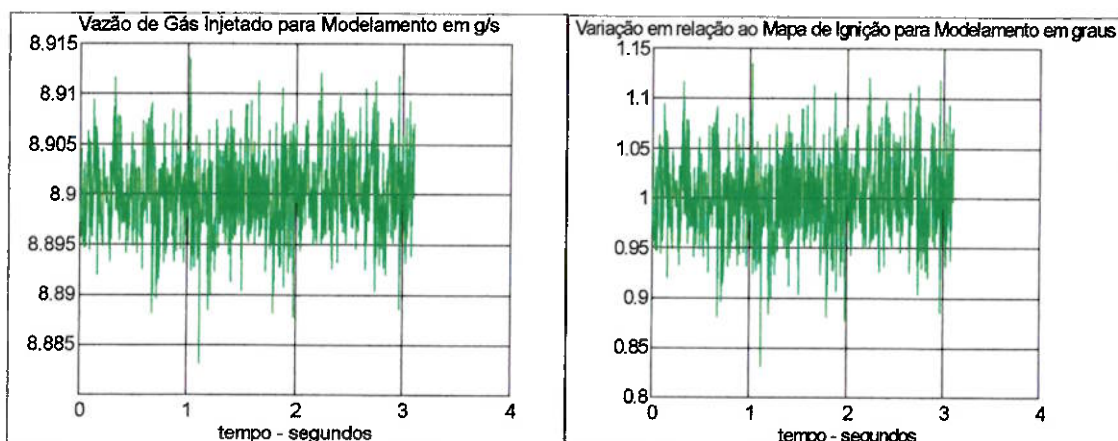


figura 7: Esquema para modelamento linear do motor em malha aberta

Na simulação do motor em malha aberta, as variáveis a serem definidas são ângulo da borboleta, injeção em malha aberta, ruído branco da injeção em malha aberta, variação da ignição em relação ao mapa inicial e ruído branco da variação da ignição. A principal e primeira variável a ser definida é o ângulo da borboleta, o qual caracterizara o ponto de trabalho em que estamos modelando linearmente o motor. A partir da definição do ângulo da borboleta, é encontrado, através de um processo de tentativa e erro da simulação do motor, o valor da injeção de gás natural em malha aberta que resulta em valor unitário na relação ar-combustível sobre a relação ar-combustível estequiométrica no sensor lambda. Ao valor da variação da ignição é sempre atribuído um, dada a menor influência desta variável na relação ar-combustível sobre a relação ar-combustível estequiométrica no sensor lambda e na borboleta comparada com a injeção em malha aberta de gás natural.

A definição dos valores dos ruídos são de extrema importância para o modelamento adequado da planta. Se implementados valores de ruídos muito grandes teremos variáveis chegando a valores fora do domínio planejado para o ponto de trabalho estudado. Caso tenhamos ruídos pequenos não teremos o comportamento da planta representado adequadamente pelo modelo linear já que o domínio de modelamento é menor que o domínio de validade do modelo. Em ambos os casos o resultado é que o controlador, não tendo um modelo adequado para a região de estudo, torna-se instável, invalidando a ação de controle. A verificação se os ruídos estão de acordo com o domínio estudado só é possível testando o controlador com o modelo linear obtido e verificando os resultados. Se o controlador consegue manter as variáveis de saídas dentro dos valores planejados ao mesmo tempo em que é variado o ângulo da borboleta dentro do domínio planejado, temos os ruídos adequados para aquele ponto de trabalho. Caso contrário, os valores dos ruídos não são adequados e é necessário estimar novamente os valores a serem testados. Sendo assim, o processo de obtenção dos modelos lineares é iterativo, variando os valores dos ruídos até que se chegue ao modelo linear válido.

Segue um exemplo das variáveis de entrada e saída do motor utilizadas numa simulação em malha aberta.



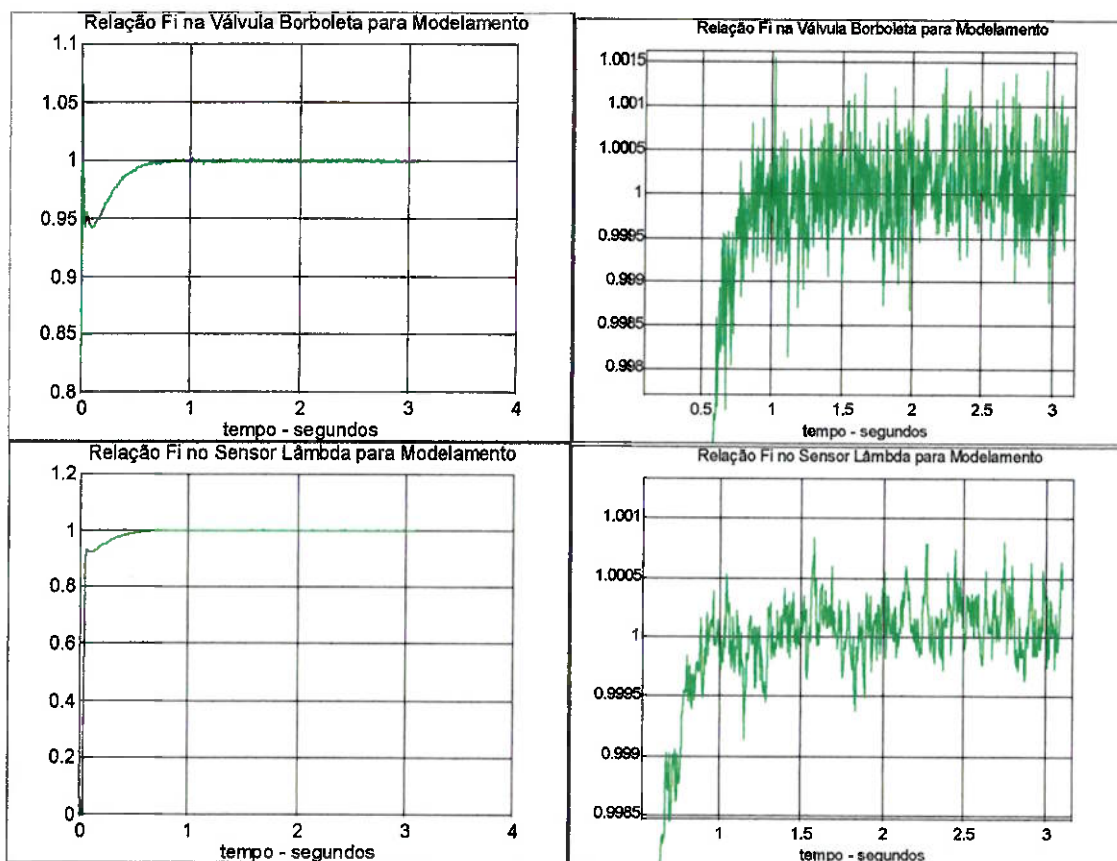


figura 8: Exemplo das variáveis de entrada e saída do motor na simulação em malha aberta

Amostrados os valores das entradas e saídas do motor, são configurados os parâmetros de modelamento. O modelamento linear é realizado através da função PEM, pertencente à biblioteca de funções de identificação presente no programa MATLAB. Os parâmetros requisitados são o comprimento das matrizes $A(q^{-1})$, $B(q^{-1})$ e $C(q^{-1})$, ou seja, na, nb e nc, como pode ser visto nas equações 2, 3 e 4.

Temos então o modelamento propriamente dito através da função PEM. Dependendo dos valores de na, nb e nc, é acusada uma mensagem de erro, avisando que para estes valores o modelamento não funcionará adequadamente, fazendo com que seja necessário o ajuste destes parâmetros para obtenção de resultados coerentes com os dados amostrados.

Definidas as matrizes $A(q^{-1})$, $B(q^{-1})$ e $C(q^{-1})$, a última etapa consiste em testar o modelo linear resultante com o controlador GPC em malha fechada. Se variando o ângulo de borboleta dentro da região de validade os resultados são estáveis, o modelo é válido, caso contrário será necessário um ajuste nos ruídos utilizados na simulação em malha aberta, recomeçando o processo de modelamento desde a primeira etapa.

Os seguintes modelos foram obtidos para o caso de estudo:

Ângulo da borboleta: 30 graus

$$\begin{bmatrix} 1 & -0.1187q^{-1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} y(t) = \begin{bmatrix} 0.8990q^{-1} - 0.6583q^{-2} + 0.4432q^{-3} + 0.0416q^{-4} & -0.0708q^{-1} + 0.0232q^{-2} - 0.0493q^{-3} \\ 0.1722q^{-1} + 0.2187q^{-2} + 0.2450q^{-3} + 0.0016q^{-4} & -0.0188q^{-1} - 0.0229q^{-2} - 0.0264q^{-3} \end{bmatrix} u(t)$$

Ângulo da borboleta: 40 graus

$$\begin{bmatrix} 1 & -0.1024q^{-1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} y(t) = \begin{bmatrix} 0.2220q^{-1} + 0.1209q^{-2} + 0.0239q^{-3} - 0.0161q^{-4} & -0.0388q^{-1} - 0.0131q^{-2} \\ 0.0009q^{-1} + 0.3241q^{-2} + 0.0007q^{-3} - 0.0119q^{-4} & -0.0003q^{-1} - 0.0325q^{-2} \end{bmatrix} u(t)$$

Ângulo da borboleta: 50 graus

$$\begin{bmatrix} 1 & 0.0118q^{-1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} y(t) = \begin{bmatrix} 0.3505q^{-1} - 0.2706q^{-2} + 0.1045q^{-3} + 0.0090q^{-4} & -0.1050q^{-1} + 0.0842q^{-2} - 0.0318q^{-3} \\ -0.0029q^{-1} + 0.1070q^{-2} + 0.0813q^{-3} + 0.0107q^{-4} & 0.0011q^{-1} - 0.0332q^{-2} - 0.0241q^{-3} \end{bmatrix} u(t)$$

Ângulo da borboleta: 60 graus

$$\begin{bmatrix} 1 & -0.0248q^{-1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} y(t) = \begin{bmatrix} 0.1491q^{-1} - 0.2386q^{-2} + 0.2374q^{-3} + 0.0235q^{-4} & -0.0150q^{-1} + 0.0300q^{-2} \\ 0.0346q^{-1} - 0.5016q^{-2} + 0.2323q^{-3} + 0.3837q^{-4} & 0.0205q^{-1} + 0.0781q^{-2} \end{bmatrix} u(t)$$

Ângulo da borboleta: 70 graus

$$\begin{bmatrix} 1 & 0.7718q^{-1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} y(t) = \begin{bmatrix} 0.0103q^{-1} + 0.0081q^{-2} + 0.0037q^{-3} + 0.0045q^{-4} & -0.0072q^{-1} - 0.0005q^{-2} \\ 0.1353q^{-1} + 0.1086q^{-2} - 0.1030q^{-3} - 0.0653q^{-4} & -0.0149q^{-1} - 0.0165q^{-2} \end{bmatrix} u(t)$$

6.2. Implementação da estrutura dos Múltiplos Modelos

A implementação da estratégia dos múltiplos modelos para o caso do motor a gás natural associado a um controlador GPC consiste basicamente no acréscimo de uma estrutura semelhante a encontrada na figura 6 (item 5 - Princípios básicos da teoria dos múltiplos modelos), como pode ser visto nas figuras abaixo.

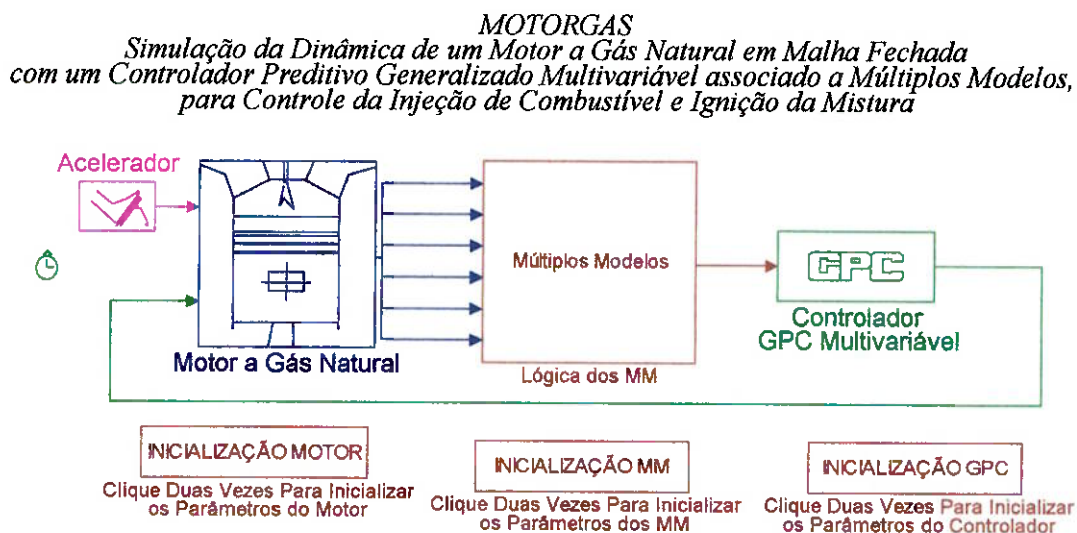


figura 9: Esquema dos múltiplos modelos associado ao GPC no caso do motor a gás

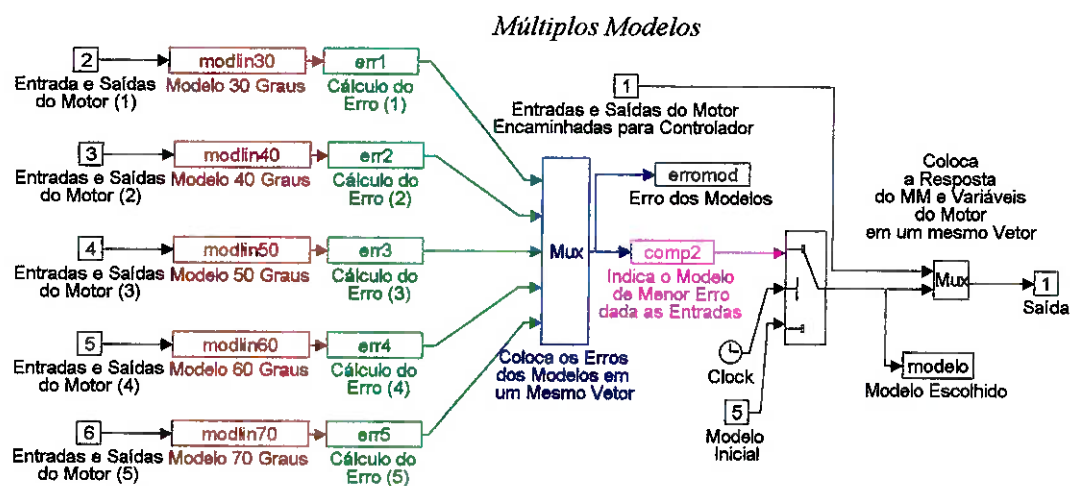


figura 10: Detalhe da estrutura dos múltiplos modelos

As variáveis de entrada dos múltiplos modelos são as mesmas do caso GPC - motor a gás natural, ou seja, variáveis de entrada e saída do motor. Tendo como base os modelos lineares apresentados no item 6.1., são calculados as respostas dos modelos lineares para as entradas do motor. Os valores obtidos são então subtraídos das saídas reais do motor, gerando portanto dois valores de erro para cada modelo, um referente à relação ar-combustível sobre a relação ar-combustível estequiométrica na válvula borboleta e outro no sensor lambda. Estes primeiros cálculos são realizados pelas funções `modlin30`, `modlin40`, `modlin50`, `modlin60` e `modlin70`.

Os erros são então somados pelas funções `err1`, `err2`, `err3`, `err4` e `err5` e agrupados em um mesmo vetor de cinco posições pelo `Mux`. O vetor de erros chega então à função `comp2` onde se verifica qual erro é o menor, repassando como saída o número do modelo que melhor aproxima a planta em estudo. Dada a instabilidade das variáveis quando iniciado o funcionamento do motor, implementou-se uma porta lógica na saída dos múltiplos modelos que só permite o repasse do modelo calculado após determinado período, tendo como resposta o modelo inicial (no caso o modelo 5, ou seja, 70 graus) enquanto se aguarda o período de estabilização do sistema.

Como saída dos múltiplos modelos temos as variáveis de entrada e saída do motor, como encontrado na estrutura anterior sem múltiplos modelos, mais o número do modelo a ser utilizado pelo controlador GPC.

A diferença entre o controlador utilizado na estrutura GPC - motor a gás natural e o utilizado em conjunto com múltiplos modelos, é que neste último é acrescentado uma rotina que reinicializa os parâmetros do controlador de acordo com a mudança do número do modelo indicado pelos estrutura dos múltiplos modelos.

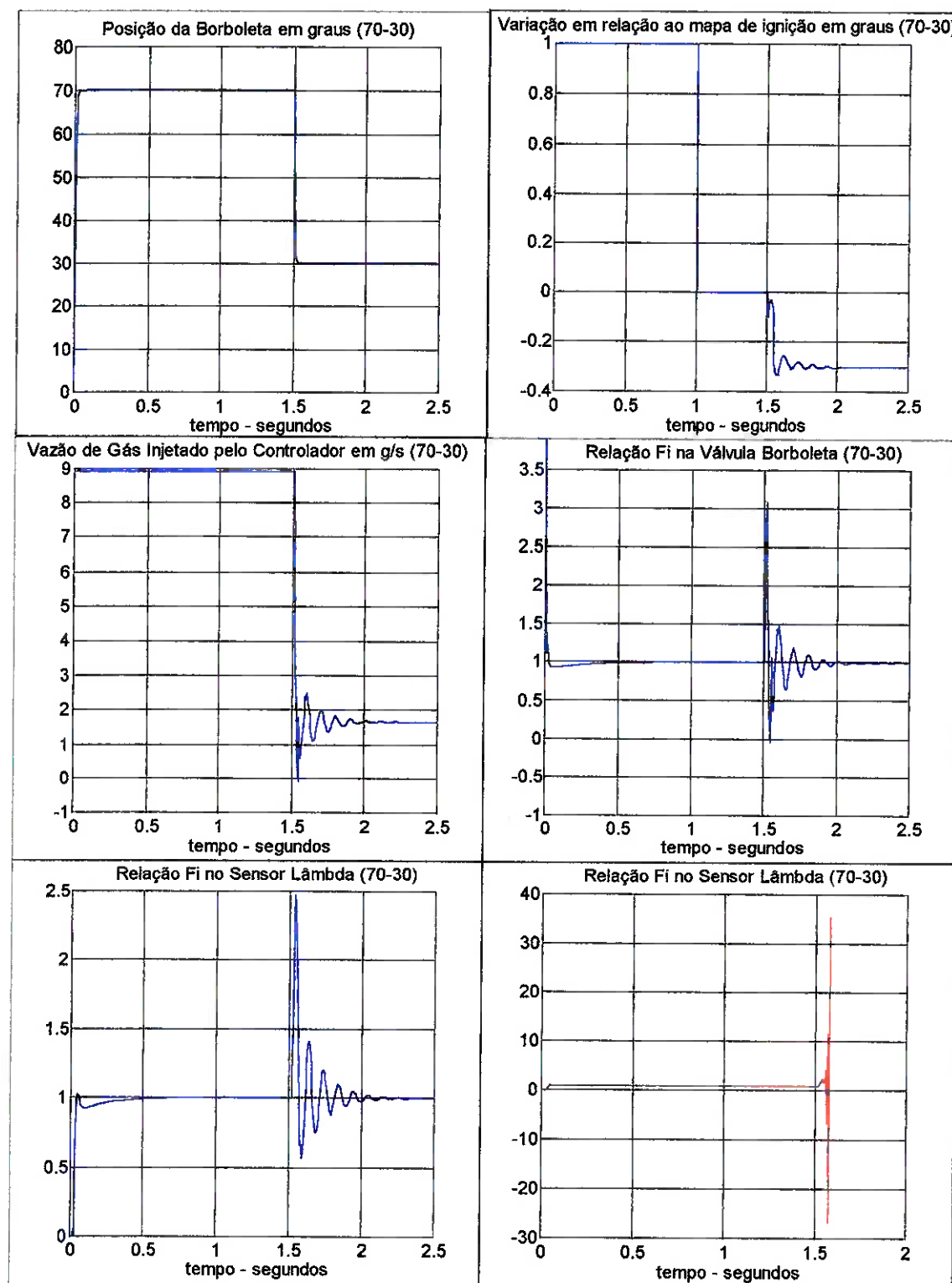
Todas as funções utilizadas nesta etapa do projeto foram implementadas no ambiente do programa MATLAB.

7. Resultados

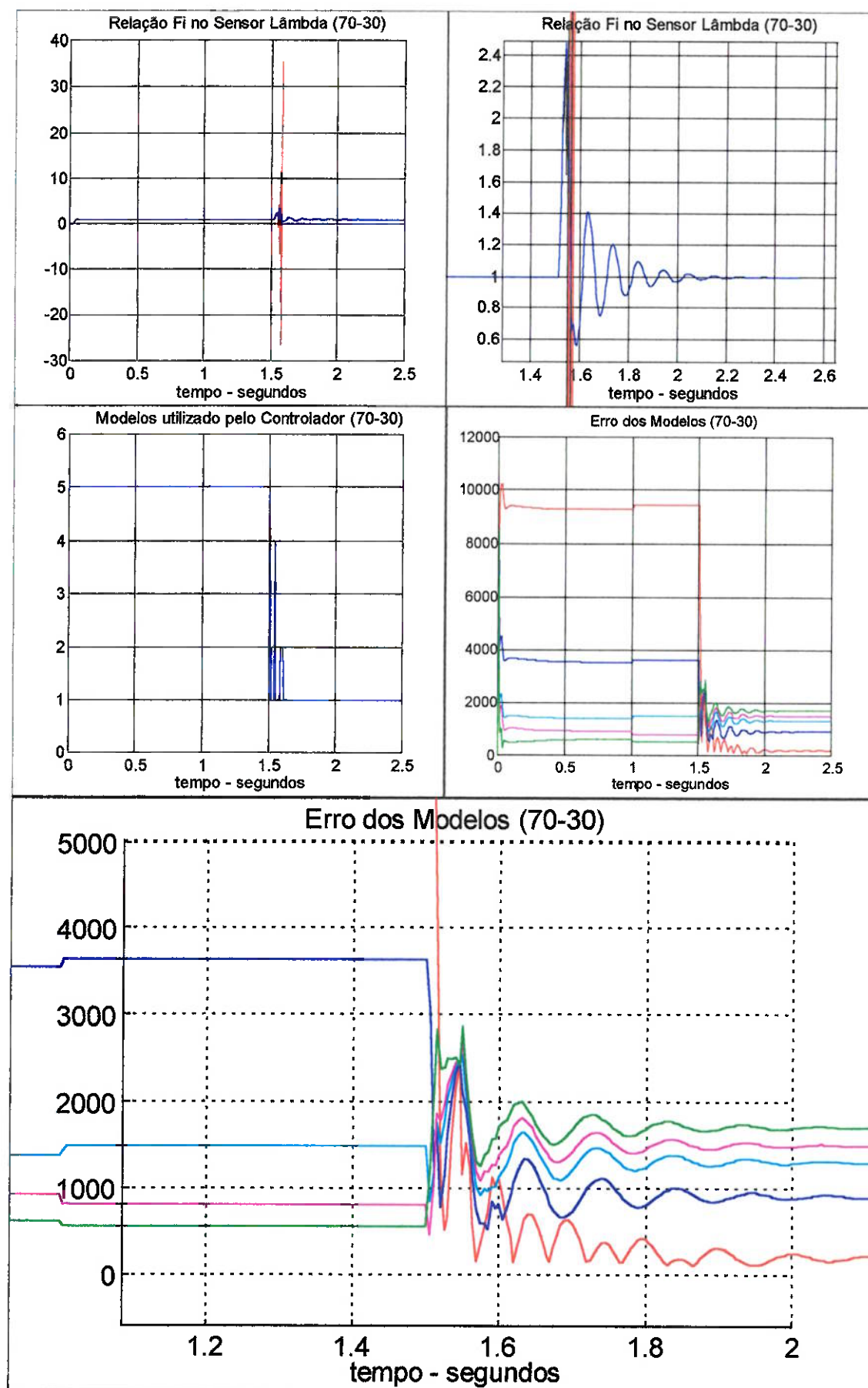
Seguem os resultados das simulações para os seguintes transitórios do ângulo da válvula borboleta: 70 graus para 30 graus, 70 graus para 40 graus, 70 graus para 50 graus, 70 graus para 60 graus e 70 graus para 30 graus associado a um tempo de transição maior que os casos anteriores. Podem ser visualizados na forma de gráficos as variáveis de entrada e saída do motor, modelo indicado pelos estruturas dos múltiplos modelos em cada instante, erros de cada modelo linear no decorrer do tempo, comportamento do ângulo de borboleta e resultado do transitório implementado sem a estrutura dos múltiplos modelos.

Os resultados para o caso sem múltiplos modelos estão em vermelho, enquanto que para o caso com múltiplos modelos é utilizada a cor azul nos gráficos.

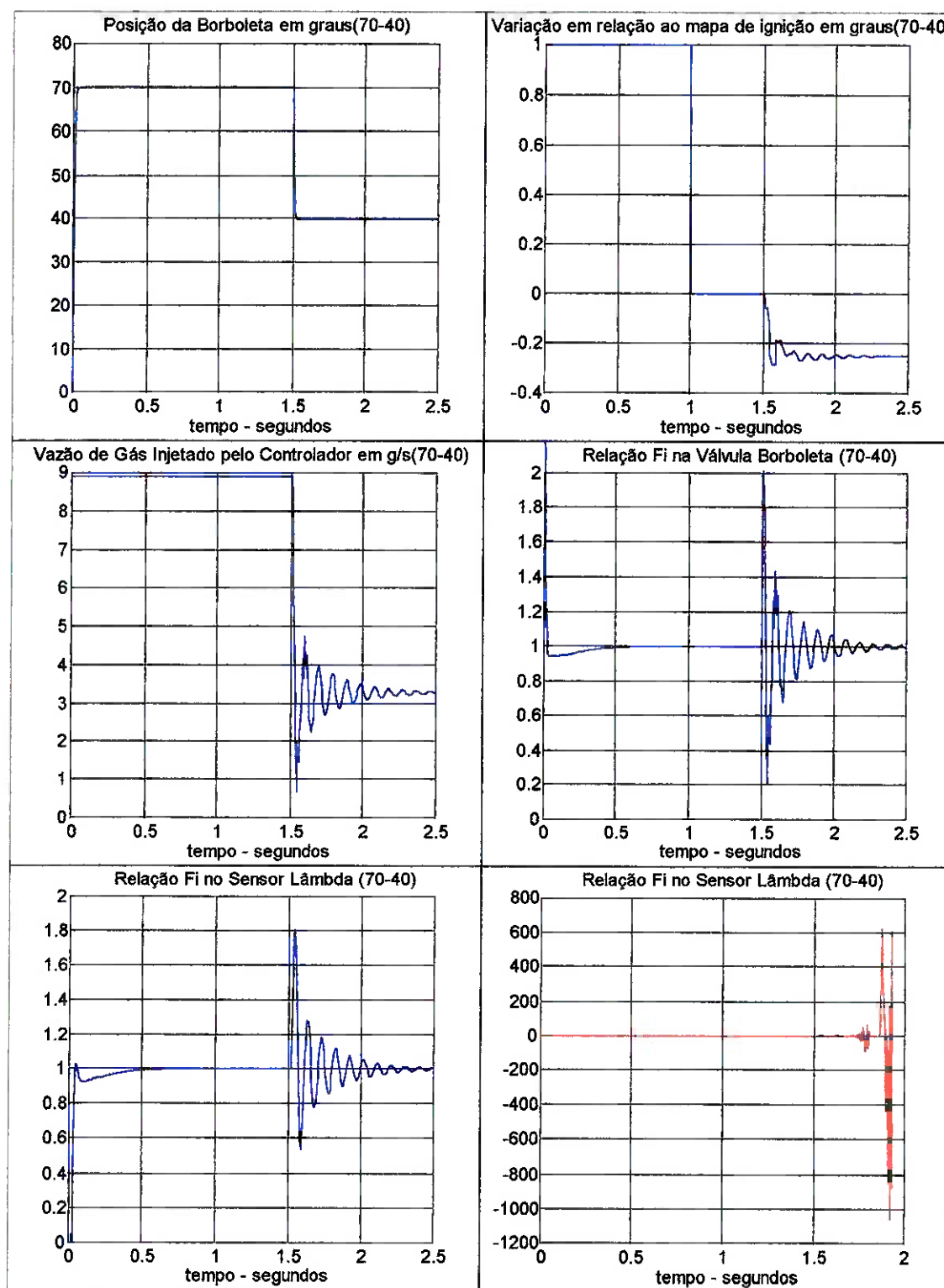
No gráfico dos erros dos modelos lineares, vermelho representa o erro do modelo linear 1 (30 graus), azul representa o erro do modelo linear 2 (40 graus), azul claro representa o erro do modelo linear 3 (50 graus), roxo representa o erro do modelo linear 4 (60 graus) e verde representa o erro do modelo 5 (70 graus).



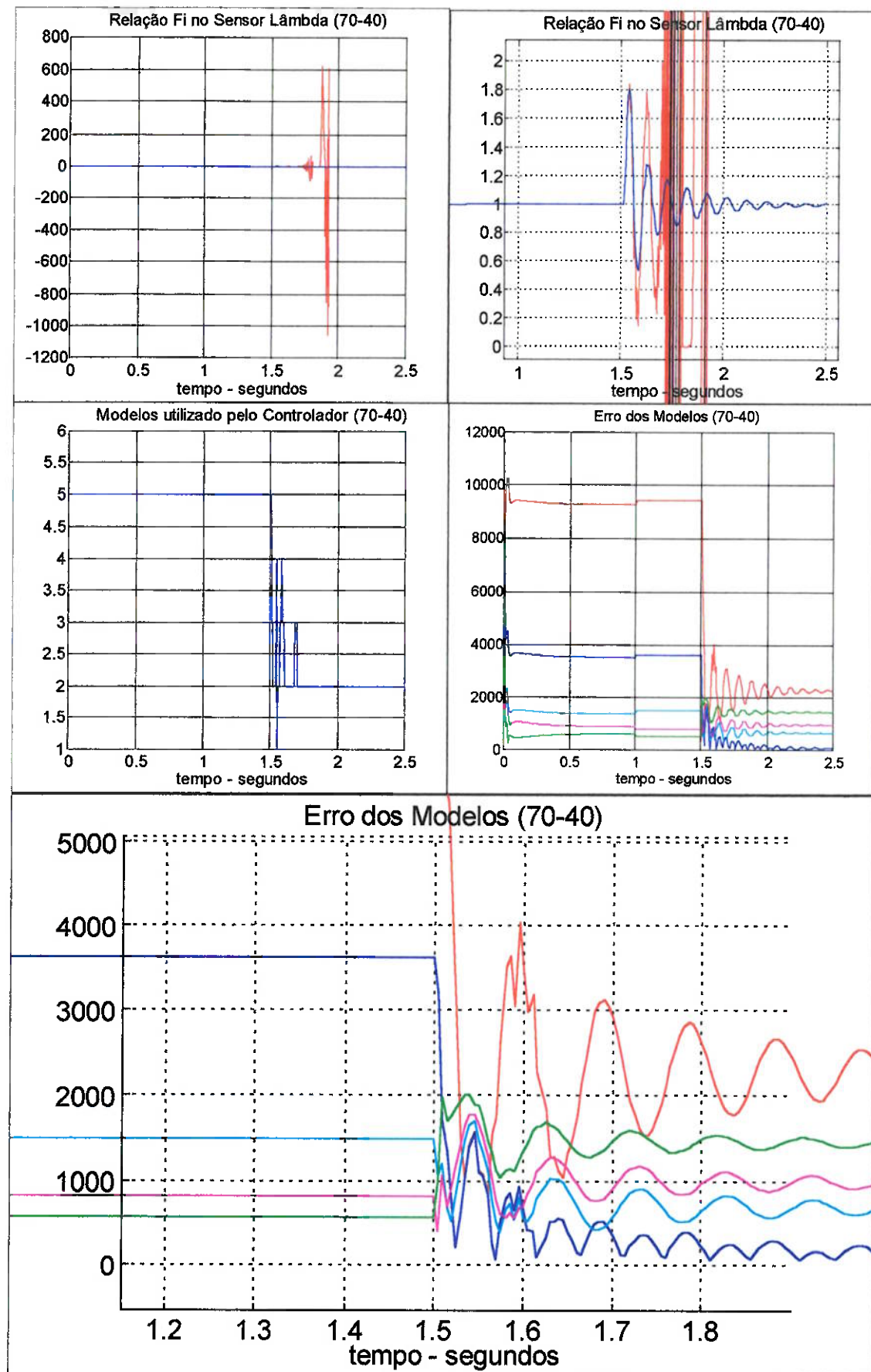
Resultado do transitório de 70 graus para 30 graus



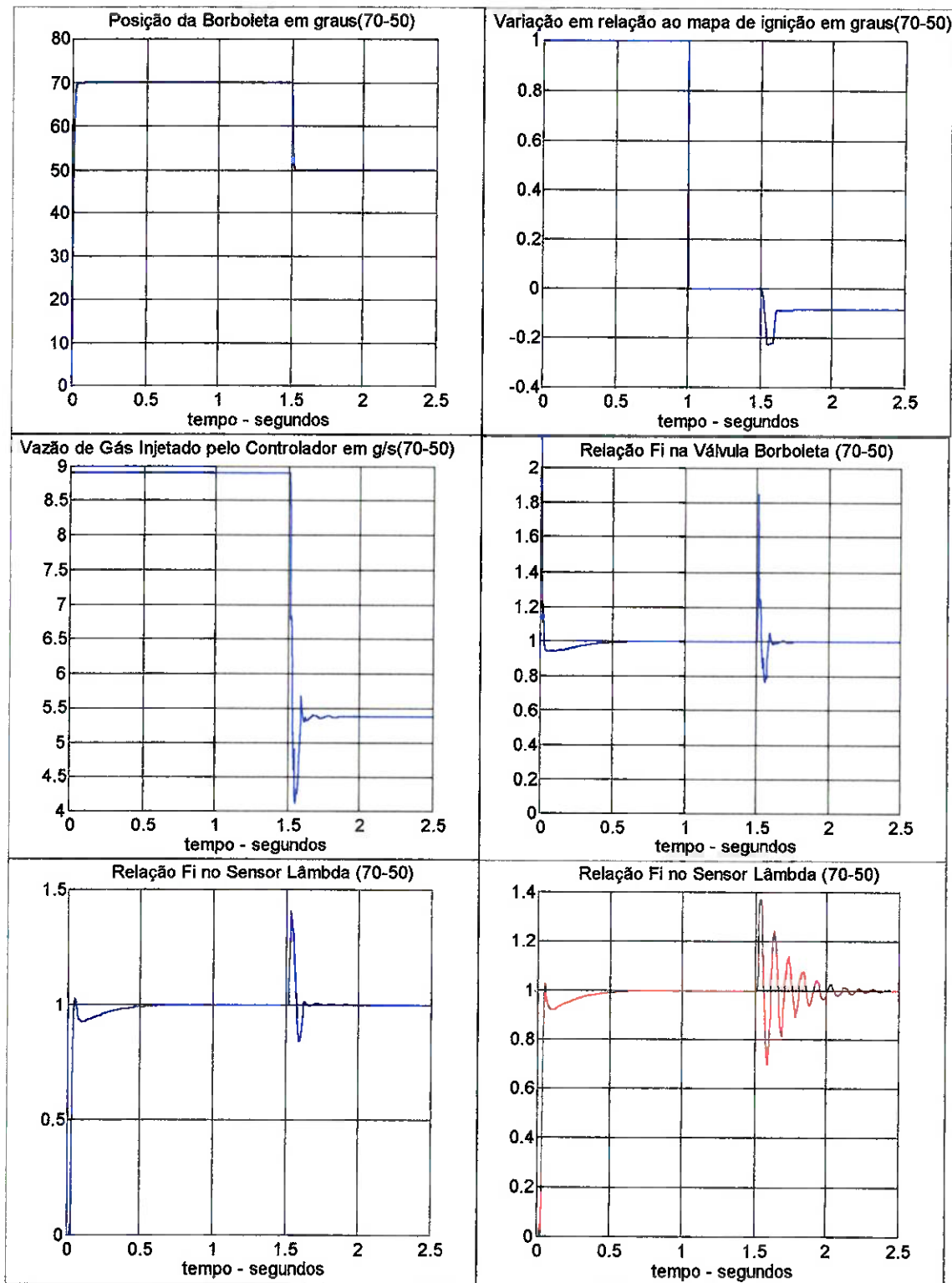
Resultado do transitório de 70 graus para 30 graus



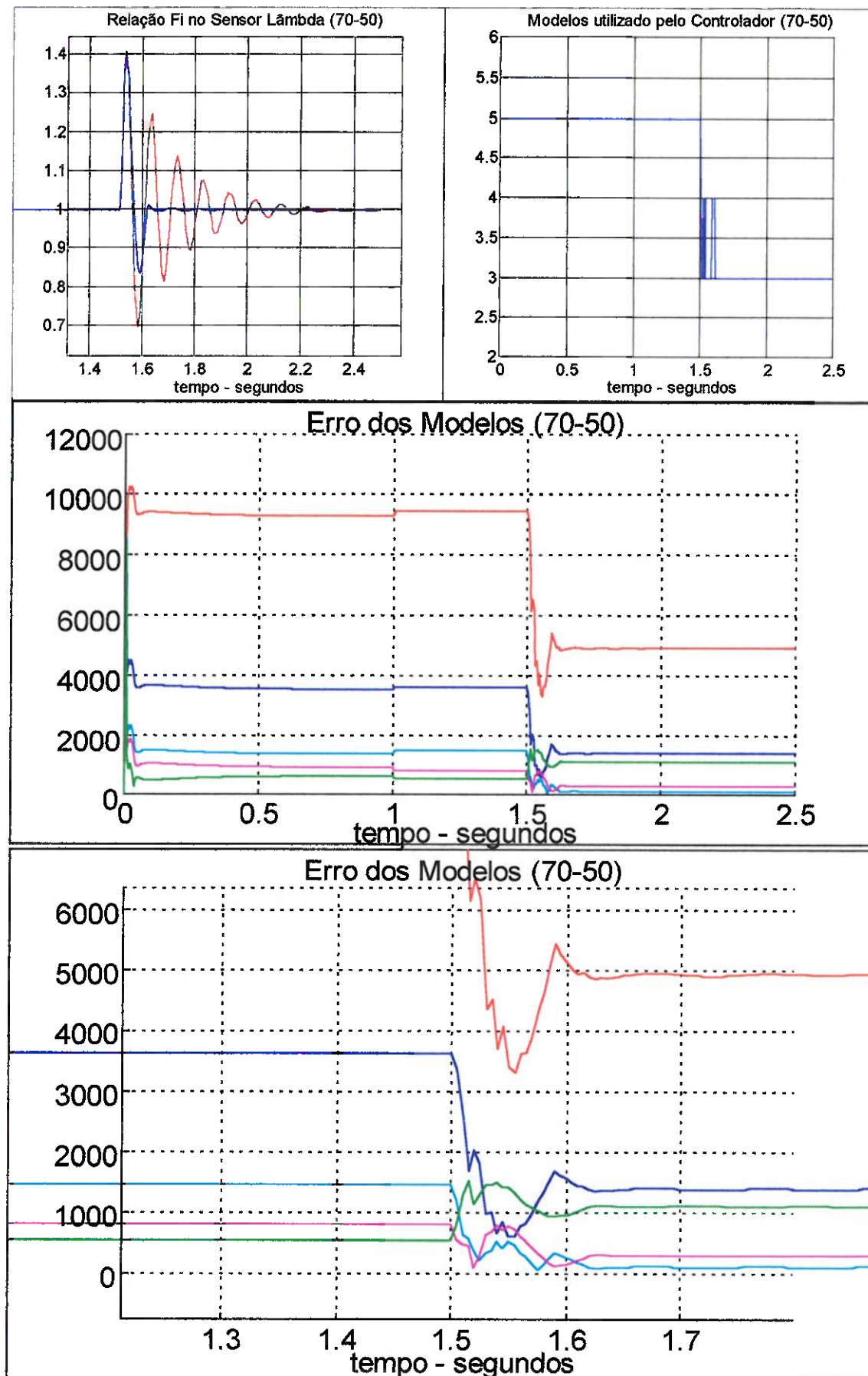
Resultado do transitório de 70 graus para 40 graus



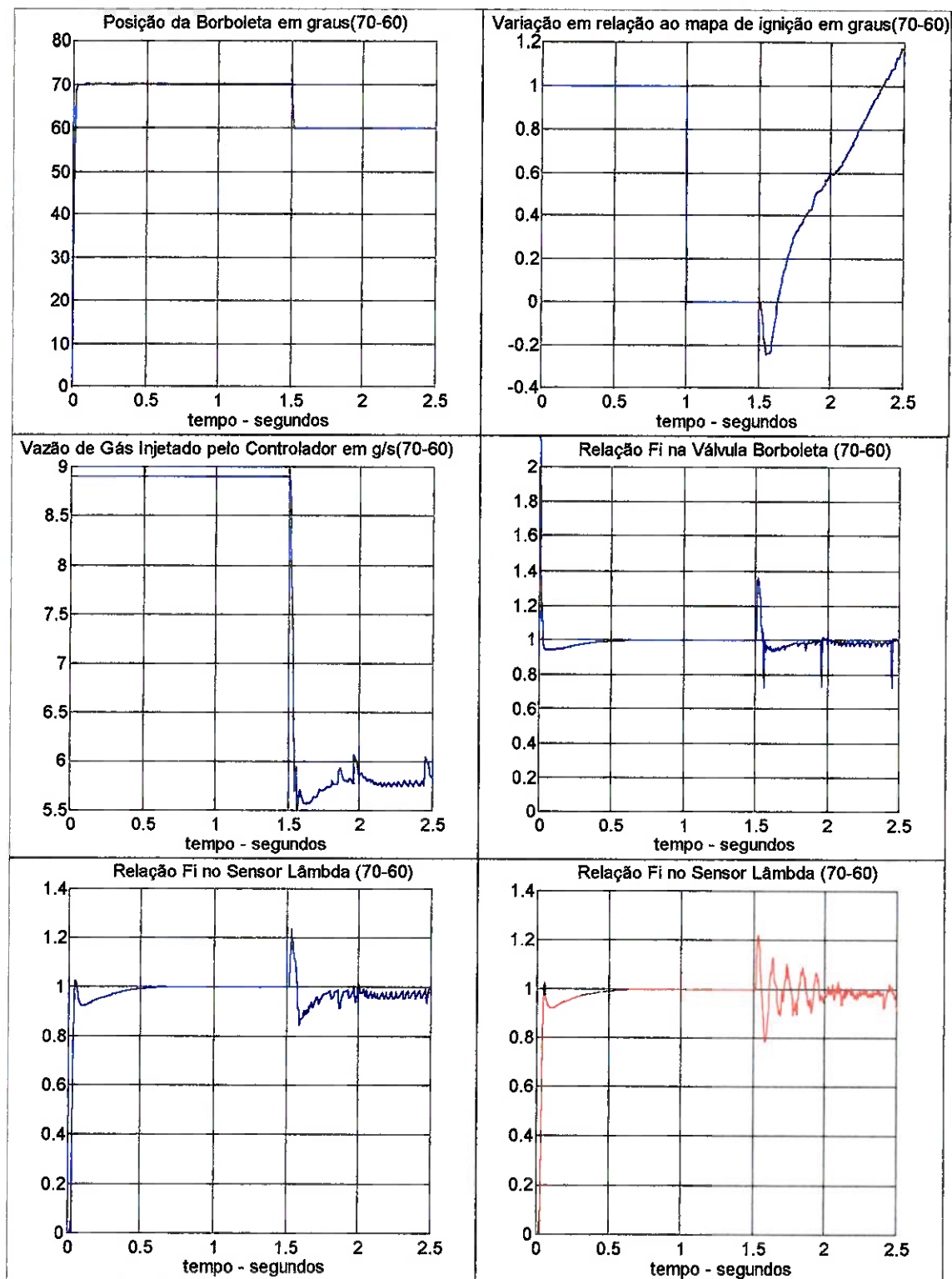
Resultado do transitório de 70 graus para 40 graus



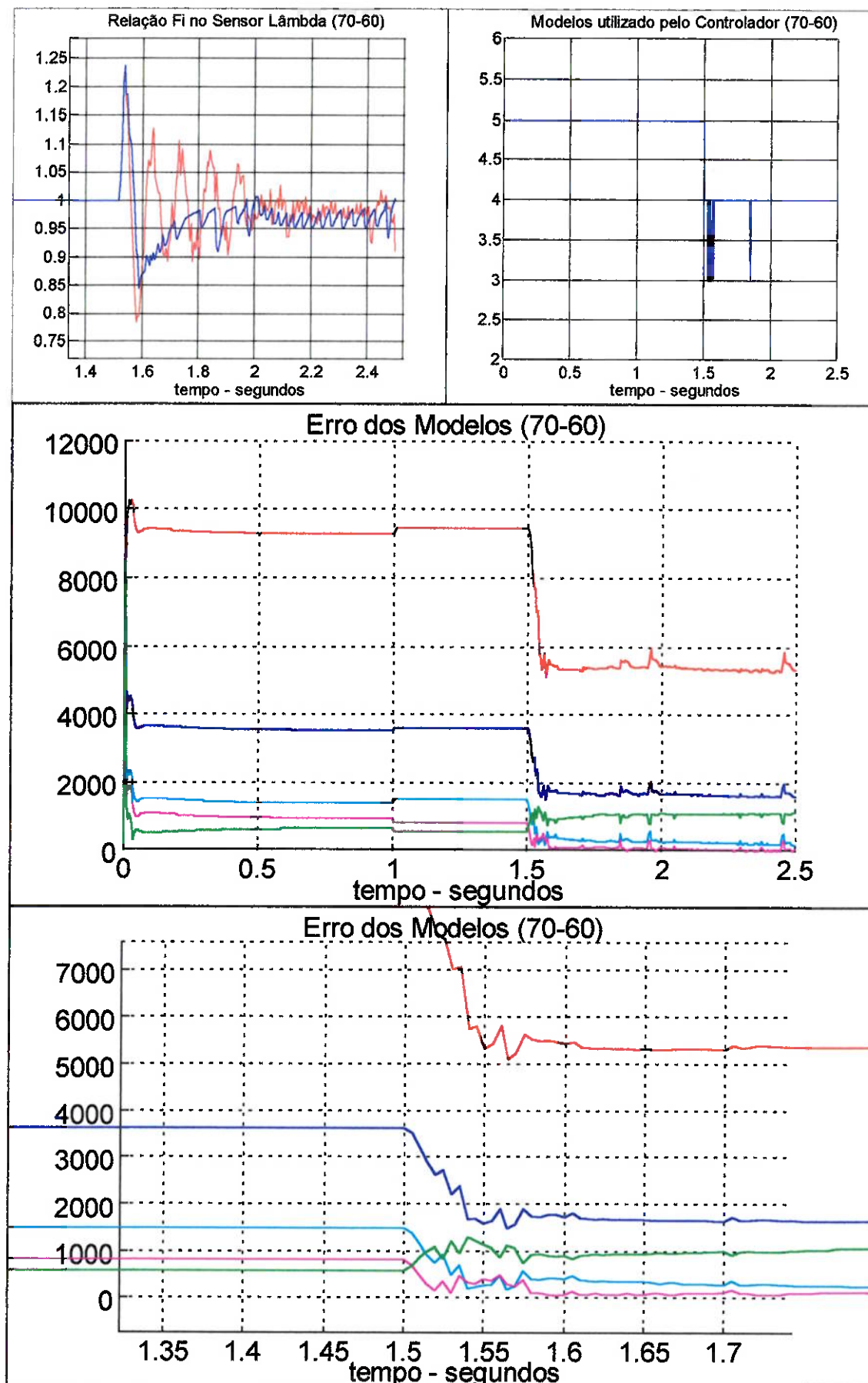
Resultado do transitório de 70 graus para 50 graus



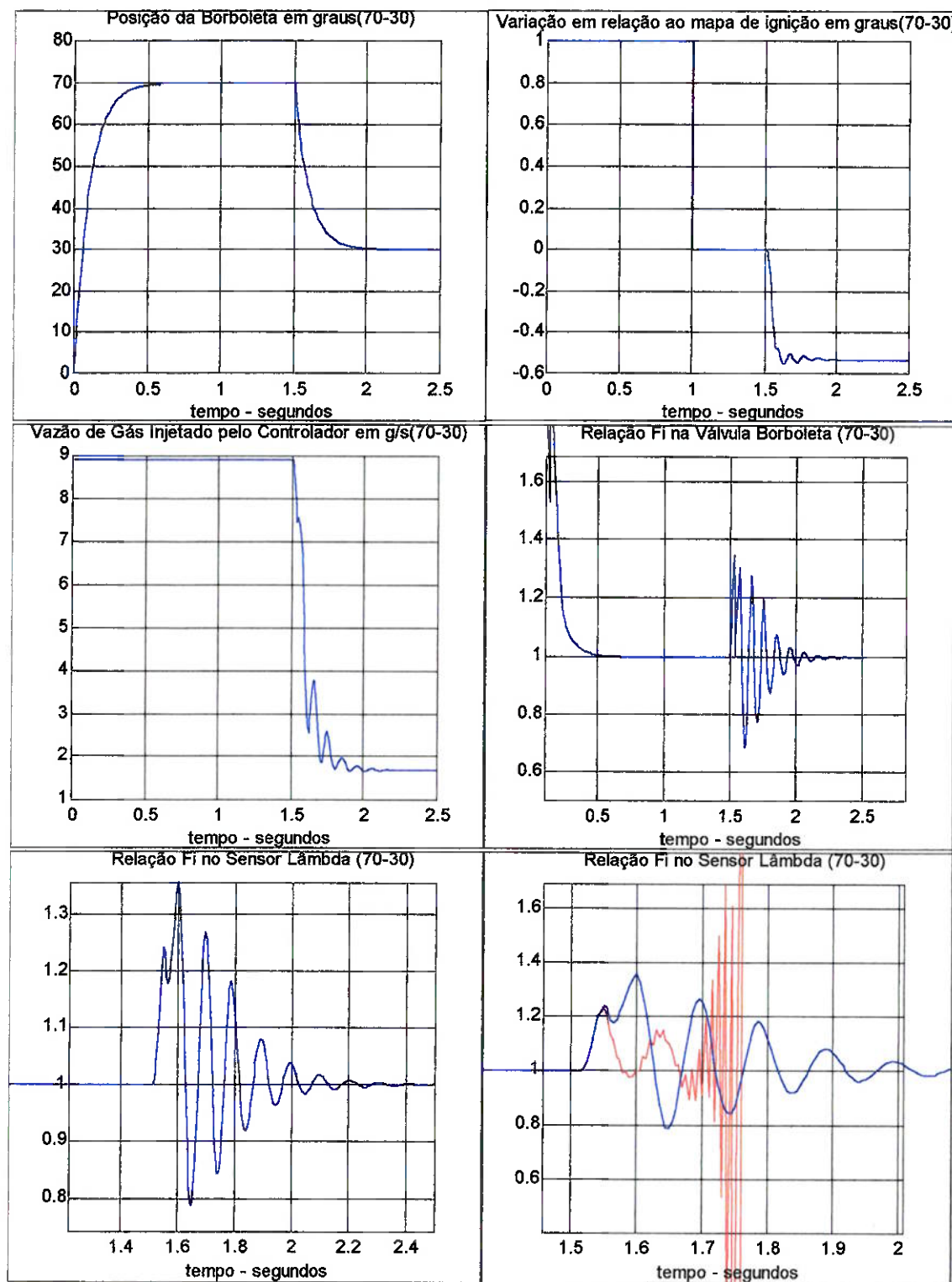
Resultado do transitório de 70 graus para 50 graus



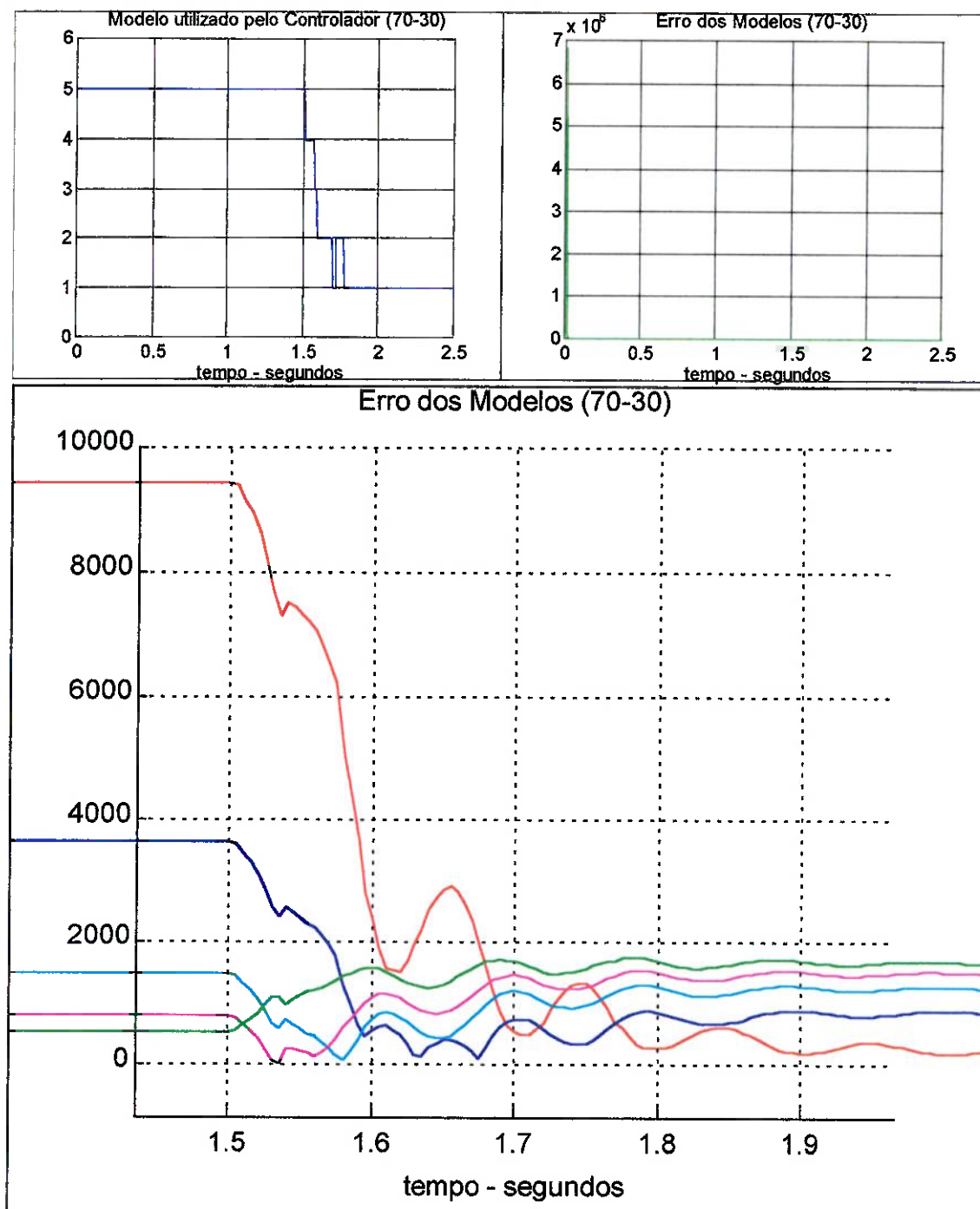
Resultado do transitório de 70 graus para 60 graus



Resultado do transitório de 70 graus para 60 graus



Resultado do transitório lento de 70 graus para 30 graus



Resultado do transitório lento de 70 graus para 30 graus

8. Análise dos resultados

Com os resultados apresentados anteriormente pode-se comprovar a eficácia da utilização da teoria dos múltiplos modelos.

A principal variável a ser controlada, relação ar-combustível sobre relação ar-combustível estequiométrica no sensor lambda, foi controlada na maior parte da simulação com sucesso dentro da faixa pré-definida de 1% de erro em torno do valor unitário, onde o rendimento do catalisador é máximo e o nível de emissões é mínimo. Apenas tivemos valores fora desta faixa no instante da transição, demorando cerca de 0.5 segundo para estabilização do sistema no caso do chaveamento da borboleta entre 70 graus e 30 graus e entre 70 graus e 40 graus, e cerca de 0.2 segundo para o caso do chaveamento entre 70 graus e 50 graus e entre 70 graus e 60 graus.

No caso do chaveamento da válvula borboleta entre 70 graus e 30 graus e entre 70 graus e 40 graus, o controlador sem o auxílio dos múltiplos modelos não consegue ao menos estabilizar o sistema, gerando valores extremamente elevados, impedindo a continuidade da simulação depois de certo período. Considerando o controle sem múltiplos modelos para o caso do chaveamento entre 70 graus e 50 graus e entre 70 graus e 60 graus, tivemos um tempo gasto para estabilização do sistema de cerca de 0.7 segundo, comprovando a eficácia dos múltiplos modelos em otimizar o desempenho do controlador.

Outro dado importante se refere aos valores dos modelos indicados pela estratégia dos múltiplos modelos e erros referentes a cada modelo linear estudado. Quando chaveamos o ângulo de borboleta de um valor para outro, chaveamos também o modelo linear indicado pelos múltiplos modelos, já que o modelamento linear teve como parâmetro principal o ângulo de borboleta. Por exemplo, no caso do chaveamento entre 70 graus e 30 graus verifica-se que o modelo indicado passa de 5 (modelo linear obtido em torno do ângulo de borboleta em 70 graus) para 1 (modelo linear obtido em torno do ângulo de borboleta em 30 graus). Do mesmo modo, os erros dos modelos lineares variam, antes da transição o modelo 5 é o que apresenta menor erro, seguido pelos modelos 4, 3, 2 e 1 nessa ordem. Após a transição os modelos de menor erro invertem sua ordem para 1, 2, 3, 4 e 5, dado o fato que quanto maior a diferença entre o ângulo de borboleta simulado e ângulo de borboleta tomado como base para o modelamento, maior o erro comparado com o modelo não-linear da planta. Tal análise pode ser estendida para os demais casos de chaveamento, como pode ser verificado pelos gráficos anteriores.

A análise anterior pode ser melhor exemplificada pelo caso do transitório lento entre 70 graus e 30 graus. Nesta situação o transitório entre 70 graus e 30 graus demora por volta de 0.5 segundo para acontecer. Sendo assim, o modelo ideal neste intervalo vai passando pelas posições intermediárias, fazendo com que os erros dos modelos lineares se alternem na posição de menor erro, como pode ser visualizado no gráfico gerado, e o modelo indicado pela estratégia dos múltiplos modelos passe pelas posições intermediárias, formando um conjunto de degraus de transição entre posições até se chegar à estabilização da posição da borboleta.

9. Conclusão

A teoria dos múltiplos modelos foi comprovada, neste caso de estudo, como uma solução viável para problemas em que se deseja combinar plantas não-lineares com controladores preditivos que necessitem de modelos internos para seu funcionamento. Como pode ser observado no item resultados, o chaveamento de vários modelos lineares simulou como desejado o comportamento do modelo não-linear, permitindo o desempenho otimizado do controlador e validação da implementação do método.

Os resultados apresentados atenderam satisfatoriamente os parâmetros de projeto do controlador: relação ar-combustível sobre relação ar-combustível estequiométrica no sensor lambda em torno de um com erro tolerável na casa de 1%, acima e abaixo, e resposta rápida do controlador ao transitório gerado pelo chaveamento entre diversos ângulos de borboleta. Tal afirmação pode ser comprovada pela melhora dos resultados apresentados com o controlador utilizando os múltiplos modelos comparado com os valores apresentados para o controlador GPC sem múltiplos modelos.

Desse modo, podemos considerar que o trabalho de formatura atingiu os objetivos propostos, comprovando para o caso de estudo, controle transitório de motores a gás natural utilizando múltiplos modelos, que a implementação da estratégia dos múltiplos modelos é válida e pode ser utilizada para casos semelhantes ao proposto.

Referências Bibliográficas

- [1] LOPES, José A. 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**, 1996.
- [2] Narendra, K. S. ; Balakrishnan, J.; Ciliz, M. K. Adaptation and learning using multiple models, switching, and tuning. **IEEE Control Systems**, p. 37-51, Junho 1995.
- [3] Narendra, K. S. ; Balakrishnan, J. Adaptive control using multiple models. **IEEE transactions on Automatic Control**, p. 171-187, Fevereiro 1997.
- [4] Athans, M.; Castañón, D.; Dunn, K. P.; Greene, C. S.; Lee, W. H.; Sandell, N. R.; Willsky A. S. The stochastic Control of the F-8C Aircraft using a multiple model adaptive control (MMAC) Method-Part 1; Equilibrium flight. **IEEE Transactions on Automatic Control**, p. 768-779, Outubro 1977.
- [5] Li, X. R.; Bar-Shalom Y. Design of an interacting multiple model algorithm for air traffic control tracking. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, p. 186-194, Setembro 1993.
- [6] Lane, D. W.; Maybeck, P. S. Multiple model adaptive estimation applied to the lambda uv for failure detection and identification. **Proceedings of the 33rd Conference on Decision and Control Lake Buena Vista**, p. 678-683, Dezembro 1994.
- [7] Yu, C.; Roy, R. J.; Kaufman, H.; Bequette, B. W. Multiple model adaptive control of mean arterial pressure and cardiac output. **IEEE Transactions on Biomedical Engineering**, p. 765-778, Agosto 1992.
- [8] Pait, F. M.; Morse A. S. A cyclic switching strategy for parameter-adaptive control. **IEEE transactions on Automatic Control**, p. 1172-1183, Junho 1994.
- [9] Morse, A. S.; Mayne, D.Q.; Goodwin, G. C. Applications of hysteresis switching in parameter adaptive control. **IEEE transactions on Automatic Control**, p. 1343-1354, Setembro 1992.
- [10] Morse, A. S. towards a unified theory of parameter adaptive control: tunability. **IEEE transactions on Automatic Control**, p. 1002-1012, Setembro 1990.
-

[11] Hilhorst, R. A.; Amerongen, J. V.; Lönhberg, P.; Tulleken, H. J. A. F. Intelligent adaptative control of mode switch process. **IFAC Intelligent Tunning and Adaptative Control**, p. 145-149, Cingapura, 1991.

[12] Fu, M.; Barmish, B. R. Adaptative stabilization of linear systems via switching control. **IEEE transactions on Automatic Control**, p. 1097-1103, Dezembro 1986.

