

BC

FD-1439

Luis Henrique Camargo Quiroz

870211

PROPOSTA PARA
AUTOMATIZAÇÃO DE SISTEMAS PROPULSORES
E SIMULAÇÃO DE SEU DESEMPENHO

Dissertação apresentada à
Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Mestre
em Engenharia.

São Paulo
1993

Luis Henrique Camargo Quiroz 7501679

PROPOSTA PARA
AUTOMATIZAÇÃO DE SISTEMAS PROPULSORES
E SIMULAÇÃO DE SEU DESEMPENHO

Dissertação apresentada à
Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Mestre
em Engenharia.

Área de concentração:
Engenharia Mecânica 3.04.00.00.0

Orientador:
Francisco Emílio Baccaro Nigro 125504

São Paulo
1993

RESUMO

Este trabalho apresenta uma proposta para automatização de sistemas de propulsão convencionais de veículos automotores, compreendendo o motor, a embreagem e a caixa de mudanças. Discute a seguir as vantagens e as características desejáveis para a adoção destes sistemas, por exemplo, em frotas de ônibus. Desenvolve-se e comenta-se finalmente um programa para a simulação do sistema propulsor automatizado e do convencional, e através dos resultados das diferentes simulações comprovam-se as vantagens da automatização proposta.

ABSTRACT

This work introduces a conventional powertrain automation proposal, including engine, clutch and gearbox. The advantages and desirable characteristics for adopting these systems, for instance, in bus fleets, are discussed. Finally, a simulation program for both automated and conventional powertrain systems is developed and commented, and the simulation results for different operational conditions confirm advantages of the proposed automation.

SUMÁRIO

RESUMO e ABSTRACT	
INTRODUÇÃO	1
TRABALHOS ANTERIORES	6
1 - Determinação da troca de marchas ideal	6
2 - Automação parcial de sistema de transmissão	14
3 - Controle do motor	15
4 - Controle de sistema de propulsão	17
DISCUSSÃO PARA UM SISTEMA PROPULSOR DE ÔNIBUS	23
MODELO DINÂMICO PARA O MOTOR	27
MODELO COMPUTACIONAL DO SISTEMA PROPULSOR	33
Introdução	33
Apresentação das rotinas	37
a- Caixa de Mudança de Marchas	37
b- Embreagem	39
c- Dados para Processamento	41
d- Motor	42
e- Rodas	44
f- Dinâmica do Veículo	47
g- Supervisão de Rotação do Motor	48
h- Seleção de Marchas	49
i- Programa Principal	52
j- Simulação de um Motorista	56
l- Interpolação Linear	58
m- Relatório de Processamento	58
n- Geração de Gráficos	59
AVALIAÇÃO DO SSP	61
Troca de marchas	61
Consumo	68
Levantamento de dados de laboratório e de campo	70
AVALIAÇÃO DA PROPOSTA DE AUTOMATIZAÇÃO	71
Simulações e Comparação de Resultados	71
Viabilidades técnica e econômica	72
ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	76
Inércia do motor	76
Erros na velocidade	78
Erros no embreamento	81
Erros na medida de torque	83
CONCLUSÕES	85
ANEXO A	
RELATÓRIO DE PROCESSAMENTO PARA TROCA DE MARCHA AUTOMATIZADA	88
ANEXO B	
RELATÓRIO DE PROCESSAMENTO PARA TROCA DE MARCHA POR MOTORISTA TREINADO	95
BIBLIOGRAFIA	102

INTRODUÇÃO

Os sistemas de propulsão estão presentes em todos os veículos com motores de combustão interna.

Por sistemas de propulsão queremos nos referir, em geral, ao conjunto de todos os componentes relacionados à movimentação do veículo, ou seja, motor, embreagem, caixa de mudança de marchas, eixos da transmissão, diferencial, rodas e pneus; neste trabalho, no entanto, vamos nos restringir à embreagem e à caixa de mudanças, incluindo o motor.

A função da caixa de mudanças nos sistemas de propulsão é adequar o desempenho do motor, um tanto "restrito", às condições mais abrangentes de velocidades e torques nas rodas que surgem durante o deslocamento de um veículo, como indicado na figura 1. Por questões de ordem prática, no entanto, o número de relações de transmissão das caixas de mudança é limitado, o que leva o motor a trabalhar em condições nem sempre as mais adequadas, especialmente se o motorista usar as marchas inadequadamente, uma vez que os motores de combustão interna têm um desempenho bastante variável de acordo com suas condições de funcionamento, ou seja, de acordo com o torque e rotação que devem fornecer a cada momento.

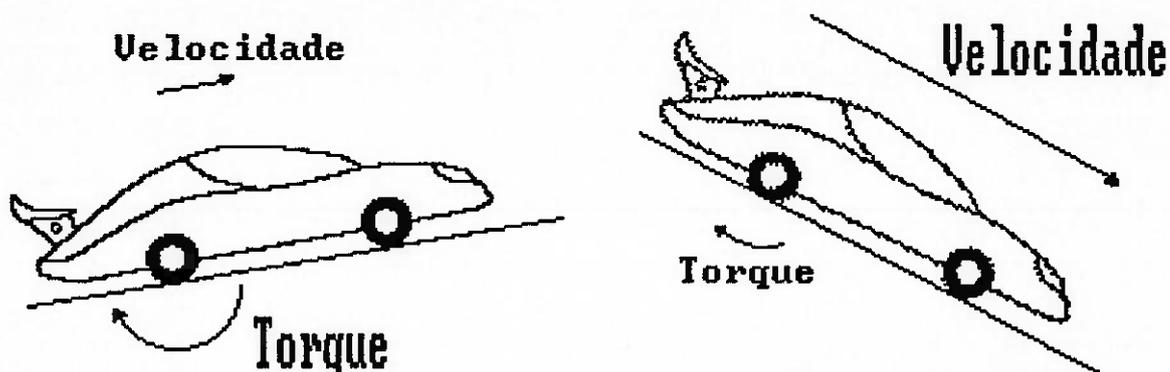


Figura 1: Diferentes situações para um veículo em movimento.

Um exemplo de curva de resposta^{*1} de um motor diesel, que será estudado neste trabalho, pode ser visto na figura 2; nota-se que o torque máximo se obtém numa região de rotações "médias", e também a eficiência máxima, correspondendo ao consumo específico mínimo, se atinge numa faixa de rotações e torques bem determinada. Por outro lado, enquanto no exterior têm grande aceitação os sistemas de transmissão automática, a situação brasileira é diferente, em virtude de seu custo mais elevado; podemos encontrá-los, por exemplo, nos automóveis mais caros, ou nos poucos ônibus articulados que circulam nas grandes cidades. A desvantagem das transmissões manuais é que elas podem ser mal utilizadas, e algumas conseqüências disto são:

- desgaste acelerado do sistema propulsor, especialmente da embreagem;
- trancos durante as mudanças de marcha, causando desconforto a passageiros e danos às cargas transportadas;
- maior consumo de combustível, pois o motor funciona fora das condições ideais

*1obtido para regime permanente.

Estudos realizados em vários países chegaram a indicar diferenças entre 15 a 20% no consumo de combustível para os mesmos percursos, veículos, cargas e condições de tráfego, mas com diferentes motoristas - e às vezes com o mesmo motorista, ao longo da viagem -, evidenciando assim que o critério individual de troca de marchas desempenha um papel determinante no consumo (Aguiar[1987]).

Uma correta utilização dos sistemas manuais é algo difícil de conseguir na prática. Com as tecnologias mais modernas os motores diesel trabalham a rotações cada vez mais baixas, enquanto o torque máximo pode ser obtido numa gama maior de rotações; isto inviabiliza o reconhecimento, por parte do motorista, do momento mais adequado para a troca de marchas, mesmo com o auxílio de instrumentos (Aguiar[1987]). Por outro lado, a concentração e o esforço do motorista são afetados pela carga de trabalho: por exemplo, motoristas de ônibus paulistanos trocam de marcha em média 3000 vezes, isto em apenas uma volta da linha "Circular Avenidas"*²; ao final do dia, portanto, é compreensível que não consigam dirigir nas suas melhores condições. Vale a pena, portanto, procurar automatizar os sistemas convencionais de propulsão; uma solução de baixo custo e adaptável aos veículos já produzidos pode ser extremamente atraente.

*²conforme estudos da CMTC citados por Valtércio Zanvettor, ex-coordenador do Programa de Transportes do IPT.

Nos capítulos a seguir teremos:

- revisão bibliográfica de alguns trabalhos visando a automação de sistemas de propulsão, com caixa de mudança convencional ou não;
- formulação de uma estratégia de controle que seja adequada para o caso de ônibus urbanos;
- desenvolvimento de modelos matemáticos e computacionais para a simulação do sistema propulsor convencional e do automatizado;
- avaliação do programa de simulação desenvolvido;
- análise de sensibilidade do sistema automatizado, feita com uso do programa simulador;
- conclusões sobre a automatização proposta e sobre as simulações;
- resultados de simulações (em apêndices).

Torque (kgf.m)

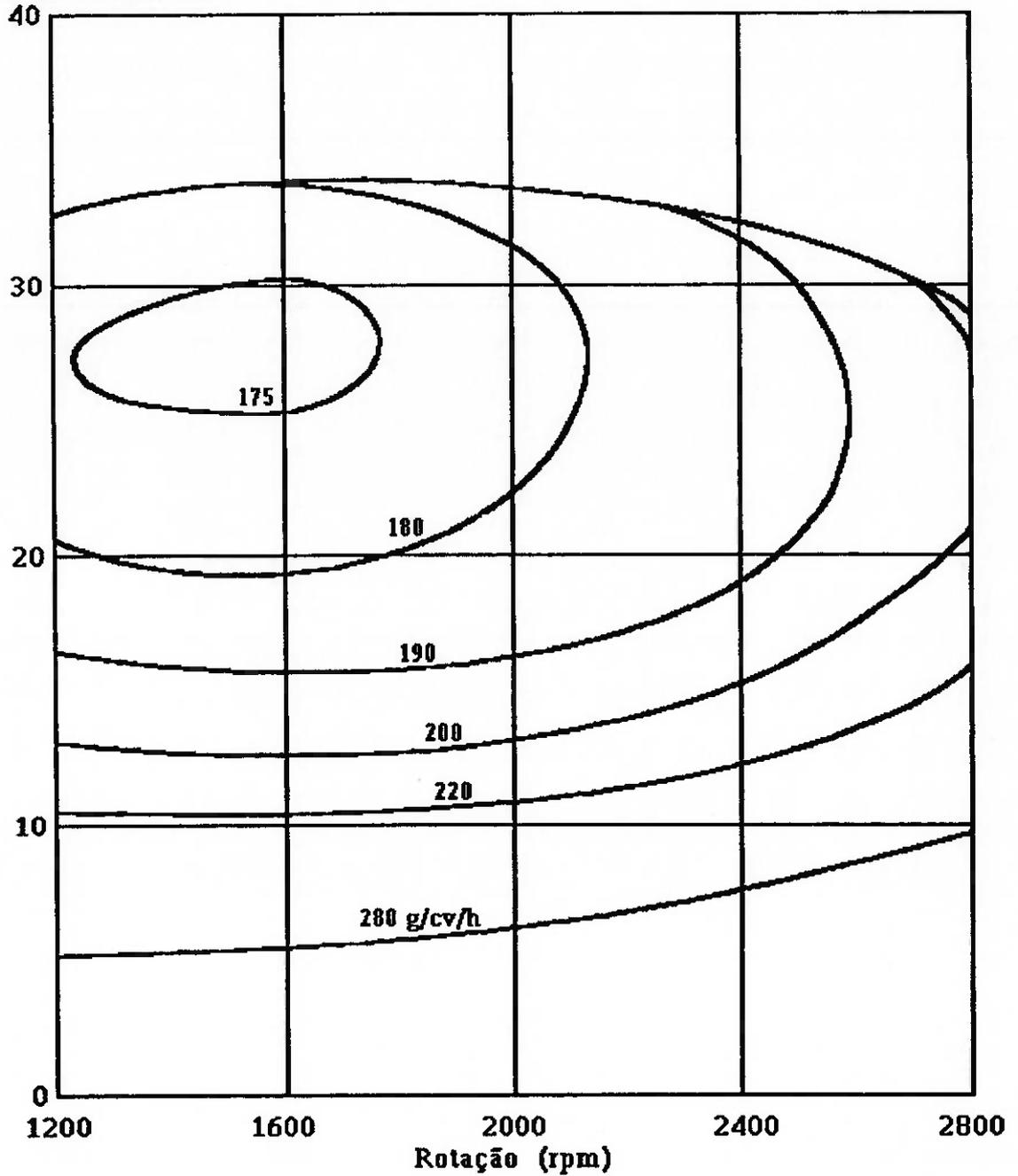


Figura 2: Gráfico de torque e ilhas de consumo específico de um motor diesel convencional (Mercedes-Benz OM 352), estudado neste trabalho (adaptado de Instituto[1982]).

TRABALHOS ANTERIORES

1 - Determinação da troca de marchas ideal

Uma vez que é importante usar a marcha adequada para cada instante, vejamos como se pode determinar qual a marcha ideal, ou seja, aquela que permita a maior economia de combustível, colocando os resultados numa forma que possibilite seu uso posterior.

Método computacional (Kuzak[1987]): trata-se de um processo numérico que exige grandes computadores devido à quantidade de resultados e alternativas que vão aparecendo no seu transcurso. Ele se baseia em dados de desempenho e emissões poluentes do motor obtidos em bancada dinamométrica^{*3}, além de dados da utilização de veículos em percursos escolhidos. Como resultado deste método vale a pena destacar que, conhecendo as emissões poluentes, elas podem servir como restrições ao funcionamento do motor, levando a soluções otimizadas não só quanto à economia mas também do ponto de vista ambiental.

Este método não se restringe à determinação de um esquema otimizado para seleção de marchas, permitindo, além

^{*3}No entanto não é impossível imaginar que estes dados possam até mesmo ser obtidos através de um modelo termodinâmico de combustão do motor, inclusive as emissões poluentes, conforme Benson[1979].

Quer dizer, este processo poderia ser aplicado a um motor projetado mas ainda inexistente!

disto, a determinação de novas regulagens do motor, quando conveniente.

Inicialmente, um veículo instrumentado anda por percursos típicos, registrando os dados de velocidade e declividade ao longo do caminho, que são posteriormente transferidos ao computador. Além destes dados é necessária uma descrição da caixa de mudanças, ou seja, quais as suas relações de transmissão (e a do diferencial). A partir daí, cálculos convencionais de sistemas de propulsão permitem determinar quais os regimes de funcionamento exigidos do motor para percorrer o percurso típico nas condições previamente registradas. O programa em questão analisa o que acontece a cada segundo (ou outro intervalo de tempo desejado) no funcionamento do motor, determinando qual seu consumo e quais as quantidades de poluentes geradas. Como não há uma estratégia de uso de marchas definidas *a priori*, todas as possibilidades são verificadas a cada instante, o que levaria um veículo com 5 marchas a ter, potencialmente, 5^{1000} situações a serem comparadas, supondo um percurso padrão de mil segundos para a definição da seqüência de marchas ótima. Na verdade, não basta analisar qual a marcha teoricamente mais econômica em cada instante e imaginar que a resultante ótima seria simplesmente a sucessão destas marchas, como se vê na figura 3; evidentemente não é viável ficar mudando a marcha a cada segundo. Deve haver o cuidado em respeitar a dinâmica do sistema propulsor, impondo um limite mínimo de tempo antes de se efetuar uma nova mudança. Isto significa que uma dada escolha presente

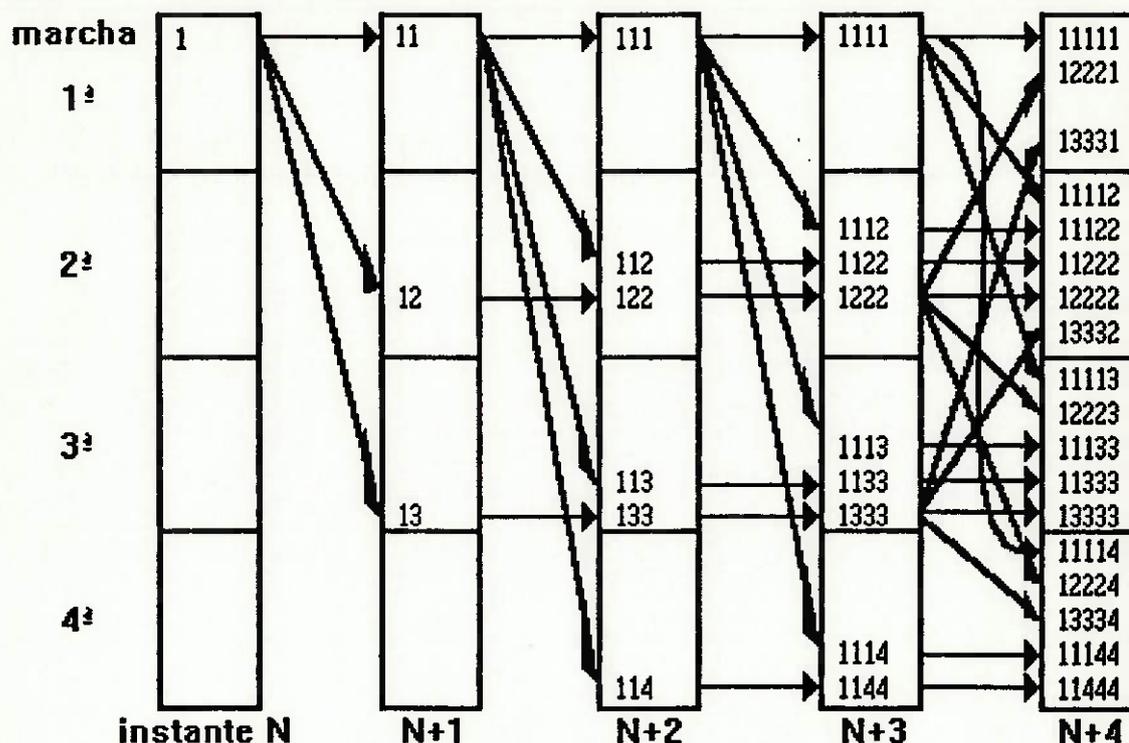


Figura 4: Diferentes seqüências das marchas possíveis para um percurso (adaptado de Kuzak[1987]).

Uma otimização do programa ainda é possível se repararmos que cada situação pode ser agora definida pela marcha atual e pelo tempo de espera para a próxima mudança, sendo este tempo de espera aquele que atende à dinâmica do sistema, no sentido de ser o mínimo razoável entre mudanças de marcha. Quando o tempo de espera for zero surge uma "ramificação" para todas as marchas que possam atender às condições de deslocamento do veículo (figura 5).

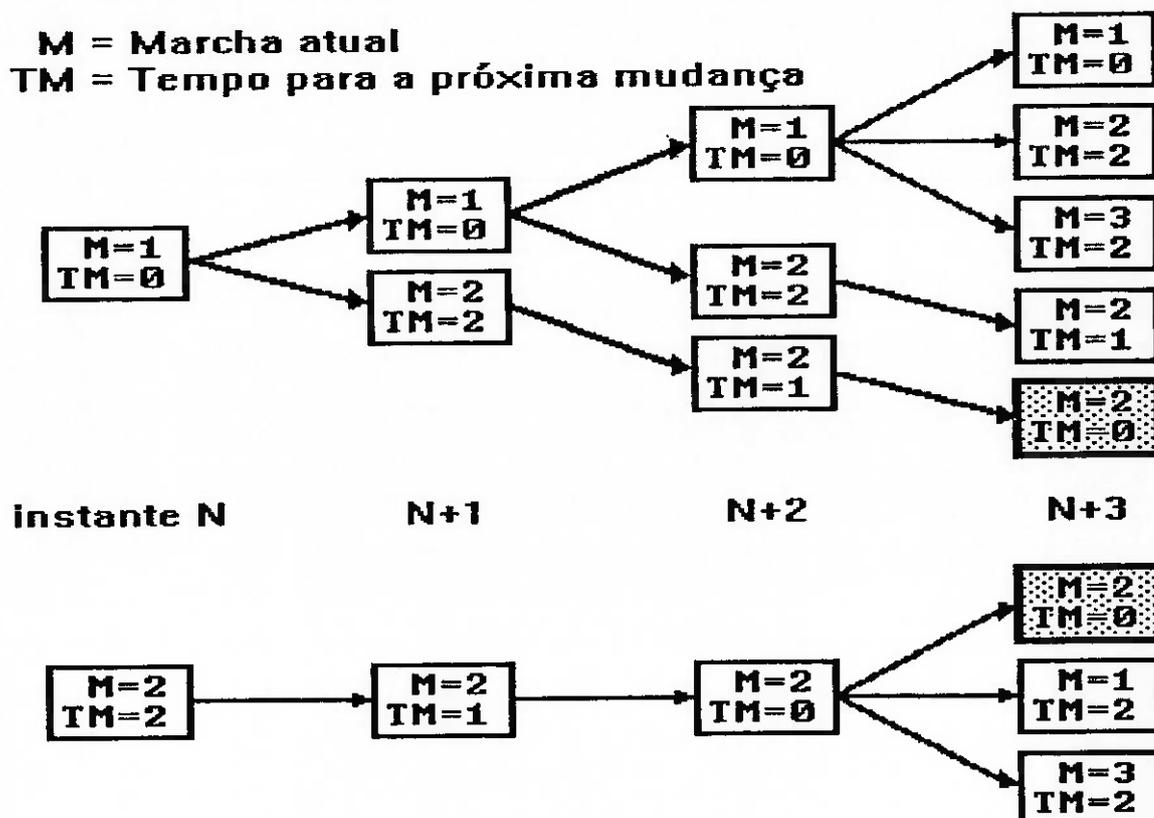


Figura 5: Diferentes seqüências de marchas com uma situação comum em destaque (adaptado de Kuzak[1987]).

Observando a figura vê-se que os quadros em destaque correspondem à mesma situação, logo seus caminhos ótimos a partir daí serão os mesmos, e portanto basta conservar aquele que tiver sido o melhor até o instante considerado. Esta observação permite otimizar o programa, reduzindo a necessidade de memória e agilizando o funcionamento do algoritmo. A cada resultado (marcha possível) se atribui uma função de custo que considera o consumo de combustível e as emissões poluentes; caso alguma parcela do custo ultrapasse algum valor limite, num dado instante da simulação, o algoritmo em questão tenta uma nova regulação do motor (relação ar-combustível, avanço de ignição,

recirculação de gases de escape) capaz de atender aos limites especificados ou, pelo menos, minimizar o prejuízo.

Uma vez definida a seqüência ótima de mudança de marchas, o resultado pode ser mostrado colocando cada segundo do percurso na forma de variados tipos de gráfico, tentando-se assim determinar visualmente algum padrão que permita a implementação, por exemplo em micro-processador, do critério mais adequado para a seleção de marchas. Na figura 6 podemos ver um destes resultados, no caso disposto em função da rotação do eixo de transmissão e do ângulo de abertura da borboleta do carburador; os pequenos números impressos no lugar de pontos indicam a marcha ideal obtida pelo programa simulador.

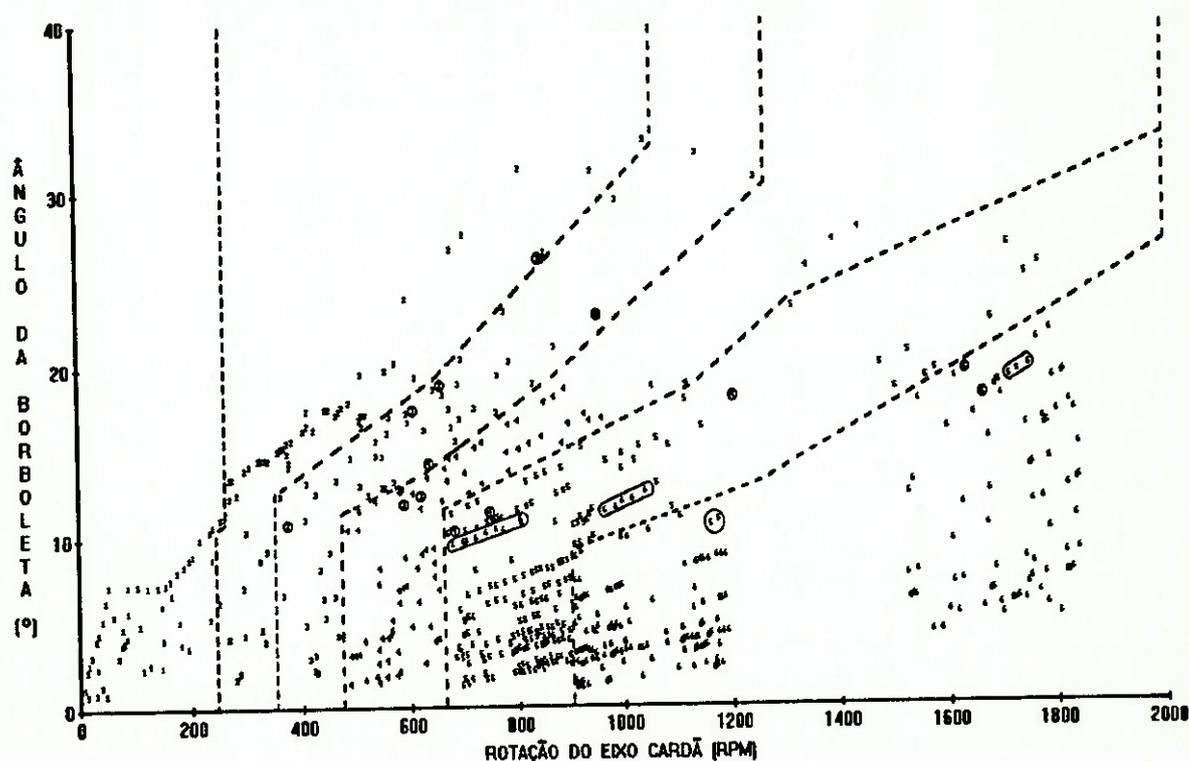


Figura 6: Um dos gráficos gerados no método computacional (conforme Kuzak[1987]).

Percebe-se que a divisão do gráfico pelas linhas tracejadas permite delimitar regiões de marchas mais adequadas, de tal forma que apenas os pontos envolvidos por circunferências diferem da seleção correspondente à região.

Outros possíveis parâmetros foram também testados como eixos para os gráficos, tais como torque e velocidade do motor, torque do motor e velocidade do eixo de transmissão, pressão no coletor de admissão e velocidade do eixo e outros, sem no entanto permitir visualizar alguma forma tão conveniente quanto a mostrada para implementação da seleção da marcha mais adequada. Na verdade, determinou-se uma relação simples entre torque na roda e velocidade do eixo que reproduz com maior fidelidade, ou seja, com menor número de pontos fora da respectiva região, os resultados da simulação computacional; neste caso uma dificuldade prática para implementação em veículos seria a medição do torque na roda - mesmo sendo possível a sua determinação indireta, por exemplo em função da relação de transmissão e da pressão no coletor, a maior complexidade do algoritmo não compensa a economia adicional de combustível. A seqüência de marchas obtida pelo critério de regiões, como as da figura 6, consegue atender tanto ao uso urbano como às condições de estrada.

O método computacional possibilita ainda a avaliação de exigências mais rigorosas para a redução de emissões poluentes, e o estudo de critérios de troca de marchas diferentes do ótimo; descobriu-se assim que critérios "sub-

ótimos", obtidos por pequenas modificações do ótimo, possibilitariam uma implementação mais fácil com aumento insignificante no consumo. Por outro lado, alguns critérios aparentemente razoáveis, como até então se julgava, ou de emprego mais ou menos difundido, tais como efetuar trocas de marcha ao se atingir uma certa rotação do motor, acabavam prejudicando sensivelmente a economia em relação ao ótimo. Finalmente, adotando-se um tempo mínimo para troca de marchas de 5 segundos, o total de trocas de marcha no percurso decresce significativamente, enquanto que o aumento no consumo não é tão perceptível.

Método convencional: processo também baseado no levantamento das curvas de rendimento de um motor testado em dinamômetro, como podemos ver na figura 1.

Neste caso verifica-se para alguns pontos num gráfico torque-velocidade do veículo qual a marcha que atende às condições de deslocamento com o motor trabalhando na maior eficiência possível. Associam-se as melhores marchas aos pontos torque-velocidade e tenta-se depois dividir o gráfico em regiões como as da figura 6. Posteriormente o torque e/ou a velocidade do veículo podem ser relacionados a outros parâmetros mais convenientes, ou seja, cuja medição seja mais fácil a bordo, no caso de se procurar implementar a seleção de marchas ótimas.

Em relação ao método computacional, temos aqui basicamente os mesmos procedimentos e resultados. Destacamos porém que os resultados do método computacional

podem permitir uma maior economia de combustível, pois baseiam-se na análise de dados coletados em muito maior quantidade e em condições reais de uso de um veículo, ao passo que os pontos torque-velocidade do processo convencional podem eventualmente não ser muito representativos da realidade.

2 - Automação parcial de sistema de transmissão (Aguiar[1987])

Neste caso, procurando principalmente obter economia de combustível, uma caixa de câmbio convencional recebeu atuadores pneumáticos para a mudança de marcha. Além disso, um microprocessador recebe e processa sinais que permitem reconhecer qual a marcha mais adequada, indicando ao motorista, através de lâmpadas no painel, quando é o momento de mudar de marcha. Neste instante o motorista deve pisar normalmente na embreagem, o que dá início à mudança propriamente dita, que é automatizada, e solta o pedal apenas quando cessa de soar uma cigarra, ao final do processo. Há a opção de não pisar na embreagem, continuando portanto na marcha atual, ou de solicitar uma marcha diferente da recomendada, bastando acionar uma alavanca para a frente ou para trás, para significar que se pretende aumentar ou reduzir a marcha; a seguir pisa-se na embreagem, na forma usual, aguardando o sinal da cigarra.

Pode-se ainda desligar o sistema automático e passar a dirigir manualmente, ou seja, sem indicação de marcha

ótima, fazendo as mudanças pela alavanca de duas posições e embreagem; neste caso o sistema apenas impedirá que se engate uma marcha incompatível com as condições de funcionamento.

No Brasil este sistema tem sido usado em alguns grandes ônibus de turismo mais por praticidade, já que o compartimento de bagagens tornaria pesado e complicado o sistema usual de hastes para a transmissão do movimento da alavanca de mudanças até a caixa de marchas, na traseira do ônibus, reduzindo até mesmo a sensibilidade do motorista quanto ao engate das marchas.

3 - Controle do motor (Cho[1987])

Aqui temos uma grande inovação em relação ao trabalho anterior. No entanto, a caixa de mudanças neste caso já é do tipo automático, não fazendo muito sentido falar em critérios otimizados para a seleção de marchas. O objetivo deste projeto é permitir uma simplificação construtiva do câmbio automático "hidramático", composto por engrenagens planetárias em série e catracas de roda livre, além de outros componentes.

As catracas permitem uma transição de marchas suave, porém são caras. Eliminá-las pode baratear o conjunto, mas vai exigir um perfeito controle das pressões que acionam as embreagens do hidramático, além de exigir o controle do motor, para que a troca de marchas se dê sem trancos e sem

perdas de potência, isto é, com ambas as embreagens desacopladas.

Comentando as vantagens da mudança de marchas apenas na base de sincronismo entre embreagens e motor, o autor do trabalho percebe que o câmbio automático perde na realidade sua função; ele poderia ser substituído por um conjunto mecanicamente mais simples e compacto, composto por engrenagens sempre engatadas e ligadas à transmissão por embreagens, que seriam acionadas de forma e nos momentos adequados.

Um mérito deste trabalho, devido justamente à necessidade de controle do motor e às características do conversor hidráulico de torque, são as técnicas de controle não linear (utiliza-se "sliding mode", considerando-se a robustez do controlador); desta forma, um único modelo pode atender às condições de funcionamento do sistema em toda sua região de operação, tornando desnecessários os diversos modelos linearizados que seriam usados tradicionalmente.

As simulações indicaram que o hidramático modificado funcionaria tão bem quanto o câmbio de série, e um funcionamento muito superior seria possível caso se pudesse contar com atuadores hidráulicos de resposta em frequência mais alta (atuadores caros e que exigiriam modificações construtivas grandes no hidramático).

4 - Controle de sistema de propulsão (Watanabe[1985])

Vamos explicar com mais detalhes este trabalho por ser o mais abrangente de todos, resumindo e aprimorando as idéias anteriores de uma forma prática.

Os objetivos do projeto foram aliar a comodidade de uma transmissão automática à maior economia possível de combustível. Optou-se por automatizar uma caixa de mudanças convencional, com embreagem a disco seco, ao invés de controlar eletronicamente uma transmissão automática: desta forma tem-se um conjunto mais compacto, barato e de funcionamento eficiente (são características das transmissões manuais em relação às automáticas). Também será feito o controle do motor e a atuação da embreagem, eliminando-se o seu pedal. A seleção da marcha adequada é feita por micro-processador.

Para o controle do motor, que é à gasolina, atua-se na borboleta do carburador através de um motor de passo; há contatos para determinar quando a borboleta está totalmente aberta ou fechada. A embreagem, acionada por pistão hidráulico, contém um sensor da posição do disco. Este sensor é bastante importante durante as trocas de marcha, indicando a iminência do acoplamento entre o motor e a transmissão; como este é o momento mais crítico do processo, e o acoplamento deve ser bastante suave, o pistão é comandado por pulsos modulados em duração (PWM - "pulse width modulation"). Para a debreagem, que deve ser rápida, utiliza-se no correspondente circuito hidráulico uma

válvula de comando com orifícios largos; já o acoplamento depende de duas válvulas, uma com orifício de passagem largo, para deslocamentos mais rápidos, e a outra com uma passagem estreita para movimentos mais lentos e posicionamentos precisos.

Um dos aspectos interessantes do câmbio é que se trata de um modelo manual de série, usado em outros veículos, que simplesmente recebeu atuadores hidráulicos e chaves elétricas para verificar a marcha que está engatada. A embreagem também é um modelo de série, com atuadores externos. Na figura 7 podemos ver um desenho dos atuadores e sensores da embreagem e da caixa de mudanças, e na figura 8 o correspondente esquema hidráulico.

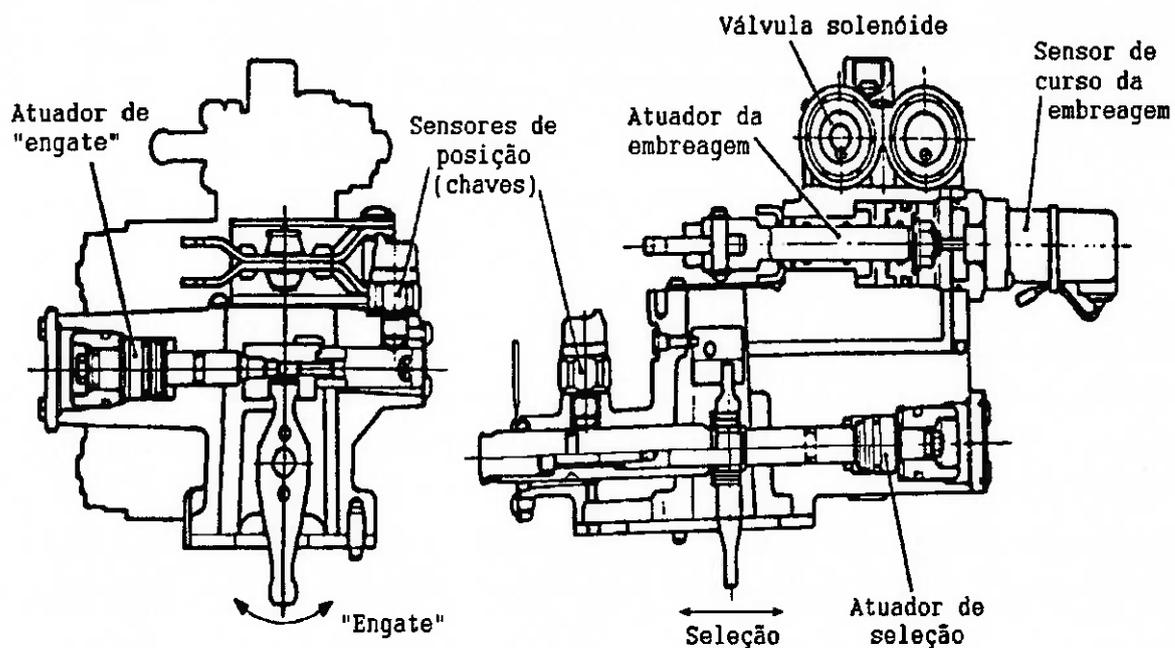


Figura 7: Sensores e atuadores do câmbio automatizado (conforme Watanabe[1985]).

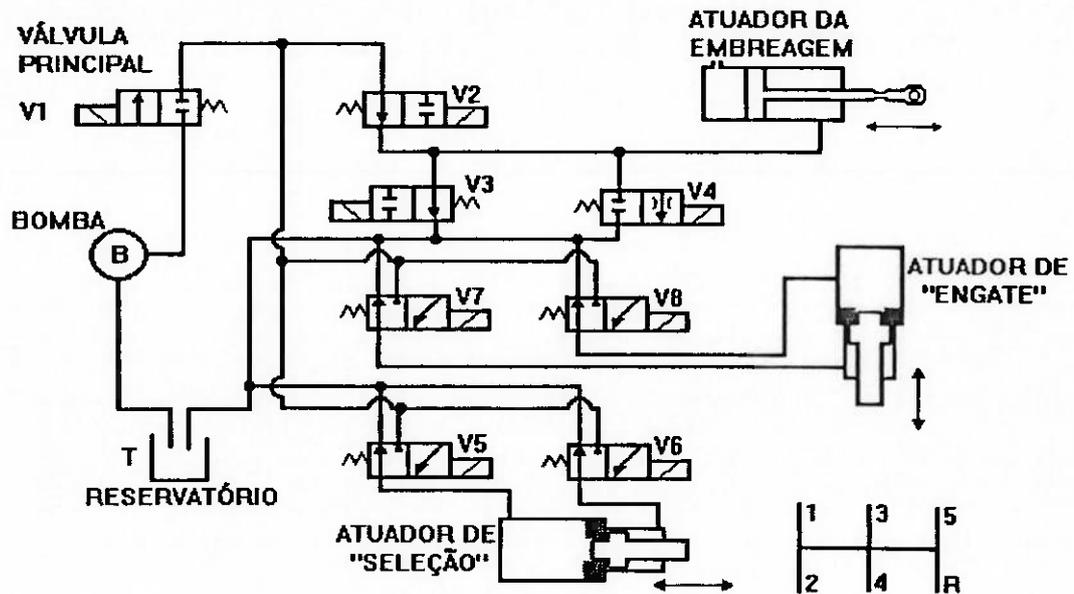


Figura 8: Esquema hidráulico para automatização da troca de marchas (baseado em Watanabe[1985]).

Para o processamento do algoritmo de controle são necessários ainda vários sinais, alguns correspondentes a estados do sistema e outros a variáveis auxiliares:

- as intenções do motorista são captadas por sensores acoplados ao pedal do acelerador e à alavanca seletora de marchas. O movimento do acelerador indica, por um potenciômetro, o desejo de acelerar ou não, havendo ainda duas chaves complementares, respectivamente para indicar pedal solto ou plenamente apertado;
- o sensor da "alavanca de mudanças" - agora simplesmente uma chave seletora de modo de operação - indica ponto-morto, marcha-à-ré ou seleção automática de marchas. Para maior versatilidade, no caso de se puxar um reboque em rampas, por exemplo, há na verdade dois critérios para seleção de marchas, permitindo uso normal ou apenas de marchas mais reduzidas; neste caso, aumentando a eficiência em situações que exijam tração mais elevada;
- a rotação do motor é captada através da contagem de pulsos induzidos num enrolamento próximo a um dos cabos de vela de ignição;
- a velocidade de deslocamento do veículo é medida pela contagem dos pulsos magnéticos do próprio ímã do velocímetro. Trata-se de um velocímetro convencional, ao qual bastou adicionar uma micro-chave magnética ("reed switch");

- um captor magnético fornece a rotação do eixo piloto da caixa de mudanças. Este é um sinal capaz de indicar quando o veículo começa a andar; neste momento o ímã do velocímetro sequer se move, ou o faz muito lentamente;
- a posição da embreagem, que precisa ser conhecida com boa precisão, é determinada por um potenciômetro acoplado ao seu pistão de acionamento, medindo o curso da debreagem;
- os sensores indicadores da marcha efetivamente engatada são simples chaves elétricas, acionadas por entalhes feitos nas hastes de comando do seletor (vide figura 7);
- a borboleta do carburador, à semelhança do pedal acelerador, possui duas chaves elétricas, respectivamente para aberturas máxima e mínima; outras posições da borboleta são conhecidas pela contagem de pulsos do motor de passo, a partir da posição fechada;
- finalizando, há um sensor de temperatura conectado ao circuito de controle; sua função é indicar quando o motor está trabalhando ainda frio.

Um diagrama esquemático de todos os sensores do sistema de controle pode ser visto na figura 9.

Funcionamento: com o veículo parado e a alavanca fora da posição de ponto morto, a embreagem fica desacoplada e o motor em marcha lenta. Quando se começa a acelerar, a embreagem passa à posição de iminência de acoplamento; a posição precisa em que isto ocorre é determinada, após ter-se ligado o veículo, pelo início de movimento na caixa de mudanças, ficando a partir daí armazenada em memória.

Continuando-se a apertar o acelerador, conforme vai havendo mais potência disponível no motor, a embreagem vai sendo gradualmente aplicada até se obter um acoplamento integral.

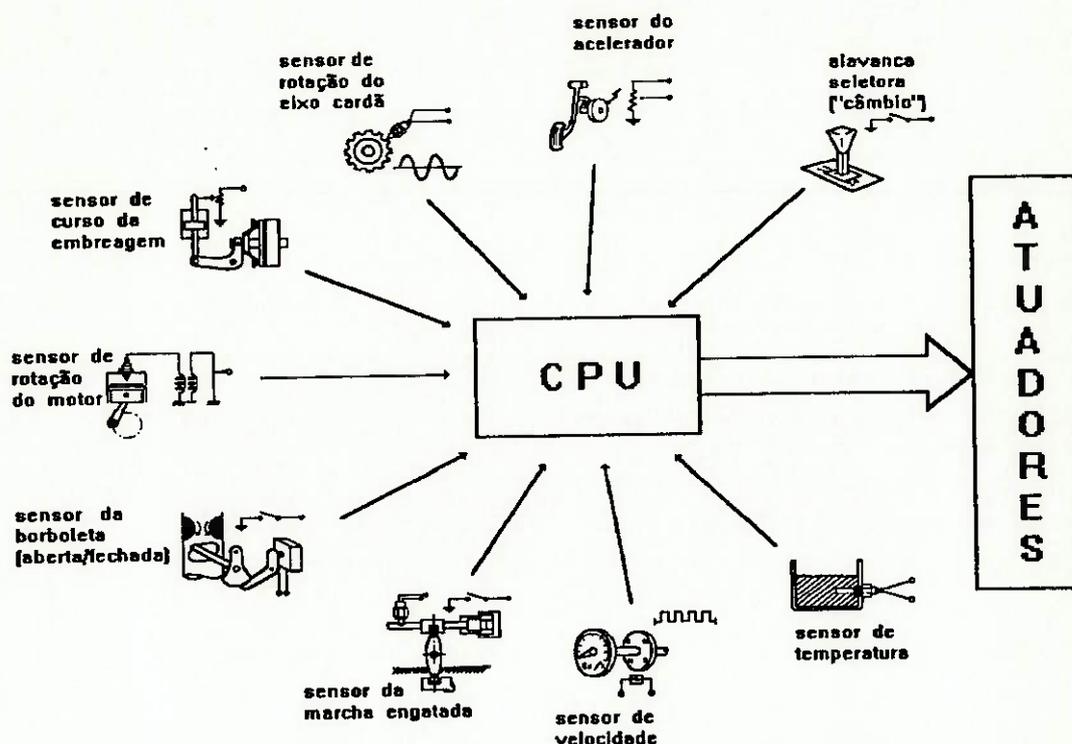


Figura 9: Esboço do sistema de controle para sistema de propulsão automático (adaptado de Watanabe[1985]).

Conforme a combinação entre aperto do acelerador e marcha engatada, a embreagem é comandada com maior ou menor velocidade. O controle da borboleta do carburador impede que o motor dispare durante a mudança de marcha, ainda que se permaneça pisando a fundo no acelerador.

A única dificuldade que pode ocorrer, justamente porque o motorista não tem atuação sobre a embreagem, é soltar o freio no momento correto no caso de partida numa rampa. Para resolver este inconveniente foi desenvolvida uma válvula eletromagnética que retém os freios aplicados mesmo após soltar-se o respectivo pedal; apenas na iminência de acoplamento da embreagem esta válvula libera os freios.

Finalizando, a embreagem também é acionada quando se tira o pé do acelerador e se deixa a velocidade cair abaixo de um valor mínimo, estabelecido para cada marcha, de forma a se aproveitar ao máximo o efeito de freio motor.

DISCUSSÃO PARA UM SISTEMA PROPULSOR DE ÔNIBUS

Motivados pelos trabalhos anteriormente comentados, vamos agora elaborar algumas estratégias para a automação de sistemas propulsores de ônibus urbanos, obtendo um esboço de um possível sistema a ser implementado.

Os objetivos principais a serem atingidos seriam economia de combustível, redução da emissão de poluentes e redução da carga de trabalho do motorista. Os requisitos paralelos, por exemplo, durabilidade dos componentes, reduzindo custos de manutenção; funcionamento suave, aumentando conforto dos usuários; preço atraente aos empresários e facilidade de instalação nos ônibus já existentes em circulação. Na prática, algumas dessas exigências já serão atendidas com a simples adoção de um sistema automático. A comodidade para o motorista será atingida de imediato; em particular, neste item é conveniente que o sistema efetue também o controle da embreagem, e não apenas a troca de marchas. Um critério de uso das marchas bem definido, considerando o regime ideal de funcionamento do motor, por sua vez, é o fator principal para a redução do consumo, contribuindo em parte para a redução da poluição (menos combustível queimado, menos fumaça no ar).

No caso dos motores diesel, que se mal utilizados ou mal regulados são muito poluentes, normalmente se trabalha com misturas combustível/ar bem abaixo da relação

estequiométrica, procurando garantir com o excesso de ar uma boa queima de combustível. As bombas injetoras atualmente em uso possuem um regulador centrífugo cuja função é, através de redução do débito, evitar excessos de rotação que acarretem danos ao motor; estes reguladores porém, em transitórios, às vezes permitem a injeção de mais combustível que aquele que pode ser queimado, por exemplo quando se troca de marcha ou se pisa a fundo no acelerador, produzindo muita fumaça. Baseando-se na massa de ar aspirado pelo motor, uma função de sua rotação, pode-se determinar a massa de combustível correspondente à relação de mínimo excesso de ar para boa queima de combustível, de modo que seria fácil incluir no algoritmo de controle uma limitação eficiente visando a redução da poluição*⁴. No caso de se usar um turbo-compressor, bastaria equacionar a sua dinâmica para se saber a massa de ar entrando no motor. Um algoritmo com esta característica de controle preciso do combustível injetado, incluindo as condições de rotação máxima do motor, permitirá o uso de bombas injetoras sem regulador centrífugo, portanto mais baratas; para adaptar o sistema a um ônibus já em uso, bastaria retirar o regulador instalado nas bombas atuais.

Os atuadores mecânicos a empregar seriam pistões pneumáticos (como em Aguiar[1987], Manual[1984], Computer[1983]) ou hidráulicos. Nos ônibus já existem

*⁴Na verdade, em transitórios é inevitável haver produção de fumaça, devido ao comportamento do óleo diesel nos processos termodinâmicos.

compressores de ar para o circuito de freio, de modo que a opção por acionamento hidráulico será tomada apenas se não houver suficiente pressão pneumática e espaço (diâmetro) para adaptação dos pistões que exerçam as forças necessárias para o acionamento da marcha ou embreagem. Ainda que os pistões tenham de ser fabricados especialmente para esta aplicação, as eletroválvulas podem ser encontradas prontas.

Quanto aos sensores, são relativamente simples. Podem-se fazer algumas adaptações aos instrumentos normalmente presentes nos ônibus, como velocímetro e conta-giros; os demais sensores seriam potenciômetros de precisão, captosres magnéticos e chaves elétricas. Estes componentes não devem representar dificuldades em termos de manutenção. Haverá a necessidade de fazer um circuito impresso para os componentes eletrônicos, e eventualmente estes sejam um pouco mais caros. Pode ser necessária uma alta velocidade de processamento para obter um bom desempenho do controlador; no já citado trabalho de controle do motor (Cho[1987]), por exemplo, pretende-se fazer a implementação usando um microprocessador da família Motorola 68000, que custa caro no mercado nacional. Modelos linearizados, no entanto, devido às equações mais simples, talvez prescindam de uma capacidade de processamento tão alta.

Talvez seja conveniente saber qual o torque exigido do motor. Sendo o torque uma variável de medição mais onerosa, pode-se trabalhar com valores obtidos por técnicas de

estimação de estado. O controle, caso seja necessário, pode ser baseado em modelos não lineares, atualmente possíveis de se tratarem teoricamente, dispensando múltiplos controles lineares para cobrir todo o espaço de estados do sistema. A não linearidade deve-se ao motor.

A princípio, portanto, é tecnicamente possível a automação completa do sistema propulsor para ônibus; restaria uma análise econômica e de mercado para definir sua real viabilidade.

MODELO DINÂMICO PARA O MOTOR

Vamos agora nos deter na elaboração de um modelo matemático para a dinâmica do motor diesel, utilizando variáveis de estado. Este modelo servirá para o desenvolvimento do programa simulador e deverá ser preciso e não muito complexo.

Há diversos trabalhos sobre modelamento de motores diesel, do ponto de vista de processos termodinâmicos (Benson[1979] e Silva[1992], por exemplo) ou de injeção de combustível (Trielli[1990]). Não encontramos nenhuma bibliografia que trate do modelamento dinâmico de motores diesel, mas apenas à gasolina (Cho[1987], Cho[1989], Morris[1982], Moskwa[1992]).

Após um estudo do problema, concluiu-se que basta uma variável para definir o estado do motor, a sua rotação (velocidade angular) n , sendo que para efeito de controle do motor teremos o fornecimento de combustível pela bomba injetora; vamos assumir, para simplificação, que o controle de combustível injetado atua instantaneamente em relação ao tempo de resposta do motor, ou seja, vamos ignorar a dinâmica do processo de injeção.

Com estas duas variáveis, rotação e débito, podemos saber a qualquer instante qual o torque gerado pelo motor. Nos modelos para motores à gasolina a dinâmica do coletor de admissão tem um papel importante, e em alguns casos se considera também um atraso para representar o tempo entre a

admissão da mistura combustível-ar no cilindro e a faísca da ignição (Cho[1989], Morris[1982], Moskwa[1992]), quando realmente tem início a geração de potência, mas para o motor diesel podemos adotar as seguintes hipóteses simplificadoras:

- ao passo que no caso de gasolina procura-se manter uma relação estequiométrica entre ar e combustível, e então o fluxo de ar deve ser controlado pela borboleta (quer haja carburação quer injeção de gasolina), o motor diesel trabalha com excesso de ar, de modo que a dinâmica do coletor pode ser desprezada (o coletor não deve obstruir a passagem de ar de modo algum);
- nos motores à gasolina o combustível, cuja quantidade foi controlada pelo carburador ou sistema de injeção, só entra no cilindro no tempo de admissão, e a centelha que provoca a ignição ocorre ainda mais tarde, perto do final da compressão, quando tem início a realização de trabalho pelo cilindro do motor; nos motores diesel a injeção ocorre já no final do ciclo de compressão, tendo a combustão início apenas uns 0,001 segundos depois ("retardamento da combustão" conforme Robert[s.d.]), e por isto vamos considerar que o sistema de injeção atua instantaneamente, simplificando o modelo. O atraso até a ignição corresponde a uma volta do eixo em motores de 4 tempos, e desconsiderá-lo nos transitórios poderia trazer dificuldades para um controle "exigente" dos motores de ignição por centelha; no motor diesel, mais lento, supondo 3600 rpm, o que já é bastante, em 0,001 seg. o eixo terá virado pouco mais de um vigésimo de volta.

A dinâmica rotacional do motor é equacionada por

$$J.n' = Tg - Ti - Tc , \quad (\text{eq. 1})$$

sendo J o momento de inércia do motor, reduzido ao seu eixo de saída, n' a derivada temporal da sua velocidade angular, Tg é o torque gerado na combustão, também chamado de torque indicado, Ti é o torque perdido internamente no motor, por causa dos rendimentos térmico e mecânico, e Tc é o torque

requerido na saída do eixo. O momento J deve ser medido, pois seu cálculo, mesmo aproximado, é trabalhoso.

A parcela T_c pode ser decomposta em:

$$T_c = T_t + T_d, \quad (\text{eq. 2})$$

onde T_t representa o torque de movimentação do veículo, refletido como carga no motor, e T_d representa as perdas viscosas da transmissão, que podem ser aproximadas por funções matemáticas. O torque T_t pode ser determinado conhecendo-se a resistência ao movimento (aerodinâmica, pneus, perfil da pista) e a redução entre motor e roda. T_g , o torque indicado, depende da massa q' de combustível injetada em cada cilindro por unidade de tempo - ou a cada ciclo de combustão, pois o motor na realidade trabalha discretamente no tempo - e de um eventual fator alfa de proporcionalidade, que poderia incluir não linearidades tais como o efeito de um avanço centrífugo de injeção e outras:

$$T_g = \text{alfa} \cdot q', \quad (\text{eq. 3})$$

o valor de alfa (uma função) deve ser determinado experimentalmente. A massa q' depende da rotação do motor e da posição x da cremalheira da bomba injetora,

$$q' = n \cdot f(x); \quad (\text{eq. 4})$$

a ação de controle será realizada pelo adequado posicionamento da cremalheira, cujo atuador pode ser um motor elétrico CC ou de passo.

Uma dificuldade experimental é a determinação da equação 3. Em particular, interessa saber qual o comportamento do motor na presença de variações rápidas na posição x , uma vez que, durante uma mudança de marchas, é através de x que se pretende obter uma rotação do motor que permita um embreamento suave e rápido. A rigor, portanto, devemos dispor de dados obtidos durante os transitórios do motor, o que depende de um torquímetro a ser ainda construído, capaz de fazer as medições necessárias.

No momento, sem dados mais adequados, podemos supor que os torques obtidos em regime permanente servirão para um estudo inicial. Fixada uma rotação de trabalho do motor, o torque indicado dependerá unicamente da posição da cremalheira. Para variações não muito grandes na posição da cremalheira, é razoável supor que o torque gerado no transitório corresponde ao valor do torque obtido em regime para a mesma rotação e posição momentânea da cremalheira. Este novo torque é o responsável pela alteração do estado dinâmico do motor, e deve ser recalculado conforme cada nova rotação seja atingida durante o transitório.

O torque T_i também não foi determinado. No entanto, T_g menos T_i dá o chamado torque efetivo T_e , que é o obtido no eixo do motor,

$$T_e = T_g - T_i; \quad (\text{eq. 5})$$

este torque é exatamente o que temos ilustrado na figura 1. Devemos estar atentos pois, quando por qualquer razão o torque indicado for menor que o dissipado internamente ao motor, T_i , o torque efetivo será negativo, contribuindo para parar o motor. Na ausência de dados laboratoriais mais completos, para a confecção do modelo inicial teremos de trabalhar apenas com o torque efetivo não negativo. Os valores do gráfico, para comodidade de uso, devem ser obtíveis através de uma função matemática não muito complexa. Conseguiu-se pesquisar uma função potencial capaz de representar muito bem o torque máximo em cada rotação, como se vê na figura 10; esta função será chamada "função torque máximo".

A seguir, consultando o débito nas rotações e frações do torque máximo constantes nas tabelas do ensaio do motor, tornou-se possível o mapeamento entre débito e torque efetivo em qualquer rotação através de interpolação; o resultado deste mapeamento foi colocado na forma de uma tabela. O débito, por sua vez, pode ser determinado pela geometria do elemento dosador e pela posição da cremalheira. Na verdade, estamos assumindo um modelo bastante simples para determinação do débito, considerando que este, ou mais propriamente a injeção, tem início quando a janela de escape do elemento dosador é fechada pelo êmbolo e termina quando a ranhura do êmbolo abre passagem para a janela. O estudo pormenorizado do processo de

injeção exige a resolução de equações de dinâmica de fluidos, conforme feito por Trielli[1990], e está fora do escopo deste trabalho.

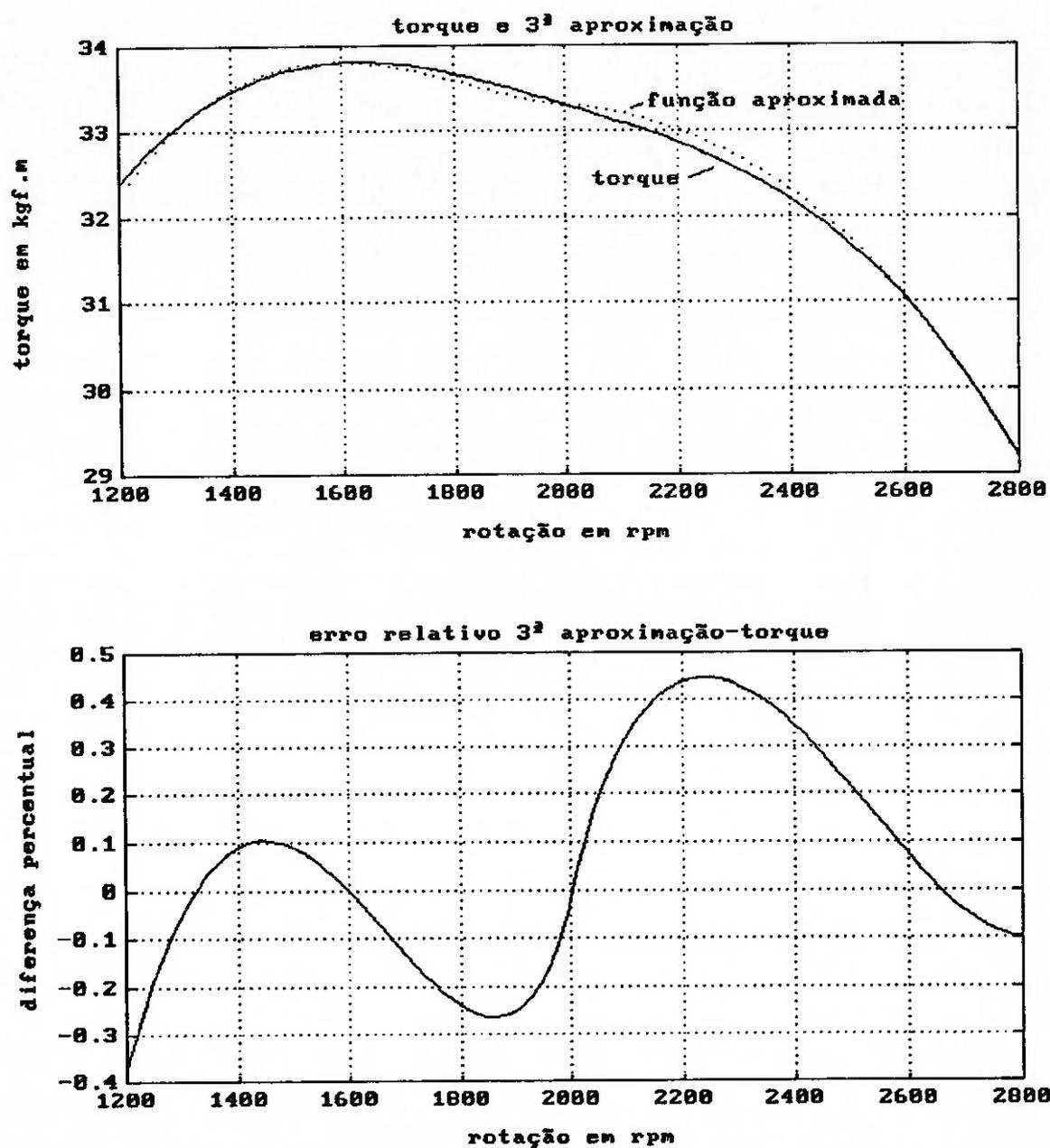


Figura 10: Comportamento da "função torque máximo" ("função 3ª" no gráfico) para aproximação do torque máximo.

MODELO COMPUTACIONAL DO SISTEMA PROPULSOR

Introdução

A avaliação da proposta para troca de marchas automatizada em ônibus será feita através de um programa de simulação. Este programa utiliza diversas rotinas, cada uma representando algum aspecto do sistema propulsor, como a seguir será mostrado. Destacaremos os modelos matemáticos e as hipóteses adotadas, exceto para o motor, discutido no capítulo anterior, que será aqui discutido apenas do ponto de vista computacional.

Consideraram-se os aspectos de automatização que ocorreriam na implementação do controlador que foi idealizado, de modo que o programa simulador permitisse a simulação tanto de um ônibus automatizado conforme nossa proposta quanto de um ônibus convencional.

Cada elemento do sistema propulsor permitiu a elaboração de pelo menos uma correspondente sub-rotina, escrita em linguagem FORTRAN, havendo diversos módulos:

CAMBIO.FOR - modelo de caixa de mudança de marchas;
DINVEI.FOR - esta sub-rotina representa a dinâmica translacional do veículo;
EMBREA.FOR - simula o funcionamento da embreagem;
PARTIDA.FOR - é o programa principal;
RPMRES.FOR - calcula a velocidade angular resultante do motor;
SUPERV.FOR - executa a supervisão da rpm do motor;
TORMAX.FOR - calcula o torque máximo do motor a cada rotação;

TOREXR.FOR - calcula a resultante dos esforços que atuam simultaneamente na roda;
TORQUE.FOR - rotina que fornece o débito de combustível e o torque do motor.

Além destas, há algumas rotinas de aplicação generalizada, tais como nos módulos INTERP.FOR, para interpolação linear, ou GRAF.FOR, para geração de gráficos. As rotinas relativas aos componentes do sistema propulsor, em conjunto com as demais, constituem o "*simulador de sistemas propulsores*" (SSP).

Para uma descrição geral do SSP acompanhemos a figura 11, iniciando pelo bloco superior central, após " β final".

Dado um giro β no elemento dosador da bomba injetora (giro que corresponde a uma posição determinada da cremalheira ou, em última análise, do acelerador), e dada a rotação do motor, calcula-se o débito de combustível; dada a rotação do motor sabe-se qual o torque máximo que pode ser produzido; um mapeamento entre débitos a cada rotação e frações do torque máximo permite a determinação do torque efetivo em regime permanente.

Este torque é o responsável pela aceleração do motor, além de ser em parte fornecido, através da embreagem, para a movimentação do veículo. A rotação resultante do motor permitirá, na próxima iteração, o cálculo do novo débito.

Na embreagem o torque e a rotação de entrada correspondem aos da saída, exceto quando houver escorregamento: neste caso o torque e a rotação "entrando" na caixa de marchas diferem dos que resultaram da dinâmica

do motor. Normalmente o escorregamento da embreagem só ocorre durante as debreagens (desacoplamentos da embreagem).

A caixa de mudanças realiza uma transformação do torque e da rotação entre os eixos de entrada e de saída, e o conhecimento da marcha engatada permitirá decisões de troca automatizada de marchas.

A potência no eixo após a caixa de mudanças permite o cálculo da dinâmica do veículo, a menos de perdas devidas à eficiência da transmissão. Esta dinâmica depende do torque "entrando" nas rodas e do torque necessário para a movimentação em regime, que depende do percurso (inclinação da pista), da aplicação dos freios e da própria velocidade (resistência aerodinâmica).

Ao motorista cabe acelerar ou frear, de acordo com a velocidade desejada e a real, e ainda engatar ou não a ré, conforme seja necessário.

A seleção de marchas pode ser feita pelo motorista ou automatizada; neste caso a escolha será feita com base na velocidade do veículo e na posição do acelerador (β) - a rigor torque motriz na roda, que é definido por β . Durante a troca automatizada de marchas controla-se o acionamento da embreagem de acordo com o seu escorregamento ($rpm-rpm'$), e também se controla o débito de combustível.

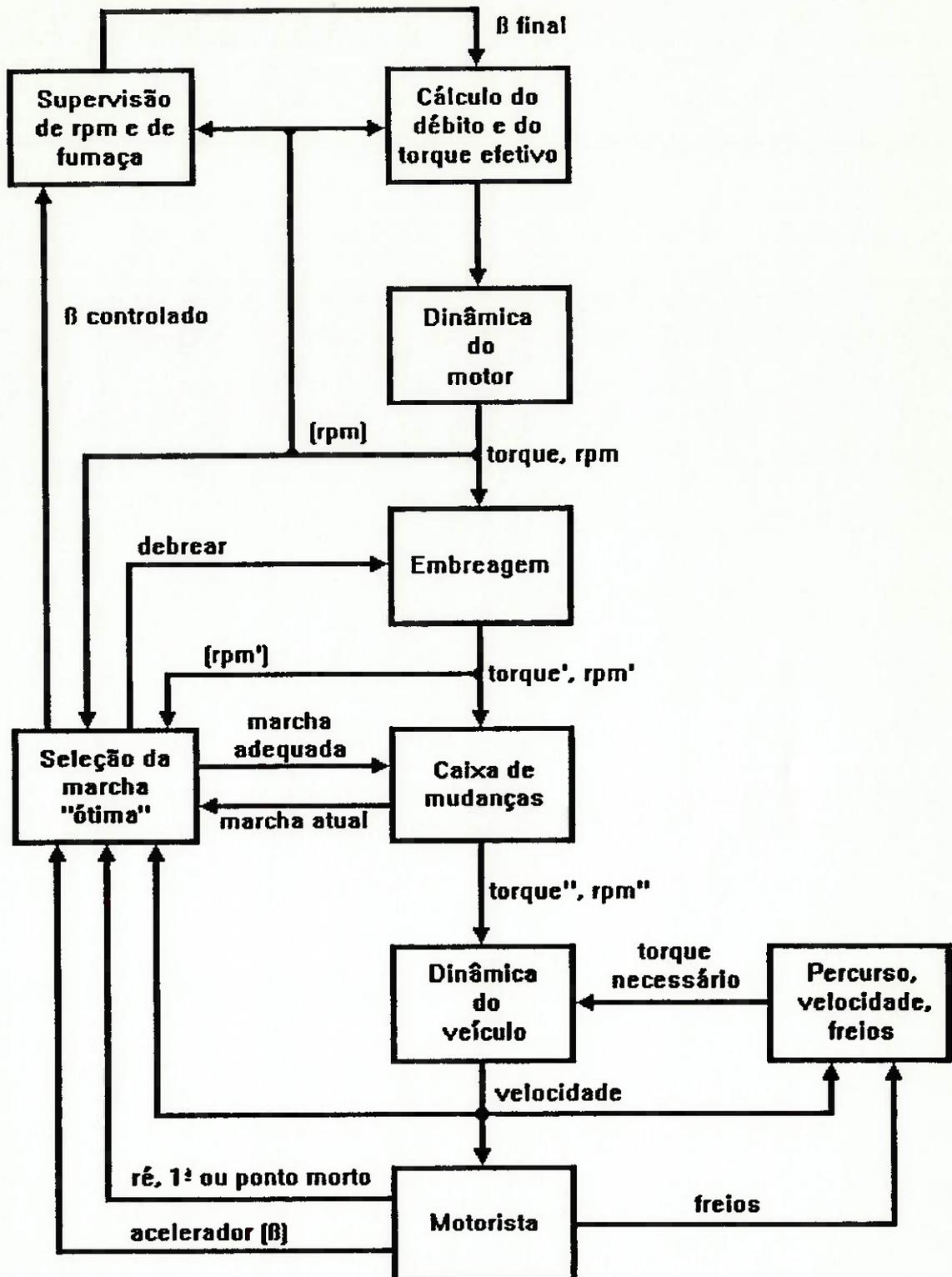


Figura 11: Esquema do algoritmo do SSP.

A supervisão do giro β visa evitar velocidades excessivas no motor, regular sua marcha lenta e, nas trocas

de marcha, comandar adequadamente a velocidade do motor. Podem-se embutir ainda critérios para evitar fumaça devida a excesso de combustível nos transitórios.

Apresentação das rotinas

Teremos a seguir uma descrição mais detalhada destas rotinas do programa simulador. São considerados os aspectos da dinâmica dos componentes, individualmente, e do veículo como um todo.

Conforme as necessidades, qualquer destas rotinas pode ser aperfeiçoada ou simplificada, ou ainda podem ser criadas rotinas adicionais, permitindo adaptar o programa para diferentes situações. Um exemplo seria a substituição da embreagem, que é a disco seco, por um conversor de torque hidráulico, ou a troca do motor diesel por um à gasolina, com carburação, cujo comportamento dinâmico é bem diferente.

a- Caixa de Mudança de Marchas (trem de propulsão)

A caixa de mudanças é modelada pela rotina CAMBIO.

O papel da caixa de marchas é promover a transformação da velocidade e do torque entre os seus eixos de "entrada" e de "saída". No caso do ônibus que vamos estudar temos cinco marchas à frente e uma à ré, além do ponto morto, naturalmente.

Conforme a marcha selecionada para uso, escolhe-se a relação de transmissão correspondente e multiplicam-se os valores de torque e rotação na entrada para se obterem os valores na saída. Chamando-se por TAU o torque e por OMEGA a velocidade angular, e indicando pelos índices e e s respectivamente os valores na entrada e na saída, e chamando por r_n a relação de transmissão da n -ésima marcha, temos:

$$\text{OMEGA}_e = r_n \cdot \text{OMEGA}_s ,$$

e

$$\text{TAU}_s = r_n \cdot \text{TAU}_e \cdot \text{ETA}_n ,$$

onde por ETA_n estamos representando o rendimento mecânico da n -ésima marcha. Este rendimento pode ser pré-definido para cada marcha, ou dado por funções matemáticas; Cho[1987], no entanto, adota $\text{ETA} = 100\%$ em suas simulações, sem nenhum prejuízo nos resultados.

Estamos assumindo que não há folgas entre os dentes da engrenagem, e que as engrenagens e os eixos são rígidos,

A relação de ré é negativa, invertendo o sentido convencional da rotação e do torque.

Por comodidade, a relação de transmissão do câmbio já é multiplicada pela relação de transmissão do diferencial nesta rotina. Os valores das respectivas relações, no entanto, permanecem independentes, podendo ser alterados conforme seja necessário.

Sendo os eixos rígidos, e considerando as relações de transmissão da caixa de mudanças e do diferencial de uma só vez, CAMBIO equaciona todos os efeitos entre a embreagem e as rodas motrizes, e portanto representa todo o trem de propulsão.

A combinação de todas as alternativas de câmbio e de relações de diferencial disponíveis para um certo veículo, inclusive, pode permitir, com as simulações do SSP, a determinação da melhor opção para certo percurso e condições de trânsito, similarmente ao citado em Engine[1981], Computers[1979] e Setz[1960].

O modelo, como um todo, não considera as diferenças de velocidade e torque entre as rodas motrizes que podem ocorrer pela ação do diferencial em curvas, terrenos escorregadios ou atolamentos. Este efeito é irrelevante para o escopo do simulador, e o módulo CAMBIO.FOR não o equaciona.

A menos do papel da embreagem, portanto, CAMBIO relaciona diretamente as rotações e torques do motor e das rodas motrizes.

b- Embreagem

A sub-rotina EMBREA reproduz o papel da embreagem, conectando os eixos do motor e do câmbio. A embreagem analisada é do tipo de disco seco.

Normalmente, a embreagem está acoplada, e seus eixos de entrada e saída atuam como sendo um único eixo, rígido; a exceção ocorre ao se tentar a transmissão de um torque além da capacidade, plena ou parcial, da embreagem, quando ocorre escorregamento e as velocidades dos eixos diferem.

No caso de acoplamento apenas parcial, como ocorre durante as trocas de marcha, o torque transmissível é diretamente proporcional ao produto do "grau de aplicação" da embreagem pelo torque transmissível máximo. O grau de aplicação é definido como a fração entre a força normal entre disco e platô da embreagem parcialmente aplicada e a força normal quando a embreagem está totalmente acoplada. Portanto, o grau de aplicação para acoplamento máximo é 1, e menor que 1 em outros casos; quando for 0 a embreagem estará totalmente desacoplada. Sendo τ_{max} o torque transmissível máximo, G_a o grau de aplicação, τ e ω o torque e a velocidade angular, e com os sub-índices e para entrada e s para a saída na embreagem, temos:

$$\tau_s = G_a \cdot \tau_{max} \text{ se } \tau_e > G_a \cdot \tau_{max} \text{ ou } \omega_e \neq \omega_s$$

ou

$$\tau_s = \tau_e \text{ se } \tau_e \leq G_a \cdot \tau_{max} .$$

Note-se que a relação entre o grau de acoplamento e a posição do pedal ou do garfo da embreagem pode ser determinada em bancada ou por estudos geométricos.

A dinâmica do embreamento, durante as trocas de marcha, foi modelada com a seguinte hipótese simplificadora: o torque responsável pela aceleração do

disco da embreagem, eixo primário (eixo de entrada) e eixo intermediário do câmbio provém do veículo^{*5} e praticamente não afeta seu respectivo estado cinemático. O modelo baseado no grau de embreamento, apesar de sua simplicidade, mostrou-se bastante satisfatório para as simulações. O tempo gasto na aceleração da embreagem é bem pequeno, e podemos considerar que fica "embutido" no tempo de acoplamento da mesma. No SSP o acoplamento da embreagem é gradual, havendo acréscimos no grau de aplicação proporcionais ao produto do incremento de tempo da simulação por "fatores de aplicação da embreagem"; há três destes fatores, cada um para uma certa faixa de valores de escorregamento da embreagem, de modo que o acoplamento possa ser inicialmente mais lento e depois, quando o escorregamento for menor, mais rápido. Os fatores de aplicação são dados para a simulação, constando no parágrafo "dados diversos para a simulação" do arquivo de dados para o processamento, comentado a seguir.

c- Dados para Processamento

A versatilidade da simulação tornou-se maior com a adoção de um "arquivo descritivo" contendo vários dados e

*5Durante a mudança de marcha a embreagem se desliga do motor, há uma fase de sincronização entre as partes rotativas do câmbio e então uma nova relação de transmissão se estabelece entre os eixos primário e secundário, conectando-os. Este último eixo está solidário com as rodas do veículo, considerando-se a relação de transmissão do diferencial. Só ao final da mudança é que a embreagem se conecta ao motor.

todos os parâmetros a serem empregados no processamento. Desta forma fica mais fácil realizar diferentes simulações sem que seja necessário alterar e recompilar o programa simulador (como ocorria no início), o que facilita a comparação de resultados. No caso de alteração em algum parâmetro e/ou variável basta alterar o respectivo valor no arquivo descritivo, usando-se um editor de textos.

Alguns outros dados, como os ganhos do piloto automático, o perfil de velocidades desejado, ou o intervalo de tempo para solução das equações de movimento, são solicitados interativamente pelo programa principal no início da simulação, para maior comodidade, pois são dados que normalmente variam entre as diferentes "corridas"; já o arquivo descritivo é lido pela rotina DADPRO.

Nos apêndices A e B podemos ver resultados de processamentos do SSP; nestes resultados temos embutida uma cópia do arquivo descritivo.

d- Motor

O motor, por sua complexidade, está composto por diversas rotinas. Os detalhes não computacionais podem ser encontrados no capítulo de seu modelo dinâmico.

A sub-rotina TORMAX fornece o torque máximo do motor em cada rotação, empregando-se para isto a "função torque

máximo". Como parâmetro de entrada basta a rotação do motor.

A sub-rotina TORQUE calcula, em função do curso da cremalheira da bomba injetora*⁶, o débito de combustível a ser queimado. Com base nos resultados de ensaios dinamométricos do motor, a rotina determina, através de interpolações lineares, qual a fração do torque máximo correspondente ao estado do motor, fornecendo o torque efetivo real após chamar TORMAX.

A consideração da dinâmica do motor é feita pela rotina RPMRES, que indica a rotação resultante do motor para a próxima iteração utilizando o método de Euler de primeira ordem (método do trapézio). No caso de o motor e o veículo estarem perfeitamente acoplados pela embreagem, o programa principal calcula o momento de inércia do veículo, associa-o ao do motor, e RPMRES calcula a dinâmica resultante.

Alguns dados numéricos para a simulação do motor poderiam ser mais exatos, dependendo da realização de medições e ensaios dinamométricos mais completos para poder aperfeiçoá-los, em particular quanto a possíveis efeitos de transitórios do motor:

- quanto à bomba injetora, a ação de seu regulador centrífugo está sendo desprezada (bomba Bosch tipo PE com regulador RQ), visto que o regulador é projetado para ter pequena atuação fora das situações de marcha lenta e de alta rotação (Robert[s.d.]). Ensaios

*⁶Na verdade, em função do giro do elemento dosador, que é função linear do curso da cremalheira.

específicos para a determinação das propriedades dinâmicas deste regulador foram planejados para verificarmos a validade desta hipótese;

- em relação a versões iniciais do SSP, alguns valores numéricos de simulação foram modificados na tabela de correspondências entre débitos e frações do torque máximo, chamada de TABMOTOR.DAT para o particular ônibus simulado. Esta tabela é consultada pelo SSP no início do processamento, e foram alterados apenas os dados relacionados ao efeito de freio-motor, aumentando-se empiricamente este efeito. Este tipo de fenômeno exigiria ensaios dinamométricos mais elaborados, inclusive com equipamentos inexistentes no laboratório. Considerando-se que agora o modelo de bomba injetora está fornecendo sempre um débito mínimo pelo menos igual ao da regulagem de marcha lenta, ao passo que antes o débito se anulava quando não se exigia potência do motor, o efeito da alteração em TABMOTOR.DAT fica de certa forma contrabalançado; além disso, os maiores valores de consumo, em valores absolutos, ocorrem quando se exigem potências elevadas do motor, e para estes casos a tabela permanece a mesma. Admitiremos então que quaisquer erros resultantes do estudo deficiente da marcha lenta ou freio-motor, portanto, devem ser de segunda ordem, não invalidando os resultados e comparações feitas com os dados do motor atualmente disponíveis para consulta pelo SSP.

Ainda quanto aos transitórios, note-se que alguns programas simuladores de desempenho já existentes utilizam dados de regime permanente, conseguindo bons resultados em relação a medições reais (DeLosh[s.d.], Mazurek[1980]), mesmo quando se deseja a simulação de fenômenos muito mais complexos e rápidos que dependem bastante de efeitos nos transitórios, como é o caso de DeLosh[s.d.].

e- Rodas

Sobre as rodas podemos ter, às vezes simultaneamente, diversos esforços: frenagem, torque motor, resistência ao rolamento dos pneus. A sub-rotina TOREXR considera todos

estes efeitos e fornece a sua resultante, que pode ser a favor ou contra o movimento.

Para incluir de uma só vez outras forças de oposição ao movimento, TOREXR considera ainda os efeitos da resistência aerodinâmica ao movimento e o do peso do veículo quando não estivermos em pista horizontal. Para isto, o programa principal chama a rotina RUA.FOR, que lê as declividades do percurso nos arquivos correspondentes; tais arquivos possuem a extensão .RUA.

Temos então, para a parcela de resistência aerodinâmica,

$$Fd_a = c.v^2,$$

sendo Fd_a a força de oposição ao movimento, v a velocidade do veículo (supomos que não há vento para um observador imóvel) e c uma constante de resistência aerodinâmica que já considera a área frontal do veículo. A hipótese de não haver vento não gera grandes dificuldades uma vez que as próprias normas para ensaios de avaliação de consumo em campo exigem que os ventos sejam de baixa intensidade e que, caso existam, se procure fazer um percurso a favor e outro contra o vento. Com a hipótese de vento nulo obviamente não existem efeitos de ventos laterais (oblíquos) que devam ser considerados pelo SSP.

A parcela de resistência devida à declividade da pista é dada por:

$$Fd_d = M.g.\text{sen}(\text{Teta}_r),$$

onde M é a massa do veículo, g a aceleração local da

gravidade e $Teta_r$ o ângulo da pista com a horizontal, com valor positivo para subidas, de modo que a força Fd_d de resistência tende a mover o veículo em ré numa subida.

A força Fd_f de frenagem é das mais simples:

$$Fd_f = A_f \cdot Ff_{max},$$

onde A_f é o valor da aplicação do freio e Ff_{max} a força máxima de frenagem. A aplicação do freio varia entre 0 e 1, sendo estes valores os limites correspondentes aos casos de pedal totalmente solto e totalmente pisado. Não se considera o eventual travamento das rodas, mas para isto a força seria apenas a do atrito de escorregamento dos pneus no solo.

A resistência ao rolamento dos pneus, Fd_p , é dada por:

$$Fd_p = M \cdot k \cdot g \cdot \cos(Teta_r),$$

sendo M , g e k respectivamente a massa do veículo, a aceleração da gravidade e um coeficiente de resistência ao rolamento dos pneus, e $Teta_r$ é o ângulo da pista com a horizontal. O fator k depende do pneu, considerado a pressão constante; o produto dos outros fatores dá a força normal entre solo e pneu.

A força total de resistência ao movimento, Fd , é dada pela soma das parcelas:

$$Fd = +/- Fd_a - Fd_d +/- Fd_f - Fd_p,$$

tomando-se os sinais que representem oposição ao movimento; a velocidade V e a força de resistência Fd são consideradas positivas se são "para a frente".

Se o veículo estiver numa rampa, imóvel mas insuficientemente frenado, a força F_d tirará o veículo da imobilidade; isto é feito pelo SSP para que se possa considerar adequadamente uma pista que contenha subidas e descidas.

No SSP não consideramos eventuais escorregamentos dos pneus em relação à pista (frear travando as rodas, arrancadas violentas, pista escorregadia, etc.) pois estes fenômenos não interessam para os propósitos do simulador.

f- Dinâmica do Veículo

Depois de determinar o torque resultante nas rodas, calcula-se a aceleração sobre o veículo e a correspondente variação de velocidade através da rotina DINVEI. Utiliza-se o método de Euler, da mesma forma que em RPMRES para o caso do motor; assim, sendo Alfa a aceleração, Δt o incremento de tempo da simulação e $V[t]$ a velocidade no instante t , temos:

$$V[t+\Delta t] = v[t] + \text{Alfa} \cdot \Delta t .$$

É importante não se esquecer que, conforme a embreagem esteja ou não acoplada, as dinâmicas do motor e do veículo serão ou não independentes. Daí a necessidade tanto de RPMRES quanto de DINVEI, esta última apenas para o caso da dinâmica do veículo não estar relacionada à do motor; isto

ocorre sempre que houver escorregamento na embreagem ou quando o veículo se move em ponto morto.

g- Supervisão de Rotação do Motor

A rotina SUPERV basicamente cuida do controle da rotação do motor, evitando uma rotação acima da máxima ou regulando a marcha lenta. Neste aspecto seu papel é semelhante ao do regulador centrífugo acoplado à bomba injetora; vale lembrar que este regulador será eliminado nos ônibus automatizados.

Inclui-se ainda um controle do débito para o eventual seguimento de uma rotação comandada. Isto é aproveitado durante as mudanças de marcha, quando o programa principal prevê a rotação ideal do motor para um embreamento suave e rápido.

Chamando por $TETA_d$ a velocidade desejada para o motor (que pode ser o limite de rotação máxima, por exemplo), $TETA_r$ a velocidade real e P_{crem} a posição da cremalheira da bomba injetora, temos:

$$P_{crem}[t+DeltaT] = P_{crem}[t] + (TETA_d - TETA_r) \cdot C,$$

onde $[t]$ indica o valor tomado no instante t da simulação e o ganho C , com valores para três diferentes faixas de erro na rotação desejada, permite controlar a resposta no posicionamento da cremalheira de forma rápida mas sem causar instabilidades. Os valores para C são especificados no parágrafo "Dados para supervisão do motor e para o

piloto automático" do arquivo de dados de entrada (arquivo descritivo).

h- Seleção de Marchas

Foi estudado um critério para a seleção otimizada das marchas permitindo, em qualquer situação de deslocamento do veículo, o funcionamento do motor nas condições de rendimento mais elevado. Este critério está implementado pelas rotinas MUDOTI e MAROT.

A escolha das marchas baseia-se numa análise prévia, cujos resultados (as marchas ideais) foram mapeados como função da velocidade do veículo e do torque motor atuando na roda; tal análise consistiu simplesmente em verificar, dada uma certa velocidade e torque motor na roda, qual a marcha que permitia ao motor trabalhar em condições de menor consumo específico, quando mais de uma marcha era viável para as condições na roda e limites de operação do motor. O torque atuando na roda é de difícil medição na prática, mas pela rotina TORQUE e pela relação de transmissão pode-se determinar seu valor. Num caso real de ônibus automatizado, o conhecimento das condições de operação do motor também permite a avaliação do torque motriz na roda. MAROT é capaz de indicar a melhor marcha ("marcha ótima") para uma dada situação graças ao mapeamento da análise prévia.

Para evitar a mudança freqüente de marchas quando em situações "limite" consideram-se histereses, tanto no torque quanto na velocidade. Assim, se a velocidade do veículo aumenta só um pouco e isto acarreta uma indicação para troca de marchas, digamos da segunda para a terceira, a redução da velocidade à situação anterior não levará obrigatoriamente à seleção da segunda marcha.

Os valores das histereses entre duas marchas quaisquer podem ser diferentes, conforme tenha ocorrido um aumento ou redução da marcha, e variam de acordo com o par de marchas envolvido. Estes valores podem ser alterados no arquivo de dados do veículo simulado. Sua determinação deve atender a dois princípios antagônicos: permitir a troca de marchas de forma a fazer o veículo andar sempre com a maior eficiência e, ao mesmo tempo, impedir trocas de marchas muito freqüentes. MUDOTI seleciona os valores de histerese correspondentes à marcha em uso e repassa estes valores na consulta a MAROT. A escolha de valores adequados para as histereses é empírica: podem-se mudar valores e comparar os resultados de diversas simulações, mantendo as outras condições idênticas, para se chegar aos melhores resultados.

O programa só realizará a troca de marchas no caso de uma nova marcha ser constantemente indicada como ideal por um certo intervalo de tempo, chamado "tempo de permanência", procurando assim evitar mudanças para marchas que sejam relativamente instáveis; esta indicação

"duradoura" para mudança considera as histereses que comentamos e é verificada por MUDOTI.

Uma economia de combustível maior pode ser conseguida com um mapeamento mais preciso do motor, o que depende essencialmente de ensaios dinamométricos mais detalhados que o usado neste trabalho (ver Barker[1982]). A economia de combustível tende a reduzir a quantidade de poluentes gerados, mas para uma redução mais efetiva da poluição o ensaio dinamométrico deveria fornecer também os dados de emissões poluentes, que seriam então considerados para otimização das mudanças de marcha.

O SSP dispõe, para permitir maior flexibilidade e especialmente para comparações de resultados, de um módulo alternativo para seleção de marchas, RECMER.FOR; em particular implementou-se a "recomendação do fabricante" (no caso a Mercedes-Benz), procurando manter o motor sempre numa certa faixa de rotações correspondendo à "zona verde" existente nos tacômetros dos ônibus. Graças a isto pode-se comparar a economia conseguida com o critério otimizado de troca automática por nós proposto e o consumo obtido por um critério usual adotado por bons motoristas.

O SSP está preparado inclusive para trocas de marchas seguindo um cronograma pré-estabelecido (rotina MUDTEM), o que permite comparações entre simulações computacionais e resultados reais; obviamente nestes casos o cronograma deverá ser estabelecido em função das mudanças feitas nos

ensaios, a serem comparados com as simulações realizadas a posteriori.

i- Programa Principal

PARTIDA.FOR é o programa principal propriamente dito.

Seu papel é realizar a interação coerente entre as diversas rotinas, permitindo ainda a simulação do funcionamento normal do veículo sob a ação de um motorista (que atualmente é apenas o "piloto automático"), de modo a ser possível desenvolver e avaliar um método adequado de controle do sistema propulsor sem a necessidade de protótipos, pelo menos durante as fases iniciais do projeto.

Os resultados da simulação podem ser mostrados na tela, impressos ou ainda armazenados em arquivos; estas opções de saída podem ser simultâneas. Os tipos de processamento incluem resultados numéricos e gráficos ou só resultados numéricos; desejando-se apenas gráficos devem-se gravar os resultados em algum arquivo, com antecedência. Este procedimento visa uma maior comodidade ao eliminar a necessidade de se aguardar o tempo de processamento; os gráficos podem ser examinados na tela antes de serem impressos, por exemplo, ou podem ser vistos de uma vez após uma longa simulação. Os arquivos de resultados podem atingir grande tamanho.

No caso dos resultados numéricos mostrados na tela, apresenta-se um "painel de instrumentos" que mostra de forma bem prática o desenrolar da simulação: indica o tempo transcorrido, velocidades do veículo e desejada (que é a referência para o piloto automático), marcha usada, rotação do motor, condições de operação, etc. O aspecto deste painel pode ser apreciado na figura 12.

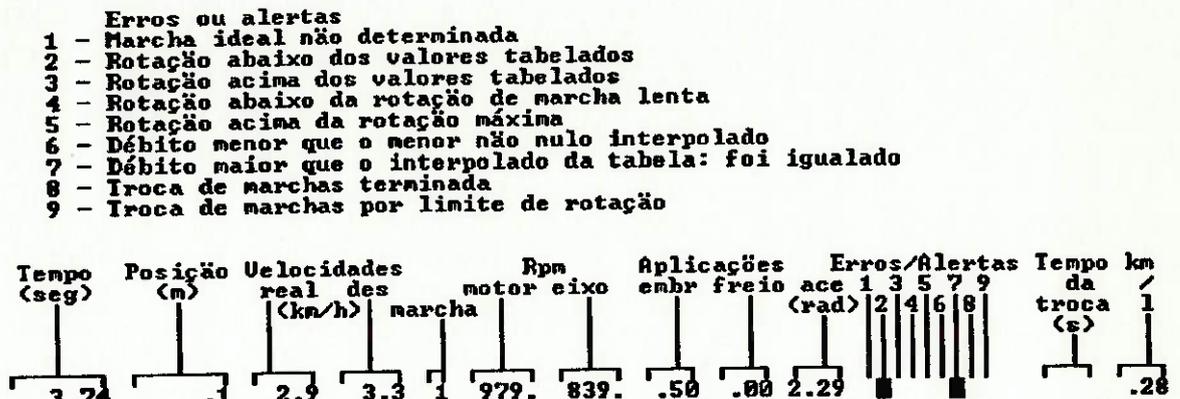


Figura 12: "Painel de instrumentos" da tela de simulação do SSP.

A quantidade de dados compartilhados entre o programa principal e as diversas sub-rotinas levou à criação de diversos blocos "COMMON". Temos ainda um "block data", DADOS.FOR, que inicializa o mapeamento para seleção da marcha mais adequada.

No caso de troca otimizada de marchas, a rotina MAROT indica a marcha de modo a permitir uma mudança pelo próprio programa, automaticamente; na hipótese de uso de um "joystick" a troca de marchas poderia ser solicitada ao "motorista", que poderia acatar ou não as indicações que MAROT, neste caso, poderia fazer através da tela do SSP.

Durante a mudança de marchas, o acionamento da embreagem foi escolhido como sendo gradual e proporcional ao incremento de tempo da simulação, como já foi explicado; este acionamento automático está sendo feito pelo programa principal, por comodidade, permitindo que a ação do piloto automático se dê apenas nos "pedais" do acelerador e do freio. O piloto poderia fazer o acionamento da embreagem, bastando que o programa tivesse mais algumas variáveis em blocos "common".

Ao "final do percurso" o programa pára o veículo e, após este ter parado, "desliga" o motor. O final do percurso está sendo indicado atualmente por uma velocidade de 50 km/h em ré no arquivo de velocidades; como esta é uma condição absurda, o piloto automático reconhece que se trata do final da simulação e procede adequadamente.

A simulação de trechos percorridos com marcha à ré também pode ser feita sem dificuldades. O programa principal é responsável pela "sinalização" adequada para que o piloto automático engate a primeira marcha ou a ré, conforme o caso, desde que a velocidade desejada ultrapasse um valor, em módulo, maior que um mínimo pré-estabelecido. As demais marchas são selecionadas por rotinas específicas (MUDOTI e MAROT, RECMER, MUDTEM).

Na versão atual do SSP podemos encontrar as seguintes características:

- a) um ganho integral para as desacelerações independente do ganho para acelerações, o que permite ao piloto automático dirigir com maior suavidade e

precisão - um único ganho para as duas ações não permitia uma boa dirigibilidade com o piloto automático;

b) variáveis para impressão de estatísticas da simulação, tais como velocidade e consumo médios, trocas de marchas e respectivos desempenhos, tempo em marcha lenta, etc., facilitando sobremaneira a análise dos resultados;

c) cálculo de consumos instantâneos de combustível em km/l;

d) adoção de algoritmos para lidar com problemas de embreamento que decorrem da solução por método numérico (solução discretizada no tempo) da respectiva equação diferencial - em versões anteriores do SSP era comum as rotações do motor e do eixo piloto ficarem oscilando, por um tempo considerável, em torno do valor que seria obtido ao final das mudanças de marcha (ver exemplo - não dos piores casos! - na figura 13);

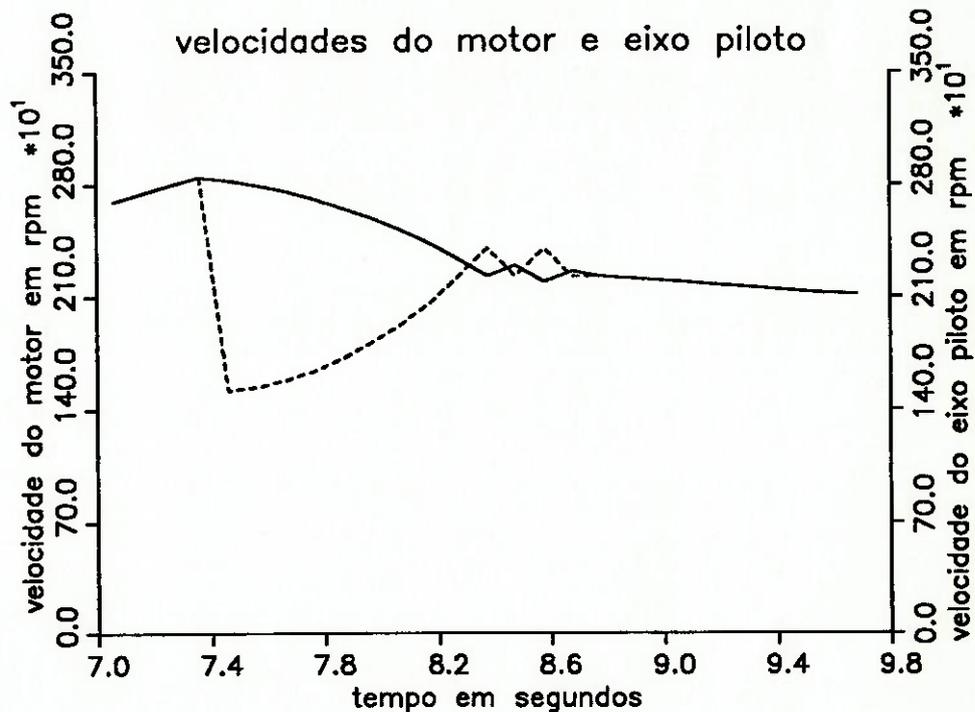


Figura 13: Exemplo de problemas de embreamento que ocorriam em versões primitivas do SSP (detalhe).

e) troca de marchas por limites máximo e mínimo de rotação do motor, independentemente do critério de mudança escolhido; é uma forma adicional de segurança

ao evitar condições inadequadas de funcionamento do motor;

f) definição das histereses para seleção otimizada de marchas fora do programa principal, na inicialização de variáveis através do arquivo descritivo.

j- Simulação de um Motorista

A interação entre "motorista" e programa deveria idealmente ser feita através de "joystick". Como isto não foi possível, o programa conta com rotinas e arquivos de dados que permitem a simulação de um motorista em situações diversas e usuais; na verdade, o "piloto automático" que fizemos, graças à repetibilidade de seu comportamento, acaba sendo muito útil para testes e comparações de estratégias de controle do sistema propulsor. Outra vantagem do piloto automático é a sua comodidade para simulações mais demoradas ou feitas em "batch"; poderia ser ainda que o uso de "joysticks" acabasse resultando problemático no caso de o equipamento não permitir uma simulação em tempo real: o "motorista" poderia perder a noção do que aconteceria sob seu comando.

O "piloto automático" é constituído pelos módulos PILOTO.FOR e VELDES.FOR, que permitem a simulação de um veículo percorrendo um percurso qualquer com velocidades especificadas, pré-determinadas. Assim, mesmo sem dispormos de "joysticks", o que permitiria uma flexibilidade muito maior, sem dúvida, pudemos verificar, ao desenvolver o modelo, qual o seu funcionamento nas operações de acelerar

o motor, acionar a embreagem, efetuar troca de marchas, andar por inércia ou frear, etc.

A sub-rotina PILOTO corresponde a um piloto automático com dois ganhos integrais, um para acelerações e outro para frenagens, de modo que as acelerações e as desacelerações possam ter diferentes respostas. O funcionamento em rampas e no caso de marcha à ré também é possível e já foi simulado.

Cabe a esta rotina, ainda, "engatar" a primeira marcha (ou a ré) para tirar o ônibus da imobilidade. Além disso, o piloto pode frear aproveitando freio-motor ou em ponto morto, observando condições pré-estabelecidas para cada caso.

Para "acionar" o veículo o programa principal chama a rotina VELDES, que lê no arquivo de velocidades do percurso a velocidade desejada para o instante de simulação - se necessário, VELDES realiza uma interpolação linear - e a transmite como parâmetro à rotina PILOTO, que atua no acelerador ou no freio, conforme a situação. Os arquivos de velocidades têm o aspecto de uma matriz de duas colunas, sendo a primeira a dos tempos e a segunda a das correspondentes velocidades desejadas; sua extensão é .VEL. Como o regulador de velocidade da bomba injetora não atua a não ser em marcha lenta ou máxima rotação, nas demais condições as posições do acelerador correspondem bi-univocamente a posições da cremalheira na bomba.

l- Interpolação Linear

A sub-rotina INTERP é chamada por várias outras, e sua função é realizar interpolações ou extrapolações lineares, dependendo dos valores de entrada.

m- Relatório de Processamento

Outra característica existente no simulador é a emissão de um relatório da simulação, anexado ao final dos resultados de processamento. O relatório também pode ser mostrado, na tela ou na impressora, no caso de se desejarem apenas os gráficos.

O relatório contém o arquivo descritivo, além de outros dados importantes, como a versão das sub-rotinas, permitindo avaliar a influência de variações dos dados, dos parâmetros e dos algoritmos nas simulações. Isto facilita a comparação de diferentes resultados, especialmente daqueles obtidos em datas bem diferentes e/ou com diferentes versões do SSP.

Para completar, o relatório de processamento mostra algumas estatísticas úteis sobre os resultados da simulação, que já foram comentadas no item "Programa Principal".

No final deste trabalho temos dois destes relatórios de processamento para comparação de alguns dos resultados obtidos (Anexos A e B).

n- Geração de Gráficos

Para a geração de gráficos temos no total três módulos: PROGR0.FOR, PROGR2.FOR e GRAF.FOR.

A indicação para a elaboração dos gráficos desejados e dos dispositivos escolhidos para saída é feita pelo programa principal, que solicita estas informações ao operador no início da simulação. A correta inicialização das restantes variáveis para geração de gráficos é realizada pela rotina PROGR0.

Todos os gráficos apresentam os resultados para um minuto da simulação, com pontos espaçados a cada décimo de segundo, pelo menos, independentemente de se usar um menor incremento de tempo para resolução numérica das equações diferenciais do movimento.

No caso de uso da impressora ou traçador gráfico, a montagem e/ou colagem (feita posteriormente) de gráficos sucessivos fica facilitada por haver uma margem, no início de cada gráfico, que reproduz os dez segundos finais do minuto anterior de simulação, facilitando assim a correta superposição dos gráficos. Esta margem também aparece nos gráficos feitos na tela, de modo a permitir uma interpretação dos resultados sem solução de continuidade.

O tratamento dos dados para produzir gráficos é feito pela rotina PROGR2, que os separa adequadamente conforme o respectivo minuto de simulação. Quando os dados estão devidamente preparados, "preenchendo" um minuto de

simulação (na verdade, um minuto mais os dez segundos imediatamente anteriores), há chamadas da rotina GRAF, que efetivamente gera os gráficos desejados. É nestas chamadas que são especificados os títulos, os tamanhos e os nomes dos eixos, entre outros. São possíveis dois eixos de ordenadas, para o caso de gráficos simultâneos, distinguíveis pelo tipo de traço e cor de cada um. GRAF simplesmente faz uma série de chamadas a rotinas de biblioteca gráfica compatível com programas escritos em FORTRAN (ver Young[1986]).

AVALIAÇÃO DO SSP

Agora iremos avaliar alguns resultados obtidos pelo Simulador. Limitar-nos-emos a análises qualitativas para validar o programa simulador quanto à dinâmica da troca de marchas, já que uma validação rigorosa depende de se obter e instrumentar um veículo especialmente para testes, só então permitindo a comparação quantitativa entre os resultados reais e os simulados.

A análise quantitativa que podemos fazer entre resultados de simulação e resultados reais refere-se ao consumo de combustível.

Lembramos que os resultados a seguir estão sendo obtidos pelo piloto automático, cujo objetivo é tentar seguir um perfil de velocidades desejado.

Troca de marchas

Considerando que pretendemos estudar os efeitos das trocas de marcha no desempenho dos veículos, um resultado fundamental para este simulador de sistemas propulsores com caixa de câmbio, evidentemente, é o das mudanças de marcha. Comentemos então as figuras 14 a 17, representativas dos resultados obtidos.

O veículo parte do repouso, acelera até uns 50 km/h e reduz gradualmente a velocidade até parar novamente (figura 14).

Assim que a velocidade desejada é compatível com a menor que o veículo puder desenvolver, o piloto coloca a primeira marcha; vê-se que:

- no instante "A" da figura 16, antes de engatar a marcha, a embreagem está em "1", ou seja, plenamente aplicada, passa a "0" no momento do engate, quando o "motorista" aciona o pedal, e então o piloto aumenta gradualmente a aplicação para iniciar o movimento do veículo;

- em "A" da figura 15 a rotação do eixo piloto, que é a mesma do disco da embreagem, acompanhava a do motor, passa a zero com o engate da primeira marcha, pois o ônibus está parado, e sobe, escorregando em relação ao motor, acompanhando o movimento do ônibus (aumento rápido de velocidade - ver figura 14); o escorregamento cessa quando se atinge a rotação do motor. Neste ponto a aceleração do veículo é a que o motor consegue imprimir;

- para que o ônibus acompanhe (o que não consegue) a velocidade desejada, o acelerador vai sendo aos poucos cada vez mais pisado, o que implica num giro crescente do elemento dosador da bomba injetora (figura 17).

Nos aumentos de marcha seguintes (instantes B, C, D e E) temos:

- no instante do engate da nova marcha pisa-se na embreagem (figura 16) e então se a solta gradualmente;

- a rotação da embreagem cai, mas sem atingir zero, uma vez que o ônibus já se encontra em movimento, pois como a nova relação de transmissão é menos reduzida, para uma mesma velocidade do veículo a rotação do motor (e da embreagem) deve ser menor; a rotação da embreagem passa a subir e a do motor a cair até que as duas se igualem e cesse o escorregamento, figura 15;

- ainda no instante do novo engate, o piloto tira o pé do acelerador, favorecendo a necessária redução de velocidade do motor (figura 17).

Algo análogo acontece nas reduções de marcha F, G, H e

I:

- pisa-se na embreagem ao reduzir a marcha;
- a rotação da embreagem passa a ser maior que a do motor, durante a fase de escorregamento, já que a nova relação de transmissão (após o engate) é mais reduzida;
- o piloto não pisa no acelerador, aproveitando o efeito de freio-motor para reduzir a velocidade do ônibus (instantes que precedem F, G, H e I na figura 17); quando o acelerador é acionado é porque deseja-se acelerar o motor para favorecer a redução da marcha; tal atitude, que é tomada pelo programa principal (através do controle de velocidade do motor), pode ser modificada.

Note-se que ao tirarmos a primeira marcha não temos propriamente uma redução, não havendo necessidade de embreamento (na simulação mostrada a redução passa muito pouco tempo pela primeira marcha, o que não aparece devido à resolução do gráfico).

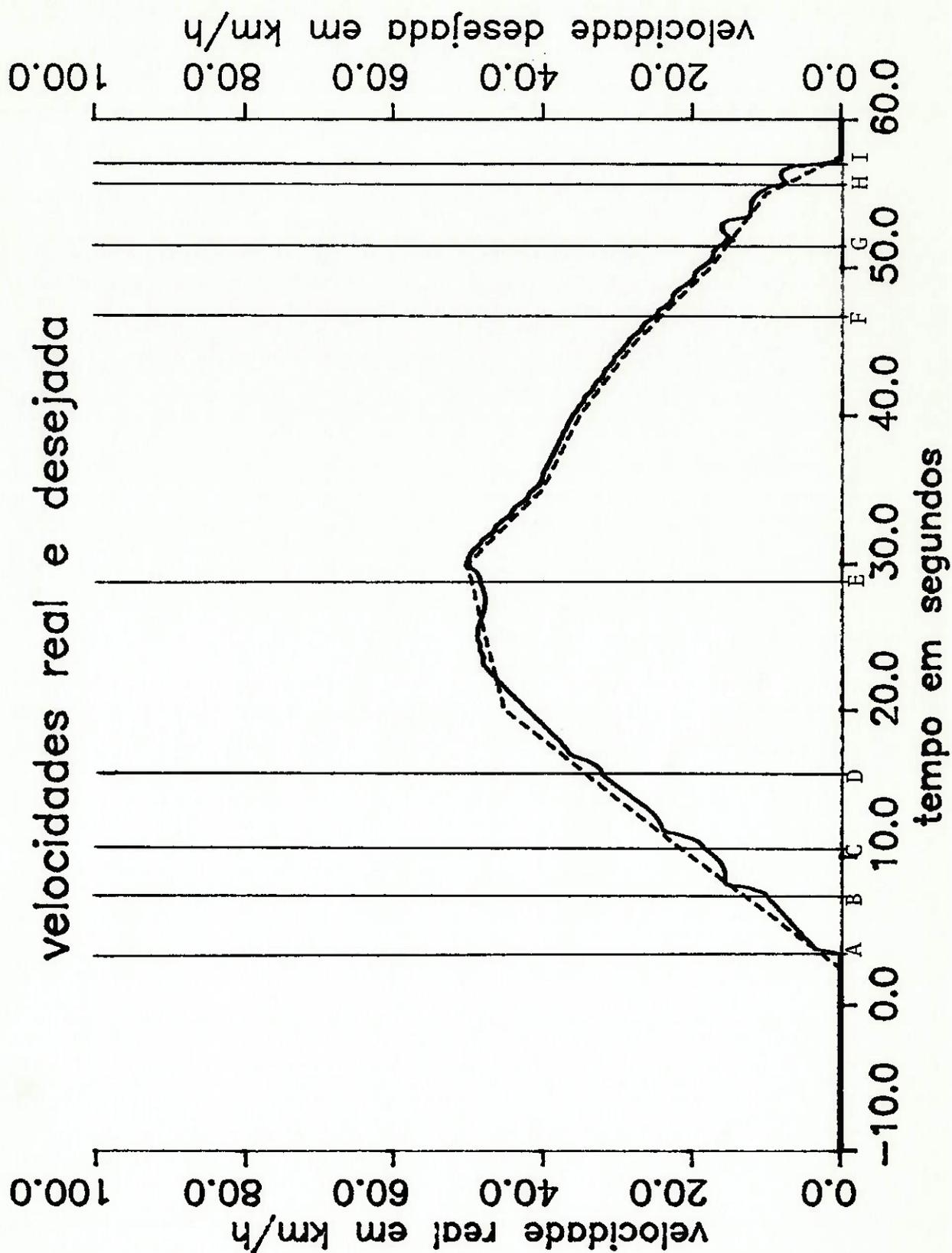


Figura 14: Velocidades real e desejada para a simulação.

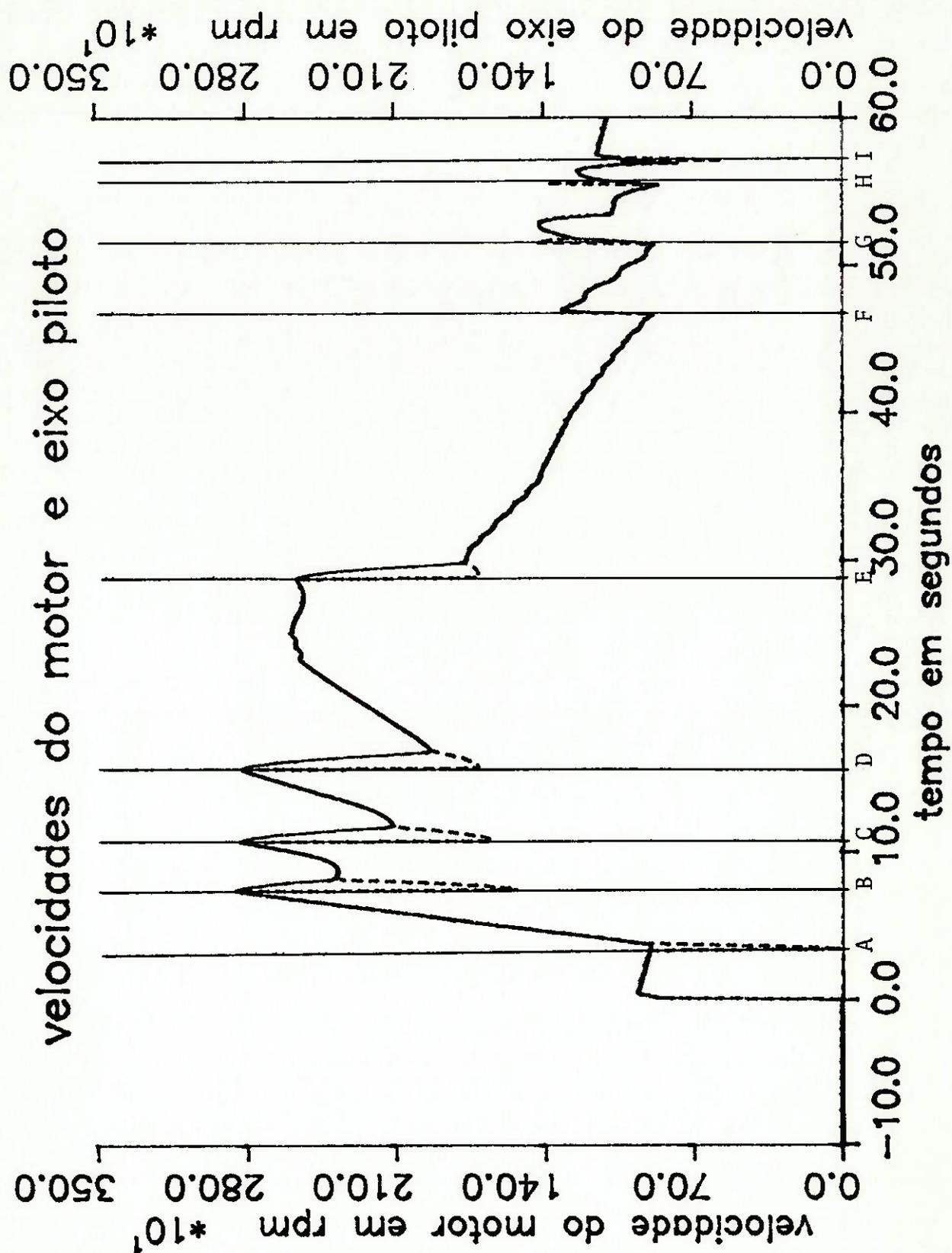


Figura 15: Rotações do motor e eixo piloto da caixa de mudanças.

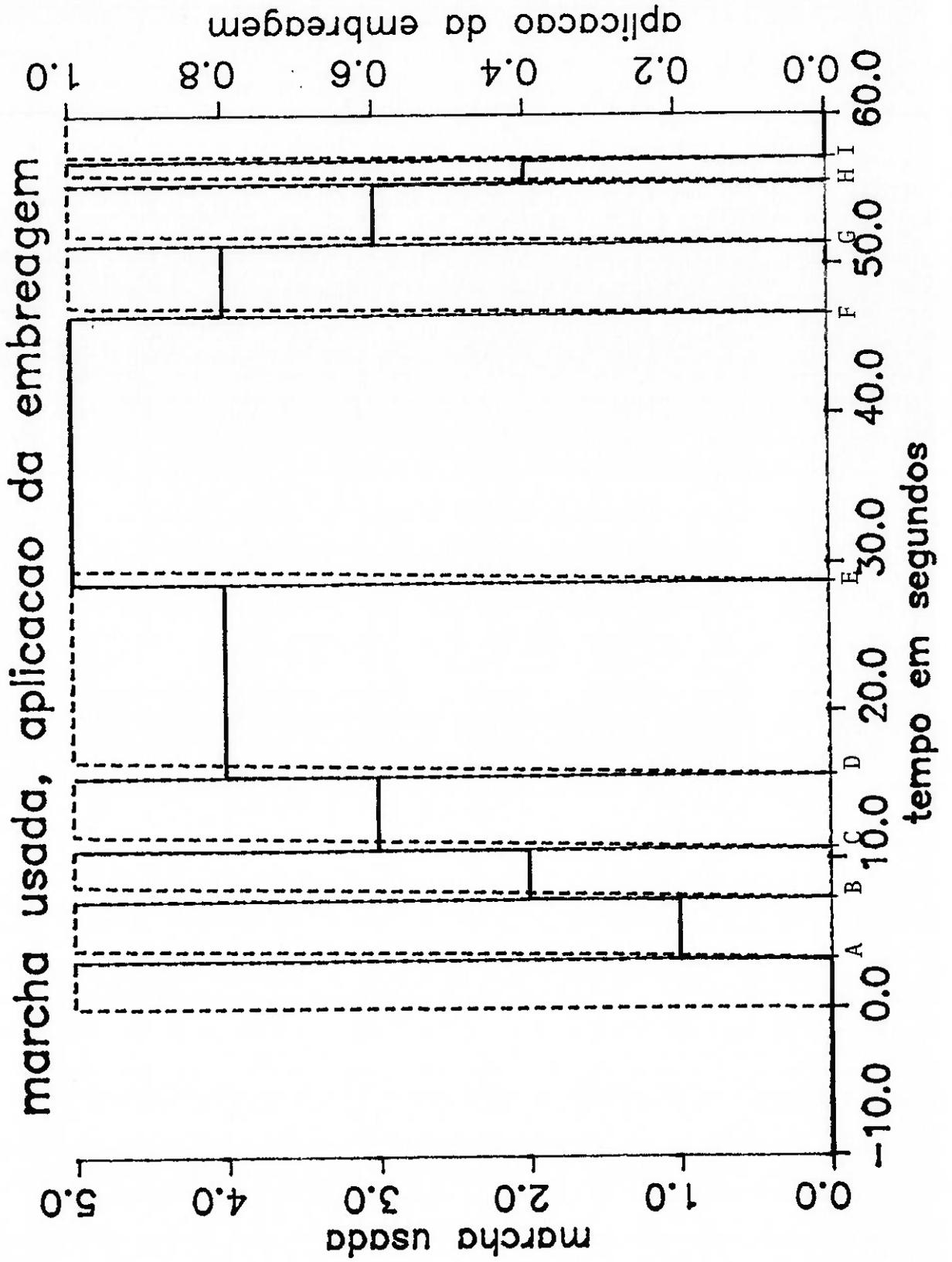


Figura 16: Marcha usada e grau de aplicação da embreagem.

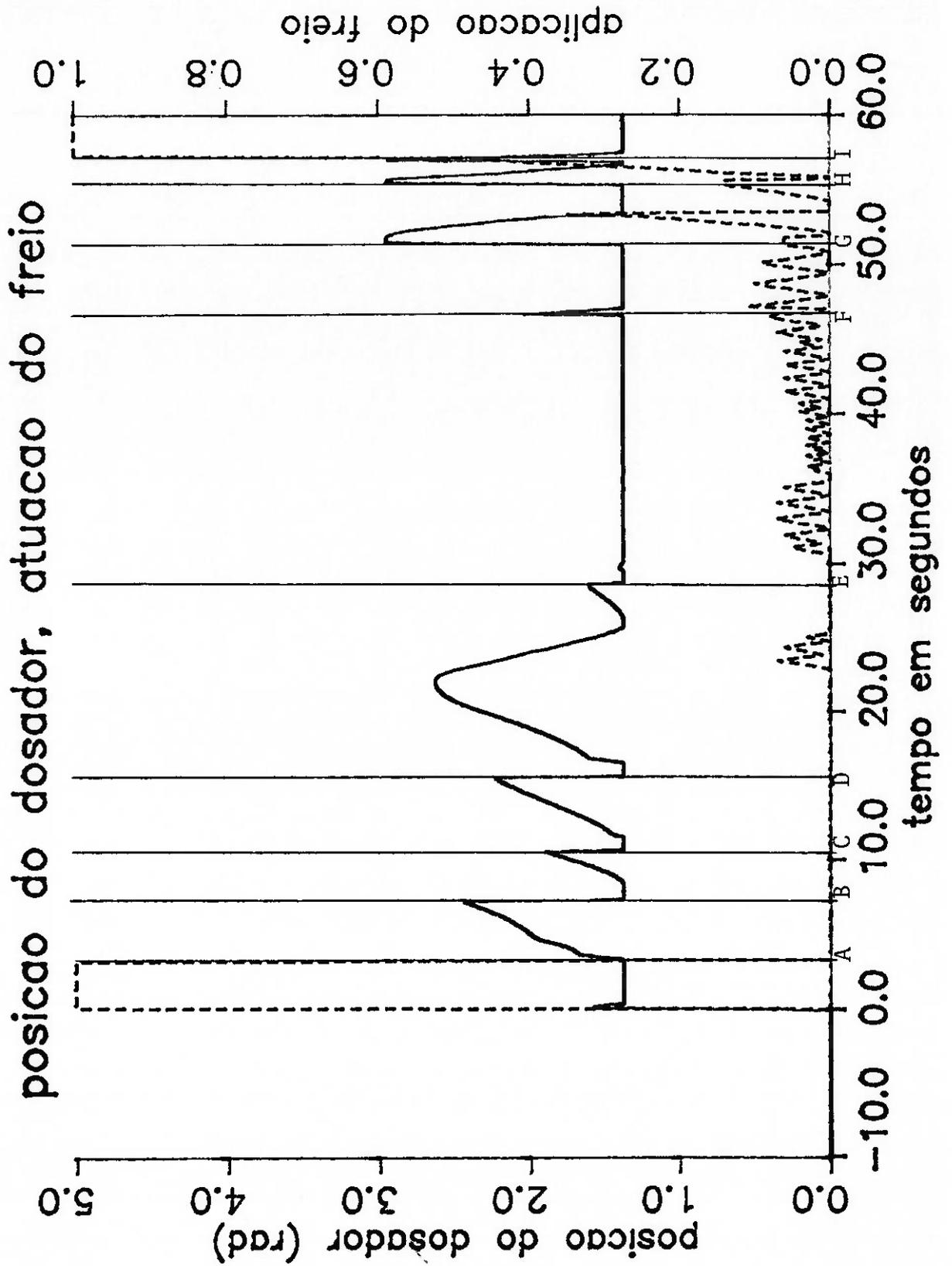


Figura 17: Giro do dosador da bomba injetora e aplicação do freio.

Consumo

Em campo foram obtidos dados de consumo num percurso normalizado, adaptado às características topográficas da Cidade Universitária (figura 18). As velocidades para este percurso típico foram definidas a partir de recomendações da norma americana EPA para avaliação de consumo de combustível de veículos em trânsito urbano, e podem ser vistas na figura 19. As informações sobre a topografia foram obtidas junto à Prefeitura da Cidade Universitária (Planta[1982]).

Os valores de consumo foram medidos para quatro diferentes ônibus, após cinco voltas no percurso, seguindo as velocidades da figura 19.

Para a simulação de percurso com dados da USP e os consumos realmente observados no mesmo trajeto, mostrados na tabela 1 (Instituto[1982]), vemos uma boa concordância dos valores, indicando que a simulação pode ser considerada representativa.

Ônibus nº	l/100 km ⁽¹⁾
1	41,3 +/- 0,4
2	42,6 +/- 1,1
3	37,0 +/- 0,27
4	44,4 +/- 0,92
SSP	44,39 ⁽²⁾

⁽¹⁾ consumo obtido em cinco voltas no percurso da figura 18.

⁽²⁾ troca de marchas pelo critério "recmbb" do SSP, equivalente a um motorista "econômico" ou bem treinado.

Tabela 1: comparação entre os consumos reais e o do SSP.

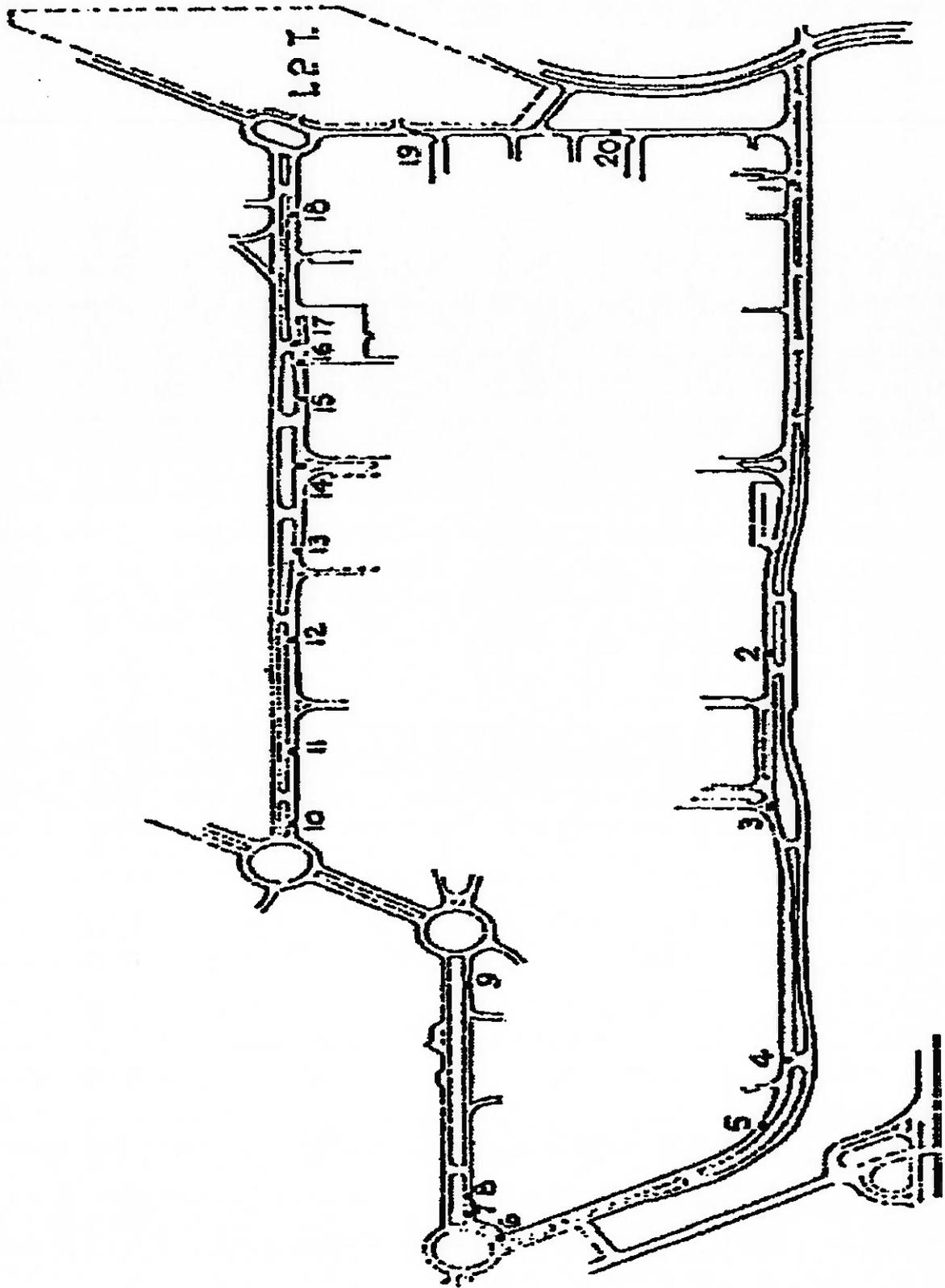


Figura 18: Mapa do percurso e dos pontos de parada, na Cidade Universitária (fora de escala).

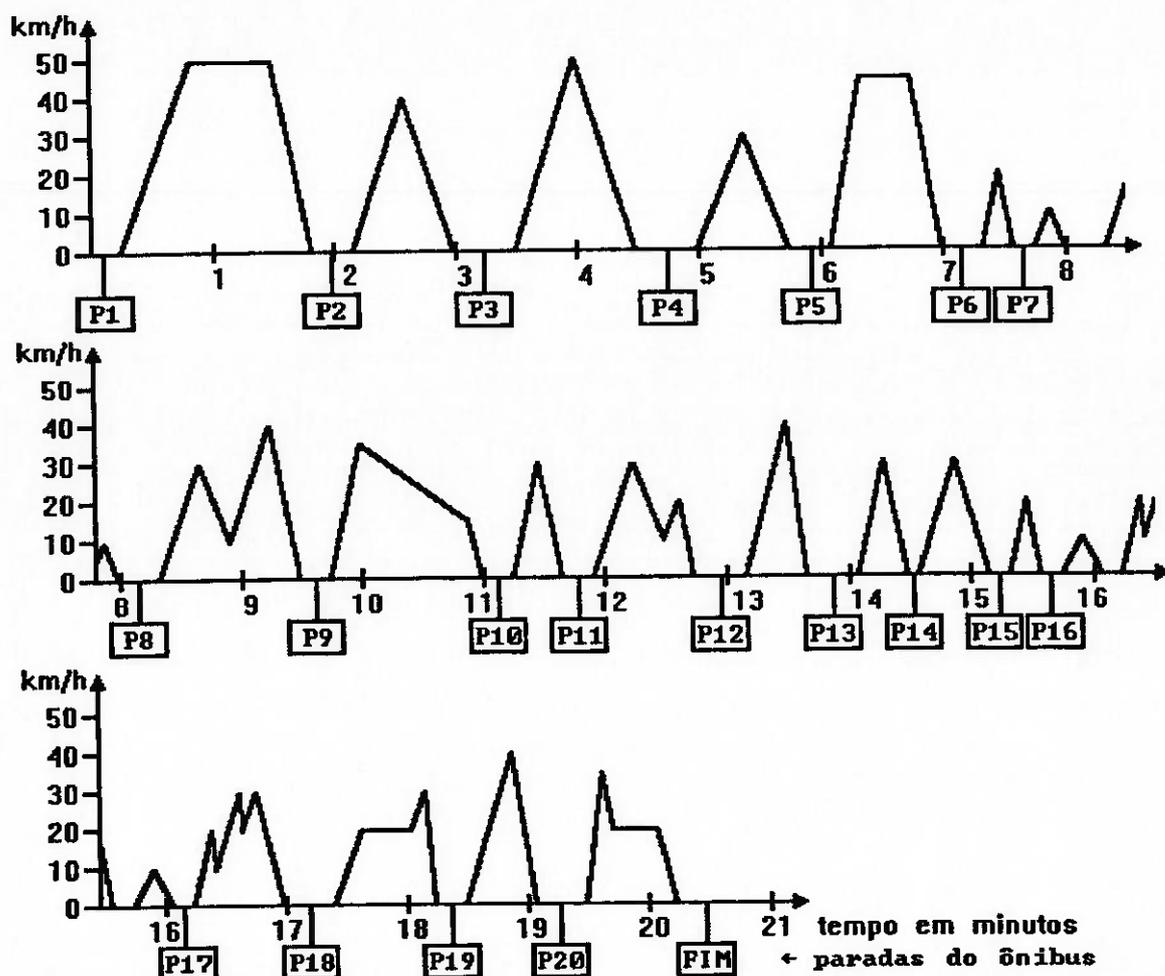


Figura 19: Perfil de velocidades para trajeto urbano típico (adaptado ao percurso da figura 18).

Levantamento de dados de laboratório e de campo

Alguns outros ensaios de laboratório foram planejados para validação de modelos de sistemas auxiliares, mas não executados em virtude da falta de equipamentos e de recursos financeiros para tal. Um destes testes seria o da bomba injetora original, com o regulador centrífugo de velocidades, que poderia indicar a necessidade de um modelo um pouco mais sofisticado para uma simulação mais realista do ônibus em altas rotações do motor.

AVALIAÇÃO DA PROPOSTA DE AUTOMATIZAÇÃO

A avaliação da implementação da proposta foi feita através do uso do programa SSP.

Os resultados indicaram que com a automatização das mudanças de marcha é possível obter-se uma redução significativa de consumo de combustível, em torno dos 5%.

Simulações e Comparação de Resultados

As simulações e comparações de resultados, para serem representativas de uma utilização na vida real, baseiam-se na adoção de um percurso padronizado. Tal percurso, situado na Cidade Universitária, procura seguir as indicações de normas americanas (EPA) para trajetos urbanos, conforme pode ser visto nas figuras 18 e 19.

As comparações serão feitas com base nos processamentos do SSP para os seguintes casos:

- a - mudança de marcha otimizada conforme a proposta do projeto;
- b - troca de marcha conforme a recomendação do fabricante do ônibus.

Da análise dos correspondentes relatórios de processamento do SSP (anexos A e B) observamos que a estratégia sugerida neste projeto para a mudança de marchas permite obter uma economia de combustível da ordem de 5%,

em relação às recomendações de mudança feitas pelos fabricantes aos motoristas em cursos de treinamento, ou seja, dirigir na "zona verde" do tacômetro. Já salientamos que estas recomendações, no entanto, só são seguidas por motoristas treinados e bem dispostos, e também já alertamos que a carga de trabalho em alguns horários logo cansa o motorista, fazendo-o dirigir descuidadamente; podemos portanto supor que o sistema automatizado, em relação ao sistema manual tradicional, permitirá uma economia bem mais significativa de combustível.

Se considerarmos que um motorista, após treinado, consegue ser em torno de 15% mais econômico (Aguiar[1987]), a automatização pode fornecer economias de quase 20% em relação a um motorista destreinado ou cansado!

Vale a pena observar que também o número de trocas de marcha foi otimizado, ou seja, reduzido, com o sistema automatizado em relação a um bom motorista.

Viabilidades técnica e econômica

Um estudo simplificado dos custos para implementação de sistemas automatizados pode ser feito considerando o emprego dos seguintes materiais:

- para a seleção de marchas são necessários dois pistões de duplo efeito, adaptados com molas, acionados pneumáticamente e comandados, cada um, por duas válvulas solenóides de 2 posições e três vias. É necessário o uso de dois pés laterais para fixação dos pistões;

- um pistão de simples efeito, comandado por três válvulas solenóides (uma para enchimento rápido e duas para esvaziamento com velocidades diferentes) deverá ser usado no acionamento da embreagem;
- uma válvula adicional será empregada para o bloqueio do freio em aclives, visando um aumento de segurança do ônibus e melhor dirigibilidade ao evitar movimentações por ação da gravidade;
- a medida de rotação nos eixos do motor e da transmissão será feita por transdutores que captam pulsos magnéticos através do uso de engrenagens; para alguns veículos podem-se aproveitar os sensores disponíveis em suas versões originais;
- um motor de passo poderá ser usado para acionar a cremalheira da bomba injetora;
- haverá uma chave seletora de modo de operação do conjunto propulsor: frente, ré ou neutro.

Serão empregados, ainda, como geradores de informação para o processador, um transdutor resistivo para medida de posição da cremalheira da bomba injetora e um potenciômetro, vinculado ao acelerador, para indicação de sua posição angular.

É necessário escolher um processador para o programa de controle, incorporando um conversor analógico-digital com o número de canais necessários, e respectivos periféricos. Como exemplos concretos podemos citar os micro-processadores M6800 (Microcomputer[1982]), M6803 (Automated[1987]) ou M6805 (Glider[1983]), da família Motorola, ou Intel 8096, usados por fabricantes estrangeiros de veículos e de transmissões em sistemas de controle de motor e/ou de troca automática de marchas.

A lista de componentes constitui a tabela 2 a seguir, e fornece alguns indicativos de custos usados nas análises de viabilidade econômica.

Item	Quant.	Especificação	Preço*
1	2	Pistão de duplo efeito c/ pés	131
2	4	Válvulas Solenóides de 2p/3v	113
3	4	Bobinas (válvulas do item 2)	43
4	1	Pistão de simples efeito	303
5	4	Válvulas solenóide 2p/2v	80
6	4	Bobinas (válvulas do item 5)	60
7	2	Pick-ups magnéticos c/ Winner	130
8	1	Transdutor de posição c/ fonte	480
9	1	Potenciômetro linear de precisão	2
10	1	Chave seletora	6
11	2	Engrenagens bi-partidas	63
12	1	Conversor A/D	315**
Total	###	###	2938

*Preços unitários vigentes em setembro de 1990 (já incluídos IPI e ICM), valores em dólar.

**Valor estimado

Tabela 2: Estimativa de custos do sistema automatizado.

O custo total do dispositivo instalado pode ser avaliado supondo três dias de mão de obra de um técnico de nível médio (US\$ 375).

Somados ao custo da mão de obra, o processador e demais componentes relacionados na lista de material mencionada acima totalizam US\$ 3313,00.

Pode-se estimar que a amortização do investimento seja conseguida num prazo variável, em função do fator de utilização do ônibus. De acordo com dados médios de quilometragem diária de frotas de várias capitais do Brasil (200 km/dia), cerca de 10 anos seriam necessários para esta amortização, considerando somente a redução de consumo prevista com a utilização do controlador, em relação ao consumo dos "bons" motoristas, ou seja, 5% (Instituto[1990]). No entanto, se admitirmos motoristas destreinados nos métodos de direção econômica, ou cansados e dirigindo de maneira menos atenta, a redução de consumo com o sistema automatizado poderia atingir até 20% (se não mais), o que reduziria a amortização do investimento para períodos de dois anos e meio. Vantagens adicionais podem ser conseguidas com custos de manutenção, pois percebeu-se uma redução na freqüência de trocas de marcha e embreamentos, poupando estes sistemas.

É conveniente, entretanto, ressaltar que o fator de utilização de ônibus novos é significativamente maior que o mencionado acima, possibilitando a redução do prazo de amortização para algo em torno de quatro anos em um veículo com vida útil prevista de 7 anos, no caso de economia da ordem de 5%, ou então apenas um ano para economias da ordem de 20%.

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Usaremos agora o SSP para verificar qual seria o desempenho do controlador proposto no caso de haver erros no sistema. Estes erros podem ser interpretados como:

- erros no modelamento do sistema propulsor;
- erros que surjam ao longo do tempo, devidos a desgaste dos componentes mecânicos e conseqüente alteração dos parâmetros reais do modelo com o tempo;
- falhas na instrumentação, provocando erros nas leituras;
- falhas nos atuadores, cujo funcionamento passa a ser diferente do previsto.

Para maior comodidade na visualização dos resultados, ao invés de apresentarmos os relatórios das diferentes simulações vamos mostrar apenas tabelas com os resultados mais relevantes, sendo as diferenças nos dados ou erros nos modelos melhor explicados ao longo do texto.

Inércia do motor

Um dos dados do ônibus cujo valor exato não dispomos é o momento de inércia do motor, volante e embreagem. Nas simulações dos anexos A e B, por exemplo, usamos um valor de 5 kg.m^2 , ao qual se chegou por parecer adequado após testes preliminares com outros valores (mais altos). Entretanto, segundo valores derivados de expressões empíricas para "inércia rotativa", conforme Figueiredo[1987], chegou-se a um valor de $1,2 \text{ kg.m}^2$.

Parece oportuno, portanto, iniciar a análise de sensibilidade com variações na inércia do motor. Os resultados, para o critério de troca de marchas otimizada, estão na tabela 3.

inércia (kg.m ²)	1,2	2,0	3,0	4,0	5,0
consumo (l/100km)	33,76	33,93	35,94	37,40	42,49
variação	-20,5%	-20,1%	-15,4%	-12,0%	0,0%

Tabela 3: Efeito do momento de inércia do motor no consumo e variação de consumo relativa ao motor mais "pesado".

Com o menor valor de inércia, e mantendo a massa total do ônibus em 8000 kg, o consumo passou para 36,51 l/100km no caso de motorista experiente (troca de marcha segundo recomendações do fabricante do ônibus); e o número de mudanças de marcha passou para 224, no caso do apêndice B tínhamos 44,39 l/100km e 176 trocas de marcha; com 5,0 km.m² o motorista econômico gastava 4,8% a mais que o sistema automatizado além de fazer 6,7% mudanças de marcha a mais, mas com motor de 1,2 km.m² a diferença passa a 8,1% a mais em consumo e 20,4% a mais em trocas de marcha!

Com uma menor inércia do motor e volante, além de ser mais vantajosa a automatização, a dirigibilidade do veículo nas simulações melhora sensivelmente durante as trocas de marcha, evitando-se "trancos" que ocorriam na velocidade devidos a um excesso de energia cinética do motor, liberada muito rapidamente ao se soltar o pedal da embreagem; para motores mais pesados o piloto automático do SSP precisaria de alguns aperfeiçoamentos.

Erros na velocidade

As primeiras simulações de "defeitos" foram feitas para o caso de falhas no sensor de velocidade do ônibus, fornecendo valores proporcionais à velocidade correta, entre 70% e 130% do valor real em cada simulação.

Para estas simulações com erros na medida de velocidade, cada valor de erro foi simulado através de modificações no SSP, introduzindo o erro apenas nas rotinas de seleção de marcha; para cada erro era necessária uma nova compilação, gerando-se ao final um diferente programa para cada simulação "errada".

Espera-se que a velocidade errada, ao servir para a seleção da marcha ótima, que deve passar a ser feita de modo incompatível com o ótimo realmente desejado, provoque um maior consumo de combustível. Os resultados obtidos estão na tabela 4, onde se vê que esta previsão não foi confirmada. Estamos adotando, para o motor, um momento de inércia de $1,2 \text{ kg.m}^2$.

velocidade	70%	80%	90%	100%	110%	120%	130%
consumo	35,39	35,16	34,49	33,76	33,74	33,63	33,33
variação	+4,8%	+4,1%	+2,2%	0%	<-0,1%	-0,4%	-1,3%

Tabela 4: Resultados de simulações para diferentes erros na medida de velocidade, mostrando o consumo e sua variação.
Unidades: velocidade medida/velocidade real
e consumo em 1/100km.

Observa-se que a variação no consumo é bem menor que o erro relativo na medida de velocidade, sendo mais sensível

a variação no consumo para velocidades medidas menores que as reais.

O que chama a atenção é que o consumo na verdade melhorou para velocidades medidas em excesso. A velocidade medida maior que a real, para um mesmo perfil de velocidades, acaba antecipando um pouco as mudanças de marcha do sistema, em relação ao ônibus com medidas corretas. Isto sugere que o tempo que o sistema aguarda para evitar a seleção de uma marcha "relativamente instável", conforme explicado em "Modelo Computacional - seleção de marchas", pode estar sendo um tanto elevado, prejudicando o desempenho do sistema. Para a confirmação desta hipótese foram feitas mais simulações, cada uma com um "tempo de permanência para troca de marchas" diferente. O valor para este tempo é definido no arquivo de dados para a simulação, e foi utilizado o programa para simulação de ônibus com sensores em perfeito estado. Os resultados estão na tabela 5. O tempo de 1,75 segundos para a permanência é o valor que vinha sendo usado nas simulações anteriores.

permanência	0,25	0,5	0,75	1,0	1,75
consumo	33,52	32,93	33,18	33,25	33,76
variação	-0,7%	-2,5%	-1,7%	-1,5%	0%
mudanças	228	212	214	204	186
variação	22,6	14,9%	15,0%	9,7%	0%

Tabela 5: Efeitos de diferentes tempos de permanência no consumo e no total de mudanças de marcha.
Consumo em 1/100km.

Nota-se que, para tempos de permanência menores que o usado nas simulações anteriores, realmente o consumo diminui, embora o número de trocas de marcha no percurso aumente. Para o caso de 0,5 segundos de espera para confirmar a seleção de uma nova marcha otimizada o consumo é o menor de todos, e o número de trocas de marcha é de 212 contra 224 na simulação com o motorista treinado, ou seja, ainda é 5,4% menor. Lembramos que a simulação de motorista treinado não utiliza o "tempo de permanência".

A seleção ótima de marchas, para um tempo de permanência nulo, permitiu obter 33,65 l/100km, sendo feitas 231 trocas de marcha, o que mostra que algumas marchas "instáveis" ocorreram, prejudicando o desempenho.

Finalmente, para procurar confirmar que o tempo de 0,5 segundos para a aceitação de uma marcha indicada como ótima é um intervalo de tempo adequado, o ônibus "desregulado" que media uma velocidade 30% maior que a real, com este tempo de permanência, teve o consumo e o número de mudanças de marcha significativamente aumentados, mostrados na tabela 6. Agora realmente, como se esperava, qualquer discrepância ou erro de medidas em relação ao ônibus modelado implica em desempenho não otimizado; antes, o erro de 130% do sensor permitia uma economia maior que o ônibus em bom estado.

velocidade medida/real	100%	130%
consumo (l/100km) variação	32,93 0%	35,81 +8,7%
trocas de marcha variação	212 0%	252 +18,9%

Tabela 6: Efeitos do sensor de velocidades desregulado com tempo de permanência de 0,5 s para a seleção da marcha ótima.

Erros no embreamento

Faremos agora simulações que representam algum problema no embreamento, tal como um atraso na resposta dos pistões de acionamento da embreagem. Na prática, qualquer atraso no engate das marchas selecionadas pode ser representado pelo mesmo "defeito", supondo-se que o embreamento só se iniciaria após a troca de marchas se ter completado, por medida de segurança do próprio sistema.

Os resultados obtidos podem ser vistos na tabela 7; para estas simulações o tempo de permanência foi fixado no valor "otimizado" de 0,5 segundos e a inércia do motor em $1,2 \text{ kg.m}^2$.

As simulações de atraso do embreamento exigiram modificações no algoritmo do SSP; o acionamento da embreagem só se inicia após ela ficar totalmente desaplicada pela duração do atraso.

atraso no embreamento (s)	0,0	0,2	0,5
consumo (l/100km) variação	32,93 0%	32,92 <-0,1%	35,58 +8,0%
trocas de marcha variação	212 0%	211 -0,5%	199 -6,1%

Tabela 7: Efeito de atrasos de embreamento no consumo e nas trocas de marcha.

Vê-se que um pequeno atraso de 0,2 segundos não prejudica o sistema, aliás parece permitir um desempenho ligeiramente melhor. Isto está a favor da implementação física do sistema, pois o SSP está considerando que a mudança de marchas ocorra instantaneamente assim que a embreagem seja desaplicada, mas na verdade a mudança deve demorar um pequeno lapso de tempo, mais de acordo com a simulação para atraso pequeno.

Por outro lado, um atraso de 0,5 segundos já começa a prejudicar sensivelmente o consumo, deixando-o em torno de apenas 2,5% abaixo do motorista econômico.

Uma vez que um pequeno atraso indicou pequenas vantagens em economia e nas trocas de marcha, foi feita uma simulação para ônibus sem atraso, porém com aplicação da embreagem mais lenta, através de menores valores para os "fatores de aplicação da embreagem" (conforme "modelo computacional - embreamento"). Para valores de 0,75, 1,0 e 1,5 no lugar de 1,0, 1,5 e 2,0, usados nas simulações anteriores, o consumo caiu para 32,29 l/100km (-1,9%) e as trocas de marcha passaram a 214 (+0,9%), em relação aos valores obtidos para ônibus sem atraso.

Erros na medida de torque

Erros na medição ou avaliação do torque do motor agindo sobre as rodas motrizes também devem afetar a seleção da marcha ótima. Quatro simulações considerando erros no torque foram feitas, obtendo-se sempre consumos acima do valor ótimo obtido para torque sem erro. Os resultados são mostrados na tabela 8.

torque (medido/real)	80%	90%	100%	110%	120%
consumo (l/100km)	33,58	33,11	32,93	36,35	36,88
variação	+2,0%	+0,6%	0%	+10,4%	+12,0%
trocas de marcha	218	210	212	244	230

Tabela 8: Efeitos de medida errada de torque na economia e nas trocas de marcha para ônibus automatizado.

Os resultados mostrados deixam claro que a economia não sofre um grande prejuízo com torque medido menor que o real. Neste caso, para o mesmo perfil de velocidades ao longo do percurso, a tendência do sistema automatizado é a seleção de marchas maiores (menos reduzidas), o que leva o motor a trabalhar em rotações menores, favorecendo a economia. Pelo contrário, com um torque medido maior que o real, as marchas escolhidas, mais reduzidas, levarão o motor a trabalhar em rotações mais altas, onde seu consumo específico é maior.

Finalmente, passando o erro de 10% para 20% além do torque real, o consumo não piorou tanto quanto piorou entre 0% e 10%, e a quantidade de trocas de marcha até caiu, o

que pode ser justificado por uma maior proporção de marchas mudadas por se ter atingido o limite de rotação máxima do motor, restando poucas marchas selecionadas pelo algoritmo otimizado.

CONCLUSÕES

As expectativas de redução de consumo de combustível, geradas pelas simulações comparativas entre condições diferentes de condução do veículo (apêndices A e B), permitem concluir pela viabilidade econômica do controlador; um estudo dinamométrico mais preciso do motor, com um mapeamento mais detalhado das regiões de diferentes eficiências por exemplo conforme Barker[1982], pode levar a critérios ainda mais precisos para escolha de marchas, com reduções de consumo ainda mais significativas, tornando o controlador ainda mais atraente em termos financeiros; por sinal, as análises de sensibilidade mostraram que com um valor menor para a inércia do motor, valor aparentemente mais próximo do real, as vantagens em termos de consumo são maiores que nas simulações dos anexos A e B.

O estudo de sensibilidade do sistema mostrou também que o tempo para a mudança de marchas não pode ser "demorado", pois uma espera de 0,5 segundos para a mudança de marchas começa a prejudicar consideravelmente o consumo do sistema automatizado; isto significa que os atuadores devem ser criteriosamente escolhidos, tanto para a mudança das marchas quanto para o acionamento da embreagem.

É conveniente ressaltar que os resultados obtidos nas simulações foram bastante próximos daqueles obtidos por fabricantes estrangeiros que ensaiaram no campo protótipos e produtos de série com automatizações similares, por

exemplo Manual[1984], Computer[1983], Microcomputer[1982], e Aguiar[1987]. Os dados divulgados para a redução de consumo estão em torno de 5%, com preços médios de comercialização do produto instalado em torno de US\$ 3.300,00; na obtenção destes valores de consumo, entretanto, ressaltamos que o motorista que obtém o consumo de referência é submetido a um programa de treinamento prévio, portanto é um motorista "econômico" (Manual[1984]). Entretanto, não é feita nenhuma referência de consumo explícita à aplicação em ônibus de transporte coletivo urbano. A utilização do controlador proposto em aplicações com tais características merece ser melhor estudada, considerando a enorme variedade de percursos típicos possíveis. Neste trabalho foi escolhido apenas um deles, genericamente mais representativo, e diferentes percursos (perfil da pista e velocidades ao longo do tempo) podem ser testados pelo próprio SSP.

A única alternativa comercial que contempla uma das funções importantes do controlador proposto é a transmissão automática; ela satisfaz ao item conforto, mas com algumas desvantagens: consumo de combustível mais alto (mas que pode ser melhorado se o câmbio automático convencional possuir controle eletrônico), custo inicial maior, peso maior para o veículo e maior complexidade mecânica.

A observação dos comentários desenvolvidos e dos custos levantados permite concluir que o dispositivo de

controle proposto, além de possuir potencial técnico, é viável economicamente.

Entretanto, somente a construção de um protótipo permitirá uma avaliação mais consistente, e a instalação de um conjunto com tais características num ônibus urbano fornecerá a real medida de seu desempenho.

Quanto ao simulador, pode-se dizer que é uma ferramenta bastante poderosa, possibilitando com bastante facilidade diversos tipos de simulações quanto aos dados de percursos, velocidades e diversas características do ônibus; com pequenas mudanças no programa, além disso, foi possível a realização de alguns estudos adicionais da sensibilidade do sistema proposto quanto a erros na instrumentação empregada. Pôde-se observar também que alguns parâmetros do ônibus modelado precisam ser conhecidos com boa precisão, pois afetam bastante os valores numéricos obtidos pelo simulador, além de terem alguma influência no modo de o ônibus ser conduzido pelo piloto automático.

ANEXO A
RELATÓRIO DE PROCESSAMENTO
PARA TROCA DE MARCHA AUTOMATIZADA

Dados específicos da simulação

Data: 03/12/1992 às 16h18h19s
 Incremento de tempo empregado: .10 segundos.
 Ganho integral de aceleração do motorista: .010
 Ganho integral de desaceleração do motorista: .040
 Ganho integral para frenagem: .010
 Arquivo de inclinações da pista: uspideal.rua
 Arquivo de velocidades desejadas: usp.vel
 Total de combustível consumido: 2.115 litros
 Distância percorrida: 4978.3 metros
 Consumo médio: 2.35 km/l (42.49 l/100km)
 Velocidade média no percurso: 14.2 km/h

Arquivo descritivo de dados da simulação

Conjunto de dados para o programa simulador de sistemas propulsores - 3/12/92

Dados relativos ao sistema de transmissão

Número de marchas à frente	5
Relação da marcha à re	-8.290
Relação da primeira marcha	8.979
Relação da segunda marcha	4.767
Relação da terceira marcha	2.753
Relação da quarta marcha	1.659
Relação da quinta marcha	1.100
Número de reduções do diferencial	1
Relação de redução do diferencial	6.1429
Torque máximo transmissível da embreagem	68.0 kgf.m

Dados para resistência ao movimento

Raio do pneu	0.5080 m
Aceleração da gravidade	9.8 m.s ²
Coefficiente de resistência ao rolamento dos pneus	2.72E-3
Coefficiente de penetração aerodinâmica x área frontal	0.525 N/(km/h) ²
Força máxima de frenagem do veículo	1.0E5 N
Massa do veículo	8000.0 kg

Dados relativos ao motor

Momento de inércia reduzido ao eixo	5.0 kg.m ²
Limite de rotação mínima	800.0 rpm
Limite de rotação máxima	2900.0 rpm
Rotação desejada para marcha lenta	900.0 rpm
Arquivo de dados do mapeamento débito/torque	TABMOTOR (.DAT)
Arquivo de dados do sistema de injeção	BETAS&P (.DAT)
Posição mínima do dosador em marcha lenta	1.37 rad

Dados para supervisão do motor e para o piloto automático

Constante de supervisão para erros >100 rpm	0.0015 rad/rpm
Constante de supervisão para erros >25 e <=100 rpm	0.0025 rad/rpm
Constante de supervisão para erros de até 25 rpm	0.0017 rad/rpm
Erro (excesso) de velocidade para início de frenagem	1.0 km/h
Erro (excesso) de velocidade para colocar em ponto-morto ..	10.0 km/h
Velocidade mínima para desengrenamento pelo piloto	2.0 km/h

Dados diversos para a simulação

Fator para "incremento de tempo reduzido".....	0.2
Limite antes da rotação máxima para troca de marcha	75.0 rpm
Limite antes da rotação mínima para troca de marcha	85.0 rpm

Tempo de "permanência" para iniciar troca de marcha	1.75 s
Límite para velocidade numericamente nula	0.5 km/h
Velocidade para transição de incrementos de tempo "dt".....	5.0 km/h
Fator de aplicação da embreagem, $ rpm-rpme >500.0$	1.0 dt
Fator de aplicação da embreagem, $ rpm-rpme >150.0$	1.5 dt
Fator de aplicação da embreagem, $ rpm-rpme \leq 150.0$	2.0 dt
Grau de frenagem para transição de incrementos de tempo ...	0.5
Alívio gradual do freio (após frenagem suficiente)	0.015
Critério (sub-rotina) desejado para a troca de marchas ...	ótimo
Rotação máxima desejada para o motor (critério recmbb) ...	2300. rpm
Rotação mínima desejada para o motor (critério recmbb) ...	1250. rpm

Histereses de torque e velocidade para indicação de marcha

Histerese de velocidade no aumento para a marcha 1	0.0 km/h
Histerese de torque no aumento para a marcha 1	0.0 kgf.m
Histerese de velocidade no aumento para a marcha 2	1.0 km/h
Histerese de torque no aumento para a marcha 2	20.0 kgf.m
Histerese de velocidade no aumento para a marcha 3	1.0 km/h
Histerese de torque no aumento para a marcha 3	12.5 kgf.m
Histerese de velocidade no aumento para a marcha 4	1.75 km/h
Histerese de torque no aumento para a marcha 4	10.0 kgf.m
Histerese de velocidade no aumento para a marcha 5	2.2 km/h
Histerese de torque no aumento para a marcha 5	7.5 kgf.m
Histerese de velocidade na redução para a marcha 1	0.3 km/h
Histerese de torque na redução para a marcha 1	20.0 kgf.m
Histerese de velocidade na redução para a marcha 2	1.5 km/h
Histerese de torque na redução para a marcha 2	12.5 kgf.m
Histerese de velocidade na redução para a marcha 3	2.0 km/h
Histerese de torque na redução para a marcha 3	7.0 kgf.m
Histerese de velocidade na redução para a marcha 4	2.0 km/h
Histerese de torque na redução para a marcha 4	7.0 kgf.m
Histerese de velocidade na redução para a marcha 5	0.0 km/h
Histerese de torque na redução para a marcha 5	0.0 kgf.m

Observações

Os critérios para troca de marchas disponíveis no SSP são três:

- 1 - 'ótimo'
- 2 - 'recmbb'
- 3 - 'temporal'

Estatísticas de marchas e tempos

Marcha	Tempo acumulado (seg)	Distância percorrida (m)	Consumo acumulado (l)	Consumo específico (km/l)	Mudanças para esta marcha
-1	.5	.1	.00	.117	1
0	438.8	7.5	.18	.041	25
1	129.3	194.6	.45	.430	43
2	129.3	449.3	.37	1.207	38

3	264.2	1527.9	.60	2.532	33
4	173.4	1309.4	.30	4.383	17
5	130.9	1489.8	.21	7.143	8

Total de mudanças de marcha = 165

Tempo acumulado em repouso = 428.1 segundos

Tempo acumulado em débito mínimo = 400.5 segundos

Tempo acumulado em débito máximo = 29.3 segundos

Tabela de interpolação de débitos e torques do motor (TABMOTOR.DAT)

7 revisao em 9/10/90 (8:40)

6

1.0	1200.	1600.	2000.	2400.	2800.
1.0	53.4	57.	58.5	58.9	56.5
.8	41.9	43.5	41.8	42.4	41.9
.6	31.	32.5	33.1	33.3	33.2
.4	22.8	23.9	24.4	25.1	25.7
.2	15.	16.6	16.7	17.8	18.9
-.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Tabela dos tempos e velocidades desejadas

79 versao de 15/5/90 (14h08m)

0.	0.
15.	0.
50.	50.
90.	50.
110.	0.
130.	0.
155.	40.
180.	0.
210.	0.
240.	50.
270.	0.
300.	0.
322.5	30.
345.	0.
365.	0.
380.	45.
405.	45.
420.	0.
440.	0.
447.5	20.
455.	0.
465.	0.
472.5	10.
480.	0.
500.	0.
520.	30.
535.	10.
555.	40.
570.	0.

585.	0.
600.	35.
652.5	15.
660.	0.
675.	0.
687.5	30.
700.	0.
715.	0.
735.	30.
750.	10.
757.5	20.
765.	0.
790.	0.
810.	40.
820.	0.
845.	0.
857.5	30.
870.	0.
875.	0.
892.5	30.
910.	0.
920.	0.
927.5	20.
935.	0.
945.	0.
955.	10.
965.	0.
975.	0.
984.	20.
985.5	10.
997.5	30.
999.	20.
1006.	30.
1020.	0.
1045.	0.
1059.	20.
1083.	20.
1090.	30.
1095.	0.
1110.	0.
1132.5	40.
1155.	0.
1170.	0.
1178.	35.
1183.	20.
1205.	20.
1215.	0.
1230.	0.
1260.	0.
1260.5	-50.

Tabela de declividades do percurso

10 arquivo USPIDEAL.RUA, versao 21/6/90. Percurso da "volta pequena",
0. .0 igual a dos ciclistas,
2997.4 .0 inicio da subida para o perfil de velocidades

3007.4 .06657 subida "ideal"
 3133.3 .06657
 3138.3 .0 final da subida
 3437.5 .0 inicio da descida
 3462.5 -.03570 descida
 3658. -.03570
 4683. .0 final da descida
 99999.9 .0

Versão dos programas componentes do simulador
 Programa: cambio.for
 c versao 2, feita em 5/12/89. Revisao em 9/11/90 (14h28m)

Programa: dados.for
 c versao 1, revisao 9/11/90 (14h25m)

Programa: dinvei.for
 c versao 2, de 12/12/89. Revisao em 9/11/90 (14h26m)

Programa: embrea.for
 c versao 2, de 6/12/89. Revisao em 9/11/90 (14h27m)

Programa: interp.for
 c versao 1. Revisao em 9/11/90 (14h24m)

Programa: marot.for
 c versao 1.2, de 12/12/89. Revisao em 9/11/90 (14h26m)

Programa: partida.for
 c versao 2, de 1/12/89. Revisao 26/10/92 (10h33m)

Programa: piloto.for
 c versao 2, de 6/7/90. Revisao em 16/11/90 (10h41m)

Programa: rpmres.for
 c versao 1. Revisao em 9/11/90 (14h18m)

Programa: rua.for
 c versao 1, de 12/12/89. Revisao em 9/11/90 (14h17m)

Programa: superv.for
 c versao 2, de 12/12/89. Revisao em 9/11/90 (14h18m)

Programa: torexr.for
 c versao 1, de 11/12/89. Revisao em 23/10/92 (11h09m)

Programa: tormax.for
 c funcao numero 3 para o torque maximo do motor om-352. Revisao 9/11/90 (14h21m)

Programa: torque&q.for
 c versao 2, de 11/12/89. Revisao em 9/11/90 (14h22m)

Programa: veldes.for
 c versao 1, de 7/12/89. Revisao em 9/11/90 (14h23m)

Programa: graf.for
 c Versao 1, de 27/4/90. Revisao em 26/10/92 10h40

Programa: progr0.for
c Versao 1, de 11/5/90. Revisao em 23/10/92 (14h53m)

Programa: progr2.for
c Versao 1, de 10/5/90. Revisao em 26/10/92 (11h10m)

Programa: dadpro.for
c Versao 1, de 29/5/1990. Revisao em 21/9/90 (11h04m)

Programa: relat.for
c versao 1, de 8/6/90. Revisao em 23/10/92 (11h25m)

Programa: mudoti.for
c versao 1, de 31/8/90. Revisao em 13/9/90 (10h59m)

Programa: recmer.for
c Versao 1, de 3/9/90 . Revisao em 13/9/90 (10h14m)

Programa: mudtem.for
c Versao 1, de 3/9/90 .Revisao em 3/9/90 (9h07m) a ser desenvolvida

→

ANEXO B
RELATÓRIO DE PROCESSAMENTO
PARA TROCA DE MARCHA POR MOTORISTA TREINADO

Dados específicos da simulação

Data: 03/12/1992 às 15h44h17s
 Incremento de tempo empregado: .10 segundos.
 Ganho integral de aceleração do motorista: .010
 Ganho integral de desaceleração do motorista: .040
 Ganho integral para frenagem: .010
 Arquivo de inclinações da pista: USPIDEAL.rua
 Arquivo de velocidades desejadas: USP.vel
 Total de combustível consumido: 2.208 litros
 Distância percorrida: 4974.4 metros
 Consumo médio: 2.25 km/l (44.39 l/100km)
 Velocidade média no percurso: 14.2 km/h

Arquivo descritivo de dados da simulação

Conjunto de dados para o programa simulador de sistemas propulsores - 3/12/92

Dados relativos ao sistema de transmissão

Número de marchas à frente	5
Relação da marcha à re	-8.290
Relação da primeira marcha	8.979
Relação da segunda marcha	4.767
Relação da terceira marcha	2.753
Relação da quarta marcha	1.659
Relação da quinta marcha	1.100
Número de reduções do diferencial	1
Relação de redução do diferencial	6.1429
Torque máximo transmissível da embreagem	68.0 kgf.m

Dados para resistência ao movimento

Raio do pneu	0.5080 m
Aceleração da gravidade	9.8 m.s ²
Coefficiente de resistência ao rolamento dos pneus	2.72E-3
Coefficiente de penetração aerodinâmica x área frontal	0.525 N/(km/h) ²
Força máxima de frenagem do veículo	1.0E5 N
Massa do veículo	8000.0 kg

Dados relativos ao motor

Momento de inércia reduzido ao eixo	5.0 kg.m ²
Limite de rotação mínima	800.0 rpm
Limite de rotação máxima	2900.0 rpm
Rotação desejada para marcha lenta	900.0 rpm
Arquivo de dados do mapeamento débito/torque	TABMOTOR (.DAT)
Arquivo de dados do sistema de injeção	BETAS&P (.DAT)
Posição mínima do dosador em marcha lenta	1.37 rad

Dados para supervisão do motor e para o piloto automático

Constante de supervisão para erros >100 rpm	0.0015 rad/rpm
Constante de supervisão para erros >25 e <=100 rpm	0.0025 rad/rpm
Constante de supervisão para erros de até 25 rpm	0.0017 rad/rpm
Erro (excesso) de velocidade para início de frenagem	1.0 km/h
Erro (excesso) de velocidade para colocar em ponto-morto ..	10.0 km/h
Velocidade mínima para desengrenamento pelo piloto	2.0 km/h

Dados diversos para a simulação

Fator para "incremento de tempo reduzido".....	0.2
Limite antes da rotação máxima para troca de marcha	75.0 rpm
Limite antes da rotação mínima para troca de marcha	85.0 rpm

Tempo de "permanência" para iniciar troca de marcha	1.75 s
Límite para velocidade numericamente nula	0.5 km/h
Velocidade para transição de incrementos de tempo "dt".....	5.0 km/h
Fator de aplicação da embreagem, $ rpm-rpme >500.0$	1.0 dt
Fator de aplicação da embreagem, $ rpm-rpme >150.0$	1.5 dt
Fator de aplicação da embreagem, $ rpm-rpme \leq 150.0$	2.0 dt
Grau de frenagem para transição de incrementos de tempo ...	0.5
Alívio gradual do freio (após frenagem suficiente)	0.015
Critério (sub-rotina) desejado para a troca de marchas	recmbb
Rotação máxima desejada para o motor (critério recmbb)	2300. rpm
Rotação mínima desejada para o motor (critério recmbb)	1250. rpm

Histereses de torque e velocidade para indicação de marcha

Histerese de velocidade no aumento para a marcha 1	0.0 km/h
Histerese de torque no aumento para a marcha 1	0.0 kgf.m
Histerese de velocidade no aumento para a marcha 2	1.0 km/h
Histerese de torque no aumento para a marcha 2	20.0 kgf.m
Histerese de velocidade no aumento para a marcha 3	1.0 km/h
Histerese de torque no aumento para a marcha 3	12.5 kgf.m
Histerese de velocidade no aumento para a marcha 4	1.75 km/h
Histerese de torque no aumento para a marcha 4	10.0 kgf.m
Histerese de velocidade no aumento para a marcha 5	2.2 km/h
Histerese de torque no aumento para a marcha 5	7.5 kgf.m
Histerese de velocidade na redução para a marcha 1	0.3 km/h
Histerese de torque na redução para a marcha 1	20.0 kgf.m
Histerese de velocidade na redução para a marcha 2	1.5 km/h
Histerese de torque na redução para a marcha 2	12.5 kgf.m
Histerese de velocidade na redução para a marcha 3	2.0 km/h
Histerese de torque na redução para a marcha 3	7.0 kgf.m
Histerese de velocidade na redução para a marcha 4	2.0 km/h
Histerese de torque na redução para a marcha 4	7.0 kgf.m
Histerese de velocidade na redução para a marcha 5	0.0 km/h
Histerese de torque na redução para a marcha 5	0.0 kgf.m

Observações

Os critérios para troca de marchas disponíveis no SSP são três:

- 1 - 'ótimo'
- 2 - 'recmbb'
- 3 - 'temporal'

Estatísticas de marchas e tempos

Marcha	Tempo acumulado (seg)	Distância percorrida (m)	Consumo acumulado (l)	Consumo específico (km/l)	Mudanças para esta marcha
-1	.4	.1	.00	.106	1
0	433.7	1.5	.19	.008	22
1	126.9	182.6	.43	.429	45
2	150.8	483.0	.42	1.157	45

3	265.4	1458.5	.60	2.435	39
4	201.2	1708.9	.42	4.032	21
5	87.9	1140.0	.16	6.932	3

Total de mudanças de marcha = 176

Tempo acumulado em repouso = 426.6 segundos

Tempo acumulado em débito mínimo = 545.4 segundos

Tempo acumulado em débito máximo = 46.5 segundos

Tabela de interpolação de débitos e torques do motor (TABMOTOR.DAT)

7 revisao em 9/10/90 (8:40)

6

1.0	1200.	1600.	2000.	2400.	2800.
1.0	53.4	57.	58.5	58.9	56.5
.8	41.9	43.5	41.8	42.4	41.9
.6	31.	32.5	33.1	33.3	33.2
.4	22.8	23.9	24.4	25.1	25.7
.2	15.	16.6	16.7	17.8	18.9
-.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Tabela dos tempos e velocidades desejadas

79 versao de 15/5/90 (14h08m)

0.	0.
15.	0.
50.	50.
90.	50.
110.	0.
130.	0.
155.	40.
180.	0.
210.	0.
240.	50.
270.	0.
300.	0.
322.5	30.
345.	0.
365.	0.
380.	45.
405.	45.
420.	0.
440.	0.
447.5	20.
455.	0.
465.	0.
472.5	10.
480.	0.
500.	0.
520.	30.
535.	10.
555.	40.
570.	0.

3007.4 .06657 subida "ideal"
 3133.3 .06657
 3138.3 .0 final da subida
 3437.5 .0 inicio da descida
 3462.5 -.03570 descida
 3658. -.03570
 4683. .0 final da descida
 99999.9 .0

Versão dos programas componentes do simulador

Programa: cambio.for

c versao 2, feita em 5/12/89. Revisao em 9/11/90 (14h28m)

Programa: dados.for

c versao 1, revisao 9/11/90 (14h25m)

Programa: dinvei.for

c versao 2, de 12/12/89. Revisao em 9/11/90 (14h26m)

Programa: embrea.for

c versao 2, de 6/12/89. Revisao em 9/11/90 (14h27m)

Programa: interp.for

c versao 1. Revisao em 9/11/90 (14h24m)

Programa: marot.for

c versao 1.2, de 12/12/89. Revisao em 9/11/90 (14h26m)

Programa: partida.for

c versao 2, de 1/12/89.

Revisao 26/10/92 (10h33m)

Programa: piloto.for

c versao 2, de 6/7/90. Revisao em 16/11/90 (10h41m)

Programa: rpmres.for

c versao 1. Revisao em 9/11/90 (14h18m)

Programa: rua.for

c versao 1, de 12/12/89. Revisao em 9/11/90 (14h17m)

Programa: superv.for

c versao 2, de 12/12/89. Revisao em 9/11/90 (14h18m)

Programa: torexr.for

c versao 1, de 11/12/89.

Revisao em 23/10/92 (11h09m)

Programa: tormax.for

c funcao numero 3 para o torque maximo do motor om-352. Revisao 9/11/90 (14h21m)

Programa: torque&q.for

c versao 2, de 11/12/89. Revisao em 9/11/90 (14h22m)

Programa: veldes.for

c versao 1, de 7/12/89. Revisao em 9/11/90 (14h23m)

Programa: graf.for

c Versao 1, de 27/4/90.

Revisao em 26/10/92 10h40

Programa: progr0.for
c Versao 1, de 11/5/90. Revisao em 23/10/92 (14h53m)

Programa: progr2.for
c Versao 1, de 10/5/90. Revisao em 26/10/92 (11h10m)

Programa: dadpro.for
c Versao 1, de 29/5/1990. Revisao em 21/9/90 (11h04m)

Programa: relat.for
c versao 1, de 8/6/90. Revisao em 23/10/92 (11h25m)

Programa: mudoti.for
c versao 1, de 31/8/90. Revisao em 13/9/90 (10h59m)

Programa: recmer.for
c Versao 1, de 3/9/90 . Revisao em 13/9/90 (10h14m)

Programa: mudtem.for
c Versao 1, de 3/9/90 .Revisao em 3/9/90 (9h07m) a ser desenvolvida
→

BIBLIOGRAFIA

- AGUIAR, Augusto C. Saldiva de. Caixa de câmbio computadorizada. IN: Simpósio de Engenharia Automotiva, 4, 1987. São Paulo. ANAIS... São Paulo : s.1, 1987. p.432-444.
- AUTOMATED mechanical transmission adopted in heavy vehicles. Automotive Engineering, vol.95, nº2, p.174-178, Fev. 1987.
- BARKER, T. D. Engine mapping techniques. International Journal Of Vehicle Design, vol.3, nº2, p.142-154, 1982.
- BENSON, R. S. , WHITEHOUSE, N. D. Internal combustion engines. Oxford : Pergamon Press, 1979. Vols 1-2.
- CHO, Dong-il. Nonlinear control methods for automotive powertrain systems. Boston : Massachusetts Institute of Technology - Department of mechanical engineering, 1987.
- CHO, D. , HEDRICK, J. K. Automotive powertrain modeling for control. Transactions of the ASME, vol.111, p.568-576, Dec. 1989.
- COMPUTER shifts for economy truck gearbox. Automotive Engineering, vol.91, nº5, p.48-49, Maio 1983.
- COMPUTERS optimize powertrain matching for a best economy. Automotive Engineering, vol.87 nº4, p.60-64, Abr. 1979.
- DELOSH, R. G. , BREWER, K. J. , BUCH, L. H. et ali. Dinamic computer simulation of a vehicle with electronic engine control. artigo SAE nº810447.
- ENGINE/transmission matching contributes to economy. Automotive Engineering, vol.89 nº9, p.67-69, Set. 1981.
- FIGUEIREDO, Silvio de Andrade. Simulação de desempenho e consumo de veículos rodoviários. São Paulo : USP-Escola Politécnica, 1987. (dissertação de mestrado).
- GLIDER automatic prevents unnecessary engine operation. Automotive Engineering, vol.91, nº8, p. 35-38, Ago. 1983.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO EST. DE SÃO PAULO S. A. Avaliação de sobrealimentação em motor diesel de ônibus. São Paulo : IPT, 1982. (relatório nº18005).

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO EST. DE SÃO PAULO S. A. Estudo de viabilidade técnico econômica de um controlador para sistema de propulsão de ônibus urbano. São Paulo : IPT, 1990. (relatório nº28238, apêndice D).

KUZAK, D. M. , SHIELDS, B. D. , FREEDMAN, R. J. et ali. Powertrain control strategy determination for computer controlled transmissions. International Journal Of Vehicle Design, vol.8, nº1, p.13-36, 1987.

MANUAL transmission converted to automatic. Automotive Engineering, vol.92, nº1, p.66-74, Jan. 1984.

MAZUREK, Stanislau , RUDZINSKA, Krystyna. Modelling urban vehicle motion to improve performance, Simulation, vol.34, nº4, p.117-124, 1980.

MICROCOMPUTER applied to heavy-duty automatics. Automotive Engineering, vol.90, nº12, p.24-27, Dez 1982.

MORRIS, R. L. , BORCHERTS, R. H. , WARLICK, M. V. et ali. Spark ignition engine model building: an identification approach to throttle-torque response. International Journal Of Vehicle Design, vol.3, nº1, p.48-60, 1982.

MOSKWA, J. J. , HEDRICK, J. K. Modeling and validation of automotive engines for control algorithm development. Transactions of the ASME, vol.114, p.278-285, June 1992.

PLANTA geral plani-altimétrica da C.U.A.S.O. São Paulo : FUNDUSP, 1982. (desenho nº2.160, 15.09.1982).

ROBERT Bosch do Brasil. Apostila técnica "equipamento de injeção para motores diesel(2). reguladores de rotação para bombas injetoras em linha". (publicação VDT-UBP 210/1 BR).

SETZ, Henry L. Computer predicts car acceleration. SAE Journal, vol.68, p.68-75, Out. 1960.

SILVA, Lydia Lopes Correia da. Simulação dos processos termodinâmicos em motores de combustão interna - ciclo diesel. São Paulo : USP-Escola Politécnica, 1992. (dissertação de mestrado).

TRIELLI, Maurício Assumpção. Simulação de um sistema de injeção para motor diesel. São Paulo : USP-Escola Politécnica, 1990. (dissertação de mestrado).

WATANABE, A. , KURONUYAGI, J. , SAITO, H. et ali. Technical review - isuzu's new transmission control system. International Journal Of Vehicle Design, vol.6, nº3, p.362-372, 1985.

YOUNG, T. L. , VAN WOERT, M. L. Plot88 software library reference manual second edition. California : Plotworks Inc. 1986 (manual de programa).