

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

2

**CONTROLADOR DE VELOCIDADE AUTOMOTIVO  
MICROPROCESSADO DE BAIXO CUSTO**

Diego Ignacio Buteler  
Paulo R. de Almeida Mazzei

Orientador: Raul Gonzalez Lima

São Paulo  
2004

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**CONTROLADOR DE VELOCIDADE AUTOMOTIVO  
MICROPROCESSADO DE BAIXO CUSTO**

Trabalho de formatura apresentado à Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo para  
obtenção do título de Graduação em Engenharia

Diego Ignacio Buteler  
Paulo R. de Almeida Mazzei

Orientador: Raul Gonzales Lima

Área de Concentração:  
Engenharia Mecânica

São Paulo  
2004

## **Agradecimentos**

Aos meus pais por me darem a oportunidade de estudar em uma escola do nível desta e a meus colegas pelo apoio e compreensão durante estes anos de faculdade. Quero agradecer também ao nosso orientador Prof.Raul Gonzalez Lima pelo apoio e boa vontade mostrada para tornar este projeto realidade.

### **Diego Ignacio Buteler**

Aos meus pais que tornaram possível meus estudos nessa universidade e aos meus amigos e colegas de curso pelo suporte durante estes cinco anos. Gostaria de agradecer também a todos os professores que através de seus conhecimentos foram fundamentais para a minha formação como engenheiro.

### **Paulo Roberto de Almeida Mazzei**

---

## **RESUMO**

Este trabalho trata do detalhamento e projeto de um sistema de controle de velocidade de cruzeiro automotivo adequado à realidade brasileira. É feito um estudo analisando os tipos mais comuns de controladores de velocidade e as inovações eletrônicas presentes nos carros chamados populares atualmente. Com base nesses estudos propõe-se construir um controlador de velocidade que possa ser adaptado em veículos equipados com sistema de acelerador eletrônico. São levantados custos de fabricação deste dispositivo, junto com uma pesquisa de mercado para constatar a existência de potenciais consumidores para este acessório. Aproveitando componentes eletrônicos instalados de fábrica nos veículos com acelerador eletrônico, é possível reduzir os custos de fabricação, obtendo um produto que seja acessível para os consumidores dos carros chamados populares. Para otimizar o desempenho do dispositivo, são feitas simulações numéricas usando diferentes tipos de controladores. Um estudo mostrando as atuais tendências, em termos de controladores, é feita. Após definir o tipo de controlador e suas características construtivas, a topologia do circuito eletrônico que controlará o sistema é mostrada.

## **ABSTRACT**

This document is about the detailing and design of a cruise control system adequate to the Brazilian reality. A study of the most common kind of cruise-controls and a research about the recent electronic innovations in low-cost passenger cars is done. Based on these studies, it is proposed to build a cruise-control device that can be fitted in cars with drive-by-wire technology. Costs of manufacture for this device and a market research were done to check existence of potential consumers for this accessory. Using the electronic components present in vehicles with drive-by-wire, it is possible to reduce manufacturing costs, producing a device that is accessible to consumers of the low-cost vehicles. To optimize the performance of the cruise-control, computational simulations are made, using different types of controllers. A study showing the latest innovations in control is done. After defining the type of controller to be used and its constructive characteristics, the electronic circuit topology chosen to be the guideline of the design is shown.

## **SUMARIO**

### **LISTA DE TABELAS**

### **LISTA DE FIGURAS**

1. INTRODUÇÃO .....	1
2. OBJETIVOS.....	2
3. METODOLOGIA.....	3
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	5
4.1. O Controle de Velocidade de Cruzeiro .....	5
4.1.1. Funcionamento.....	6
4.1.2. Como o Sistema é conectado .....	7
4.2. Características especiais de veículos equipados com acelerador eletrônico .....	10
4.3. Controlando o Cruise Control.....	12
4.3.1. Controle Proporcional .....	13
4.3.2. Controle PID .....	13
4.3.3. Controles Adaptativos .....	13
4.4. Modelando o Sistema .....	15
4.5. Projeto com controlador tipo PI .....	18
4.6. Projeto com controlador tipo PI e consideração da dinâmica do atuador .....	18
4.7. Projeto Básico e Estudo de Viabilidade .....	19
4.7.1. Necessidades do projeto .....	19
4.7.2. Especificações técnicas.....	20
4.7.3. Estudo econômico .....	23
4.7.4. Alternativas /Matriz de decisão.....	26
4.8. Projeto Executivo .....	28
4.8.1. O circuito contador.....	28
4.8.2. O circuito DSP .....	29
4.8.3. O micro controlador .....	30
4.8.4. O multiplexador 2:1.....	31
4.8.5. Diagrama de blocos .....	31
4.8.6. Levantamento de Custos.....	33

4.9. Simulações numéricas .....	34
4.9.1. Projeto do Controlador PI.....	34
4.9.2. Projeto do Controlador P <sub>I</sub> D .....	-
5. CONCLUSÃO .....	40
6. ANEXOS.....	41
Anexo A .....	41
Anexo B.....	42
Anexo C.....	43
Anexo D .....	45
7. BIBLIOGRAFIA .....	47

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 01: valores de tensão de operação dos componentes de um sistema drive-by-wire .....	11
Tabela 02: necessidades do controle de velocidade.....	20
Tabela 03: parâmetros de desempenho do dispositivo.....	21
Tabela 04: características operacionais .....	21
Tabela 05: características construtivas.....	22
Tabela 06: veículos da categoria popular equipados com acelerador eletrônico .....	23
Tabela 07: preços de automóveis populares alvo deste projeto.....	24
Tabela 08: preços levantados de conjuntos de som .....	24
Tabela 09: preços levantados do conjunto rodas de liga leve e pneus.....	24
Tabela 10: preços levantados de controladores de velocidade.....	24
Tabela 11: volume de vendas de carros 1.0 nos últimos anos.....	25
Tabela 12: meta de vendas e receita bruta.....	26
Tabela 13: custos dos componentes.....	33

## **LISTA DE FIGURAS**

Fig.1: modelo utilizado para representar o sistema .....	3
Fig.2: botões de Acionamento do controlador.....	6
Fig.3: acionamento via cabo .....	8
Fig.4: atuador a vácuo .....	8
Fig.5: sensores VSS .....	9
Fig.6: esquema do funcionamento de um acelerador eletrônico .....	10
Fig.7: motor do acelerador .....	11
Fig.8: pedal do acelerador .....	11
Fig.9: entradas e Saídas do Sistema .....	12
Fig.10: modelo do Veículo .....	15
Fig.11: diagrama de Bloco do sistema veículo .....	17
Fig.12: diagrama de blocos do sistema com distúrbios e controlador, em malha fechada .....	17
Fig.13: diagrama de blocos com controlador PID e considerando a dinâmica do atuador .....	19
Fig.14: diferentes tipos de comandos internos do controle de velocidade.....	22
Fig.15: circuito integrador.....	29
Fig.16: circuito derivador.....	29
Fig.17: circuito somador.....	30
Fig.18: topologia do circuito .....	31
Fig.19: esquema das ligações da ECU .....	33
Fig.20: lugar das raízes para o sistema PI .....	35
Fig.21: resposta ao Degrau Unitário de Referência para o sistema PI.....	35
Fig.22: resposta a Distúrbio Unitário para o sistema PI.....	36
Fig.23: lugar das raízes para o sistema PID .....	37
Fig.24: resposta ao Degrau Unitário de Referência para o sistema PID.....	38
Fig.25: resposta ao Disturbio de Degrau Unitário para o sistema PID.....	38

## 1. INTRODUÇÃO

O sistema de controle de velocidade de cruzeiro, ou *cruise-control*, é um dispositivo de muita importância em carros modernos. Este sistema pode ser considerado um dispositivo de segurança passiva já que torna a viagem menos cansativa para o motorista além de manter a velocidade dentro dos limites previstos pelas leis de trânsito. O *cruise-control* facilita a direção do veículo em longas viagens, diminuindo o estresse do motorista e diminuindo a possibilidade de acidentes.

No Brasil, este tipo de dispositivo está sendo, cada vez mais, incorporado entre os itens opcionais de veículos de maior porte e maior custo. Dentre os carros que já possuem este item como opcional podem-se citar o VW Golf e Chevrolet Vectra. Dentre os veículos chamados populares, existe uma versão simplificada deste dispositivo, que apenas permite programar uma velocidade limite e emitir avisos sonoros cada vez que esta velocidade for ultrapassada, como no caso do VW Gol (dispositivo chamado SLM)[1].

Há no mercado diversos fornecedores deste tipo de acessório, desde alguns fabricados no país a outros importados, sempre sendo destinados a veículos de médio porte e médio custo. Não há um dispositivo destinado à categoria dos veículos chamados populares. Este projeto visa preencher esta lacuna.

No ano de 2001 foi introduzido no Brasil o primeiro veículo de pequeno porte em que a ligação do acelerador à borboleta de admissão de ar no motor não era feita mecanicamente, através de cabos, mas de forma eletrônica. Este sistema que utilizava um acelerador eletrônico foi denominado de drive-by-wire. No ano de 2002, a Volkswagen do Brasil incorporou este dispositivo a seus veículos populares da linha Gol e Parati, tendência que foi seguida em 2004 pela Fiat e Renault, com os veículos Palio, Siena e Clio.

Este sistema é amplamente utilizado atualmente em veículos de médio e grande porte. O seu uso em veículos do tipo popular está crescendo, e acreditando em sua aplicação para todos os veículos de série em um futuro próximo, foi projetado neste trabalho um controlador de velocidade para veículos populares que utilizam o sistema *drive-by-wire*.

## 2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é estudar, projetar e simular um sistema de controle de velocidade de cruzeiro, ou *cruise control*, de baixo custo, que seja compatível com a realidade dos automóveis brasileiros. O escopo deste projeto é atender aos modelos de veículos chamados populares, mas que possuam itens de conforto e aparência adicionais. Os clientes alvo do projeto são pessoas que têm disponibilidade de gastar um pouco mais com este tipo de acessório, bem como com rodas de liga leve e equipamentos de som, sem abrir mão da economia de ter veículos de menor custo e baixo consumo.

Os veículos alvo deste projeto são aqueles equipados com o sistema de acelerador eletrônico *drive-by-wire*. Este acessório esta se tornando cada vez mais comum nesta categoria de veículos e deve se tornar acessório de fábrica padrão em um futuro próximo, de acordo com números que serão mostrados neste trabalho.

Será feito um estudo de viabilidade, com o projeto básico e executivo, a fim de avaliar se este produto é adequado para o mercado ao qual se destina.

Será estudado um tipo de controlador chamado adaptativo, no qual as constantes que regem o comportamento do sistema são calculadas pelo controlador automaticamente.

### 3. METODOLOGIA

Para a realização do projeto será feita, primeiramente, revisão bibliográfica sobre o assunto e pesquisa sobre os sistemas disponíveis atualmente no mercado.

Para o projeto do controlador deve-se estudar o sistema a ser controlado. Será feito um modelo simplificado do veículo, levando em conta entradas como velocidade, resistência à rolagem, arrasto aerodinâmico e inclinação da pista. Uma ilustração deste sistema se encontra na Fig. 1.

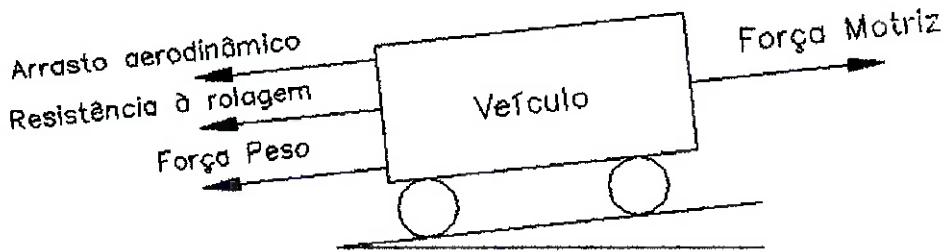


Fig. 1: modelo utilizado para representar o sistema

O controlador proposto deve ser simples, mas deve satisfazer os requisitos propostos. O sistema será simulado numericamente, com a ajuda do software MatLab, para escolher valores de ganho que apresentem um desempenho adequado, em termos de segurança, conforto e praticidade. Há dois casos a analisar, o primeiro seria quando o condutor está com o dispositivo ligado e deseja variar a velocidade do veículo através de botões localizados no comando do controlador de velocidade, e o segundo quando variações na inclinação da pista, ventos ou atrito de rolagem façam com que o sistema regule a potência disponível do motor, de forma que a velocidade não seja alterada. Este último caso é denominado resposta ao distúrbio, e o primeiro, resposta ao degrau.

Serão analisados os resultados de simulações feitas a partir de dois tipos de controladores. O primeiro, Proporcional Integral (PI), e o segundo, Proporcional Integral Derivativo (PID) levando em conta a dinâmica do atuador da borboleta de admissão de ar no motor.

A teoria de controle mais recente possibilitou a implementação de controladores que ajustem automaticamente os parâmetros de um sistema controlado. Este tipo de controle é chamado adaptativo[2,3]. O estudo deste tipo de controlador está fora do escopo deste trabalho, porém ele será apresentado e discutido, ressaltando sua importância nos sistemas contemporâneos.

Será feito um estudo de viabilidade, a fim de verificar se este projeto é rentável e se sua aplicação dentro do segmento dos carros populares é possível. Uma análise comparativa do custo de dispositivos de segurança, conforto e estética que são normalmente comprados junto com este tipo de veículos é feita. Estes custos serão comparados com o preço proposto para o dispositivo de controle de velocidade, que será obtido após uma avaliação dos componentes que o dispositivo deve ter.

Após definir parâmetros de funcionamento do dispositivo, será feito um estudo mais detalhado sobre como o controlador deve ser instalado e quais as entradas e saídas que devem ser analisadas e produzidas pelo sistema de controle.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. *O Controle de Velocidade de Cruzeiro*

O sistema de controle de velocidade de cruzeiro, ou *cruise-control*, é um dispositivo de muita importância em carros norte americanos. Sem o controle de velocidade, viagens longas se tornariam mais cansativas para o motorista além de aumentar a probabilidade de receber multas de excesso de velocidade.

O controle de velocidade é mais comum em carros norte- americanos do que em carros europeus porque as rodovias norte americanas são, em geral, mais longas e mais retas e os destinos são mais distantes. Com o aumento do tráfego, o controle de velocidade de cruzeiro está se tornado menos utilizável, mas invés de se tornar obsoleto, estes sistemas estão se adaptando a esta nova realidade – em pouco tempo, os carros serão equipados com o controle adaptativo de velocidade, que permitirá ao carro seguir o veículo em frente enquanto ajusta a velocidade para manter uma distância segura.

No Brasil, este item ainda é exclusividade de modelos de valor mais elevado, não acessível para a grande maioria. Muitos veículos médios comercializados atualmente, como o VW Golf e Chevrolet Vectra já possuem este item como um opcional de fábrica, mas a grande maioria dos veículos vendidos no país não possui este item nem como opcional.

O recente avanço na tecnologia de motores de combustão interna gerou planta que pode usar tanto a gasolina como o álcool como combustível, em qualquer proporção. O álcool tem um valor por litro inferior ao da gasolina, porém gera um consumo maior. No período de 28/11/2004 a 04/12/2004, na cidade de São Paulo, a economia que se faz com combustível, ao se usar o álcool em vez da gasolina é de 23,8 %.<sup>1</sup> Este fato tem incentivado as pessoas que possuem veículos bicompostíveis a enfrentar as estradas rumo a cidades próximas nos finais de semana, com o objetivo de fugir do agito das grandes cidades, como, por exemplo, um dos autores deste trabalho. Este é um ponto positivo se pensarmos na aceitação e demanda de um dispositivo de controle de velocidade de cruzeiro.

#### 4.1.1. Funcionamento

O *cruise-control* tem outras funções além de controlar a velocidade do carro. Como no sistema mostrado na figura a seguir, o *cruise control* pode acelerar e desacelerar o carro intervalos de 5 km/h ao toque de um botão. Além de ter algumas funções de segurança – o controle de velocidade tem que ser desligado no momento em que o pedal de freio é acionado, e não pode ser ligado em velocidades inferiores a 60 km/h.

O sistema mostrado a seguir tem cinco botões: *On*, *Off*, *Set/Accel*, *Resume* e *Cruise*. Além do sexto controle, o pedal de freio, e se o veículo tiver transmissão manual a embreagem também tem a função de desligar o *cruise control*.

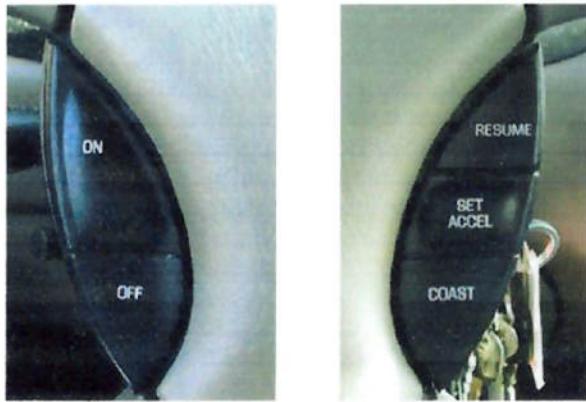


Fig.2: botões de Acionamento do controlador

- Os botões *On* e *Off* não são muito usados. A única função destes botões é dizer para o veículo que um comando será dado a seguir. O botão *Off* desliga o *cruise control* mesmo que ele esteja ligado. Alguns sistemas não têm estes botões, eles desligam o sistema quando o motorista pisa no freio, e liga o sistema quando o motorista aperta o botão *Set*.
- O botão *Set/Accel* tem a função de manter a velocidade em que o motorista está dirigindo. Se o carro estiver a 60 km/h quando o botão for apertado, o carro irá manter a velocidade de 60 km/h. Segurar o botão *Set/Accel* apertado

---

<sup>1</sup> Cálculos realizados para se chegar a este número se encontram no Anexo A.

faz o carro acelerar, neste caso, apertando apenas uma vez faz o carro acelerar em 5 km/h

- Se o sistema for desarmado quando o motorista acionar o freio, ao apertar o botão *Resume*, o veículo volta a acelerar até a ultima velocidade setada.
- Segurar o botão *Coast* apertado faz com que o veículo se desacelere, como se o motorista tivesse tirado o pé do acelerador. Neste caso, ao apertar uma vez o botão *Coast* o carro desacelerar em 5 km/h.
- O pedal do freio e o pedal da embreagem são chaves que desarmam o controle de velocidade assim que são acionados, então se o motorista quiser desligar o sistema basta que ele acione a embreagem ou o freio.

#### 4.1.2. Como o Sistema é conectado

O *cruise-control* controla a velocidade do veículo da mesma maneira que o motorista faz, ajustando a posição do acelerador. O sistema regula a velocidade interferindo na borboleta de admissão de ar. A borboleta controla a potência e a velocidade do motor limitando a quantidade de ar que entra nos cilindros.

Para os sistemas onde não há presença de um acelerador eletrônico, isto é feito através de um cabo, que se conecta a um atuador. Este atuador é instalado junto com o controlador de velocidade, e é responsável por emular os movimentos do pedal do acelerador.

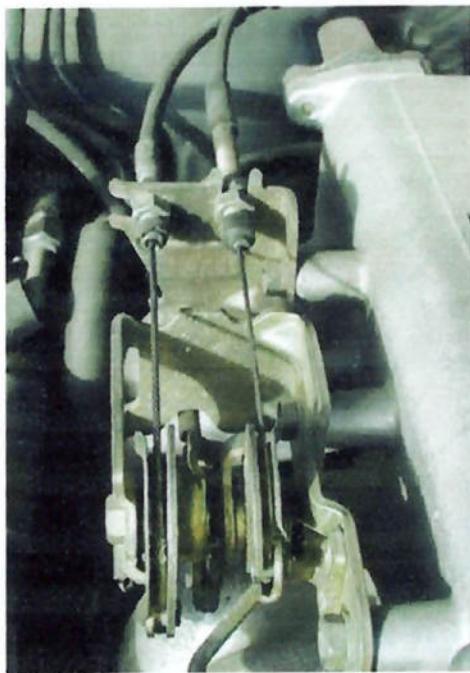


Fig.3: acionamento via cabo

Na Fig.3, é possível visualizar dois cabos conectados ao pivô que move a válvula. Um dos cabos é ligado ao acelerador, e um é ligado ao atuador. Quando o *cruise-control* é acionado, o atuador move o cabo conectado ao pivô, que ajusta a abertura da borboleta, mas também move o cabo que está conectado ao pedal do acelerador, este é o motivo do pedal se mover para cima e para baixo quando o *cruise control* é acionado.



Fig.4: atuador a vácuo

Muitos carros usam atuadores movidos pelo vácuo do motor para operar o acelerador. Estes sistemas usam pequenas válvulas, controladas eletronicamente, para regular o vácuo no diafragma. Estes sistemas funcionam com pressão proveniente da linha dos freios assistidos à vácuo.

Para que o sistema de *cruise-control* possa operar, é preciso que haja uma entrada, um sinal de referência, que indique qual velocidade deve ser seguida. A partir desse sinal o dispositivo será capaz de avaliar se o veículo está se movendo com uma velocidade superior ou inferior àquela desejada. Todos os veículos modernos, equipados com sistemas de injeção eletrônica, possuem um sensor chamado VSS (*Vehicle Speed Sensor*), que emite pulsos com uma freqüência diretamente proporcional à velocidade do veículo. A partir do sinal desse sensor a ECU faz ajustes referentes à quantidade de combustível que deve ser injetada e o momento da ignição. É justamente o sinal deste dispositivo que é usado como entrada dos sistemas de *cruise-control*, e serve de referência no momento do acionamento do sistema e também para avaliar se o sistema deve abrir mais ou menos a borboleta de admissão de ar. Este sensor se encontra tanto em modelos com e sem acelerador eletrônico. Ele se encontra, geralmente, instalado no eixo de saída da transmissão. É neste local que se encontra também o cabo do velocímetro, que manda o sinal para o painel do carro.

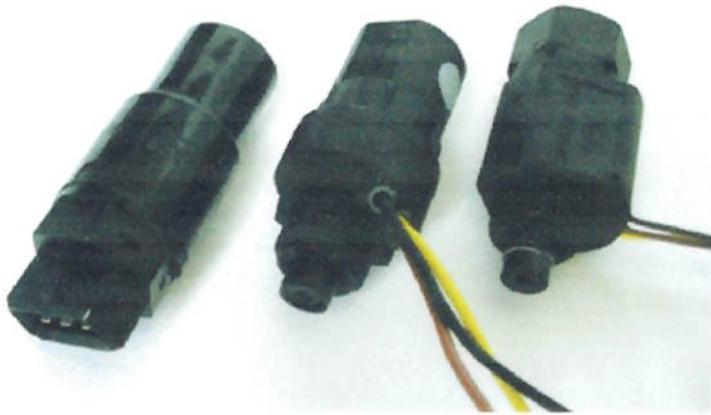


Fig.5: sensores VSS

#### **4.2. Características especiais de veículos equipados com acelerador eletrônico**

O primeiro veículo nacional, do segmento dos compactos, equipado com acelerador eletrônico foi o Fiat Palio Fire, com motor 1.3 16 válvulas, em Outubro de 2000. Na categoria dos populares, o pioneiro foi o Renault Clio, no ano de 2001, seguido pelo Peugeot 206, no mesmo ano. No ano de 2002 foi a vez da família Gol, e em 2004, os populares da Fiat, como o Palio e o Siena.

Nestes veículos, todas as ligações entre o pedal e a borboleta de admissão de ar são feitas via cabos elétricos. O movimento do pedal do acelerador aciona um potenciômetro, que regula uma voltagem de saída. Este sinal passa pela central eletrônica do carro, a ECU (*Electronic Control Unit*), que processa o sinal antes de mandar para o atuador da borboleta, que nada mais é do que um motor elétrico. Para uma maior segurança, é comum haver dois potenciômetros, ou sensores, no pedal do acelerador, e dois sensores de posição na borboleta. Os sensores da borboleta alimentam a ECU, que se encarrega de fazer um ajuste fino da posição e uma possível detecção de falhas no sistema. Um esquema do funcionamento se encontra na Fig.6.

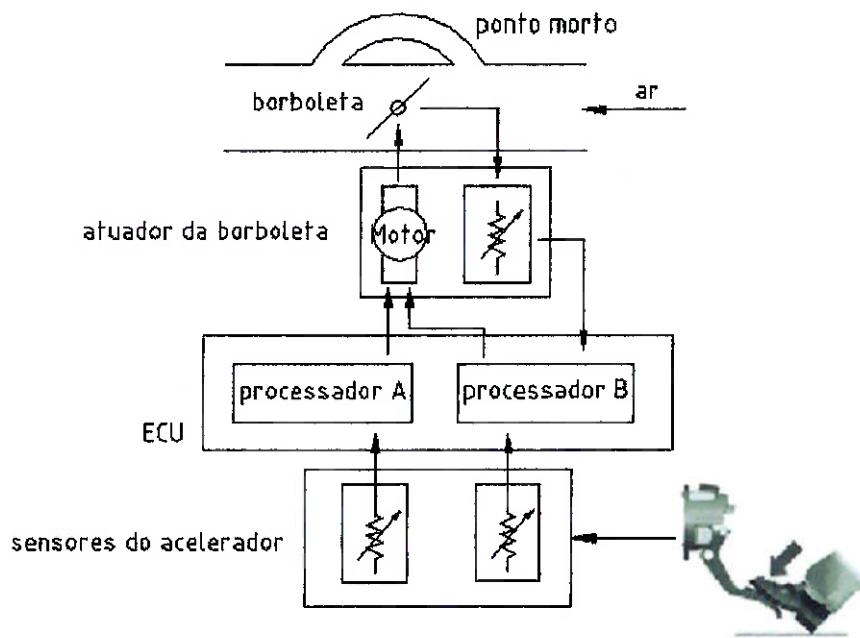


Fig.6: esquema do funcionamento de um acelerador eletrônico

A Fig.7 mostra o mecanismo do motor elétrico do acelerador e o sensor duplo de posição da borboleta. A Fig.8 mostra o pedal de um acelerador eletrônico.

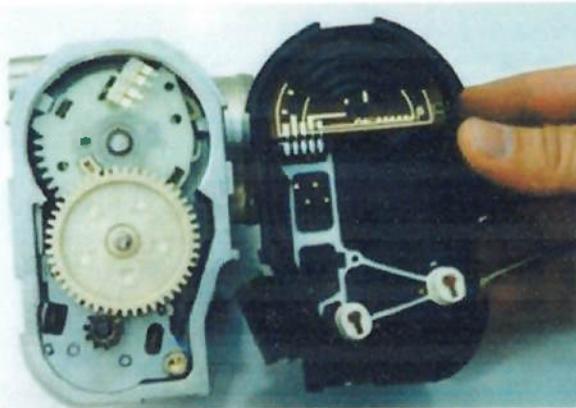


Fig.7: motor do acelerador



Fig.8: pedal do acelerador

A Tabela 01 mostra as tensões de alimentação e operação dos diversos componentes de um sistema de acelerador eletrônico[4].

Tabela 01: valores de tensão de operação dos componentes de um sistema drive-by-wire

<b>Atuador da borboleta</b>	
Tensão de alimentação	12 V
<b>Sensor duplo de posição da borboleta</b>	
Tensão de alimentação	5 V
borboleta aberta, sensor 1	3,4 V
borboleta fechada, sensor 1	4,1 V
borboleta aberta, sensor 2	1,6 V
borboleta fechada, sensor 2	0,9 V
<b>Sensor de posição do pedal do acelerador</b>	
Tensão de alimentação do potenciômetro 1	5 V
sem aceleração, potenciômetro 1	0,7 V
aceleração máxima, potenciômetro 1	4,5 V
Tensão de alimentação do potenciômetro 2	5 V
sem aceleração, potenciômetro 2	0,3 V
aceleração máxima, potenciômetro 2	2,2 V

### 4.3. Controlando o Cruise Control

O cérebro do sistema de controle de velocidade é um pequeno computador normalmente encontrado em baixo do capô ou atrás do painel. O diagrama a seguir mostra as entradas e saídas de um *cruise-control* típico.

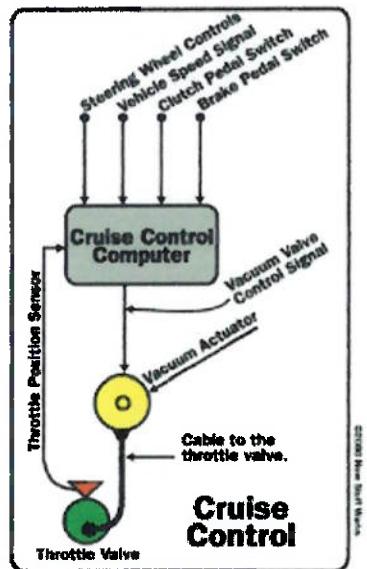


Fig.9: entradas e Saídas do Sistema

Um bom sistema de controle de velocidade acelera o carro agressivamente até a velocidade desejada, sem apresentar *overshoot*, e mantém a velocidade sem grandes variações independente da carga do veículo, ou da intensidade da subida que o carro irá subir. Controlar a velocidade de um veículo é uma aplicação da teoria de controle. O *cruise-control* controla a velocidade do veículo pelo ajuste da posição do acelerador, então ele precisa de sensores que digam a ele a velocidade desenvolvida e a posição do acelerador. O sistema também precisa de controles que digam a velocidade desejada e quando ele deve ser desarmado.

O mais importante sinal de entrada é a velocidade, que é obtido do sensor VSS. A partir deste sinal que será feito o ajuste do acelerador.

### 4.3.1. Controle Proporcional

Em um controle proporcional, o *cruise-control* ajusta o acelerador ao erro proporcional, sendo que o erro é a diferença entre a velocidade atual e a velocidade desejada. Então, se o *cruise-control* está programado para chegar a 60 km/h e o carro está a 50 km/h, o atuador do acelerador ficará ligado por um longo período. Quando o carro chegar a 55 km/h, a posição do acelerador será a metade da posição anterior. O resultado é que quanto mais perto da velocidade desejada, a aceleração é menor.

### 4.3.2. Controle PID

A maioria dos controles de velocidade usa o método de controle proporcional – integral – derivativo (PID). O fator proporcional é o mesmo que o usado no controle proporcional. O fator integral é baseado na integral no tempo do erro da velocidade, isto é a diferença entre as distâncias que o veículo percorreu e a distância que o veículo deveria ter percorrido se estivesse na velocidade desejada. Este fator ajuda o carro a vencer subidas, e também ajuda o carro a estabilizar na velocidade desejada. Supondo que o veículo comece a subir uma ladeira e a sua velocidade começa a diminuir. Depois de um certo tempo, o controle integral começa a aumentar um pouco a aceleração, aumentando cada vez mais, já que quanto maior o tempo em que o veículo fica com a velocidade menor que a desejada, maior o erro da distância percorrida.

O fator derivativo, o qual é a aceleração, ajuda o *cruise-control* a responder rapidamente a mudanças, como ladeiras. Se o carro começa a diminuir a velocidade, o *cruise-control* pode ver esta desaceleração antes que a velocidade mude significativamente, respondendo prontamente mudando a posição do acelerador.

### 4.3.3. Controles Adaptativos

Os controles de velocidade modernos são projetados para oferecer acelerações suaves, erros em regime permanente próximos de zero, bom ajuste da velocidade desejada em diferentes inclinações de pista e robustez para se adequar a variações no sistema controlado e condições de operação[2,3]. O dispositivo deve ser

aplicável em diversos tipos de veículos sem necessidade de sofrer ajuste e calibrações nos ganhos do controlador.

Conseguir todos os requisitos mostrados acima com controladores convencionais, com ganhos pré-fixados, é uma tarefa um tanto quanto difícil. Para satisfazer a um variedade grande de veículos é preciso fazer algum tipo de ajuste nestes ganhos.

Os controles adaptativos conseguem resolver este problema de maneira adequada. O princípio por trás deste tipo de controlador é que ele ajusta os parâmetros e constantes do sistema controlado automaticamente. Os controladores convencionais assumem que todo o sistema analisado é linear, ou seja, não sai muito longe da posição de equilíbrio para o qual o sistema foi projetado. Ele faz uma espécie de ajuste para lidar com as não-linearidades presentes nos sistemas reais.

A função de transferência de um sistema que representa a dinâmica de um automóvel, de forma simplificada, está mostrada na eq.(1), que será deduzida mais adiante. A função de transferência serve para analisar a resposta de um sistema a entradas conhecidas.

$$F.T. = \frac{K}{\tau \cdot s + 1} \quad (1)$$

Esta equação mostra que há duas constantes que definem o sistema,  $K$  e  $\tau$ . A constante  $K$  engloba aspectos como as forças de resistência à rolagem, que dependem de características geométricas, climáticas e da velocidade do veículo, e a constante  $\tau$ , que engloba características de inércia, como a massa do sistema.

A grande vantagem dos controladores adaptativos é ajustar estas duas constantes para diferentes condições de operação[2]. Através deste tipo de controlador seria possível, com maior facilidade, adaptar um mesmo controle de velocidade para carros compactos e grandes, com uma diferença significativa de peso, sobre uma grande variedade de velocidades de cruzeiro.

O estudo de controladores adaptativos está fora do escopo deste trabalho, em parte por tratar de assuntos que não são comumente abordados em cursos de graduação.

#### 4.4. Modelando o Sistema

Um dos mais comuns sistemas de controle disponíveis em carros modernos é o controle de velocidade (*cruise-control*), que automaticamente regula a velocidade longitudinal do veículo pelo ajuste do acelerador. Normalmente, o controle de velocidade é acionado pelo motorista que quer manter a velocidade constante durante longos períodos, como em auto-estradas. Este sistema alivia o motorista de ter que continuamente ajustar o acelerador. O motorista ativa o sistema enquanto dirige numa certa velocidade, que é guardada como a desejada (ou *setpoint*) e deve ser mantida pelo controlador.

O modelo do controle de velocidade é relativamente simples. Se a inércia das rodas é desconsiderada, e assumindo que a resistência à rolagem tem intensidade variável com a velocidade do veículo, o problema pode ser reduzido ao seguinte sistema [5]:

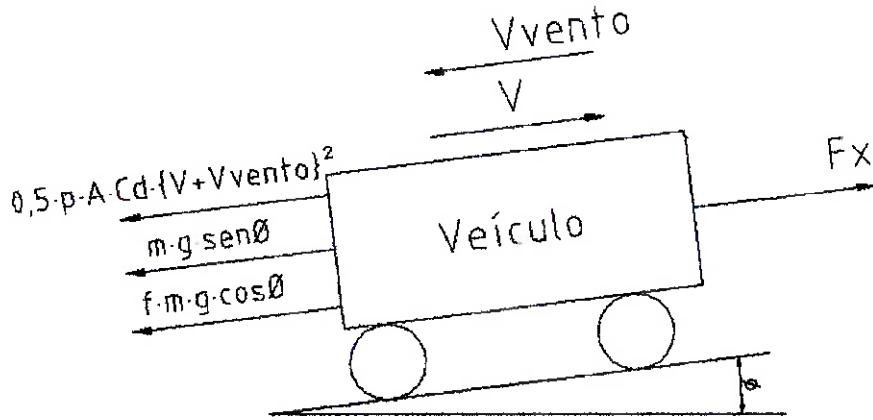


Fig.10: modelo do Veículo

A Fig. 2 ilustra os esforços atuantes no veículo: a força motriz, a velocidade relativa ao vento, o arrasto aerodinâmico, a resistência à rolagem e a força peso devido a inclinações na pista. Assim, o projeto do *cruise-control* pode ser baseado na

equação do teorema do movimento do baricentro (T.M.B.) [6], na direção longitudinal do veículo. O resultado está mostrado na eq.(2).

$$m \cdot \frac{dV}{dt} = F_x - m \cdot g \cdot \sin\theta - f \cdot m \cdot g \cdot \cos\theta - 0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot C_d \cdot (V + V_{vento})^2 \quad (2)$$

Onde,  $f$ , representa um coeficiente de cálculo da força de resistência à rolagem. Este coeficiente é função da velocidade do veículo, da pressão dos pneus e do tipo construtivo do pneu [5]. Este coeficiente não será analisado em detalhes.

A eq.(2) é não linear na velocidade  $V(t)$ , e pode ser linearizada ao redor do ponto de operação. No equilíbrio (quando  $dV/dt=0$ ) a eq.(2) pode ser resolvida por

$$F_{x0} = m \cdot g \cdot \sin\theta_0 + f \cdot m \cdot g \cdot \cos\theta_0 + 0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot C_d \cdot (V_0 + V_{vento})^2 \quad (3)$$

e usando os valores de:

$$\begin{aligned} g &= 9,81 \text{ m/s}, u_0 = 20 \text{ m/s}, \theta_0 = 0, m = 1000 \text{ kg} \\ \rho &= 1202 \text{ kg/m}^3, A = 1 \text{ m}^2, C_d = 0,5, f = 0,015, u_w = 2 \text{ m/s}; \end{aligned}$$

Chegamos a,

$$F_{x0} = 292.592 \text{ N}$$

Utilizando-se das expansões por séries de Taylor, ao redor do ponto de operação, temos:

$$\tau \cdot \dot{V} + V' = K \cdot (F' + d) \quad (4)$$

Onde,

$$\begin{aligned} V &= V_0 + V'; F_x = F_{x0} + F'; \theta = \theta_0 + \theta'; d = m \cdot g \cdot (f \cdot \sin\theta_0 - \cos\theta_0) \theta' \\ \tau &= \left( \frac{m}{(\rho \cdot C_d \cdot A \cdot (V_0 + V_{vento}))} \right); K = \frac{1}{(\rho \cdot C_d \cdot A \cdot (V_0 + V_{vento}))}; \end{aligned}$$

Utilizando os parâmetros acima, obtemos  $\tau = 75,632$  s e  $K = 0,0756$  (m/s)/N.

Utilizando a transformada de Laplace[7], onde se passa do espaço no tempo,  $t$ , para o espaço em  $s$ , obtém-se, da eq.(4):

$$\tau \cdot V' \cdot s + V' = K \cdot (F' + d) \quad (5)$$

Desconsiderando os distúrbios, ou entradas de inclinação, a Função de Transferência do sistema pode ser escrita como:

$$F.T. = \frac{\text{saída}}{\text{entrada}} = \frac{V'}{F'} = \frac{K}{\tau \cdot s + 1} \quad (6)$$

Baseado na eq.(6), o diagrama de blocos do sistema, que representa o comportamento do veículo, pode ser representado como mostrado na Fig.11.

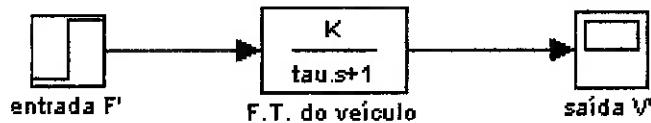


Fig.11: diagrama de Bloco do sistema veículo

Pode-se pensar agora em construir um sistema que leve em conta entradas de distúrbio, como inclinação da pista, e que tenha ação de um controlador. O diagrama de blocos completo, ficaria, como mostrado na Fig.12.

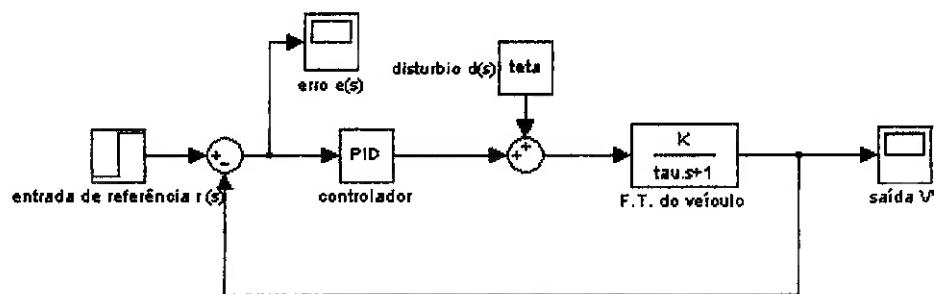


Fig.12: diagrama de blocos do sistema com distúrbios e controlador, em malha fechada

#### **4.5. Projeto com controlador tipo PI**

Usando um controlador proporcional-integral (PI), cuja função de transferência está mostrada abaixo, obtém-se uma equação para o sistema inteiro, como mostrado na eq.(8).

$$G_c(s) = \frac{F'(s)}{e(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (7)$$

$$V'(s) = \frac{K \cdot (K_i + K_p \cdot s)}{\tau \cdot s^2 + (K \cdot K_p + 1)s + K \cdot K_i} \cdot r + \frac{K \cdot s}{\tau \cdot s^2 + (K \cdot K_p + 1) \cdot s + K \cdot K_i} \cdot d \quad (8)$$

O sistema será simulado ou para entradas tipo degrau,  $r(s)$ , ou para distúrbios,  $d(s)$ . Assim, em cada caso será obtida uma Função de Transferência para o sistema.

Os ganhos do controlador ( $K_i$  e  $K_p$ ) devem ser selecionados para obter boa performance no sistema em malha fechada. Isso requer a consideração de vários fatores como a estabilidade, erros no sistema estabilizado e resposta transiente.

#### **4.6. Projeto com controlador tipo PI e consideração da dinâmica do atuador**

O modelo com controlador tipo PI negligencia qualquer dinâmica associada ao atuador que ajusta o ângulo de abertura da borboleta do acelerador. O modelo de um motor DC é dado como[8]:

$$G(s) = \frac{K_a}{s \cdot (\tau_a \cdot s + 1)} \quad (9)$$

onde a entrada é o ciclo de carga do motor (*duty cycle*), em porcentagem, e a saída é a abertura da borboleta do acelerador em ângulo, em graus.

A Função de transferência de um controlador tipo PID é da seguinte forma:

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_D \cdot s \quad (10)$$

Considerando agora o atuador, chega-se ao novo diagrama de blocos, mostrado na Fig.13, e a uma nova equação que descreve o sistema, mostrada na eq.(11).

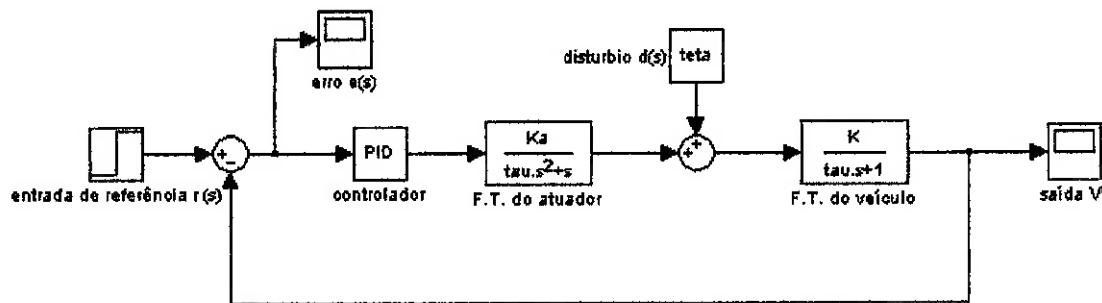


Fig.13: diagrama de blocos com controlador PID e considerando a dinâmica do atuador

$$\begin{aligned} V'(s) = & \frac{K \cdot (K_i + K_p \cdot s + K_D \cdot s^2)}{(\tau + K \cdot K_D) \cdot s^2 + (K \cdot K_p + 1)s + K \cdot K_i} \cdot r + \\ & \frac{K \cdot s}{(\tau + K \cdot K_D) \cdot s^2 + (K \cdot K_p + 1)s + K \cdot K_i} \cdot d \end{aligned} \quad (11)$$

## 4.7. Projeto Básico e Estudo de Viabilidade

### 4.7.1. Necessidades do projeto

Foram analisadas as características intangíveis que o controlador de velocidade deveria ter e oferecer ao usuário, chamadas de necessidades. Pode-se dividir estas necessidades em três principais[9]:

- Necessidades reais: são aquelas que o produto deve prestar ao usuário, que são inerentes ao tipo de produto.

- Necessidades percebidas: são aquelas características que o cliente deve perceber do produto e do fabricante, geralmente são características adicionais, que tornam o produto único.
- Necessidades culturais: são aquelas que são esperadas do produto dentro do contexto cultural atual.

Tabela 02: necessidades do controle de velocidade

Necessidades	
<b>Real</b>	-Prover conforto e segurança a um custo baixo
<b>Percebida</b>	-Facilidade de operação/simplicidade -Confiabilidade/Desempenho
<b>Cultural</b>	-Tecnologia de ponta -Status (geralmente o acessório se encontra em veículos de luxo)

#### 4.7.2. Especificações técnicas

O ponto mais importante a ser considerado no projeto é o desempenho do dispositivo. Trata-se de um problema de controle, onde um sistema é submetido a uma entrada tipo degrau ou um distúrbio. Serão escolhidos valores de desempenho que estejam de acordo com as necessidades de conforto, segurança e praticidade do dispositivo.

Os parâmetros de desempenho desejados estão mostrados na Tabela 03. São feitos comentários, mostrando as hipóteses levantadas para chegar aos valores escolhidos.

Tabela 03: parâmetros de desempenho do dispositivo

Parâmetros de desempenho	Comentário
<b>Tempo de ajuste/Rise Time &lt; 10 s</b>	À primeira vista, este valor é elevado, mas considerando-se que estamos tratando com veículos de baixa potência, portanto baixa capacidade de resposta, este valor é adequado.
<b>Overshoot &lt; 10 %</b>	Foi escolhido para não haver margem de desrespeito à velocidade máxima da via.
<b>Erro em Regime Permanente &lt; 5 %</b>	Não deixa margem para desrespeito às leis de trânsito. Esta dentro da precisão dos velocímetros deste tipo de automóveis.

Como esta etapa do projeto é o estudo de viabilidade, e não o projeto executivo, serão apresentadas as características construtivas e operacionais do projeto de uma forma abrangente. Mais adiante será apresentado um estudo mais detalhado, que será condizente com os dados aqui apresentados.

Tabela 04: características operacionais

Características Operacionais	Comentário
<b>Alimentação do sistema</b>	O sistema deve alimentado com a voltagem da bateria, ou seja, 12V, mas deve baixar esta tensão para a tensão de operação de 5V, adequada para microprocessadores.
<b>Tensão de saída</b>	As tensões de saída, responsáveis por controlar o motor da borboleta, devem estar entre 0 e 5V, que representam a condição de abertura e fechamento máximo.
<b>Confiabilidade</b>	Deve-se minimizar a possibilidade de falhas no sistema. Caso ocorram, o sistema deve ser desativado instantaneamente.
<b>Durabilidade</b>	Os componentes usados devem ser de qualidade. Serão escolhidos fornecedores conhecidos e respeitados no mercado.

Tabela 05: características construtivas

Características Construtivas	Comentário
<b>Material</b>	O material do controle interno, dentro da cabine, deve ser de plástico, com cores semelhantes às dos carros a que são destinados. A fiação que liga o sistema à ECU deve ser capaz de resistir impactos e variações de temperatura e umidade.
<b>Dimensão</b>	O controle interno pode ser do tipo alavanca adicional, comando fixo no painel ou comando fixo no volante. A carcaça dos componentes eletrônicos deve ser fixada em lugares que não estejam visíveis.
<b>Circuito eletrônico</b>	Serão analisados posteriormente os tipos de circuitos e processadores adequados ao projeto.

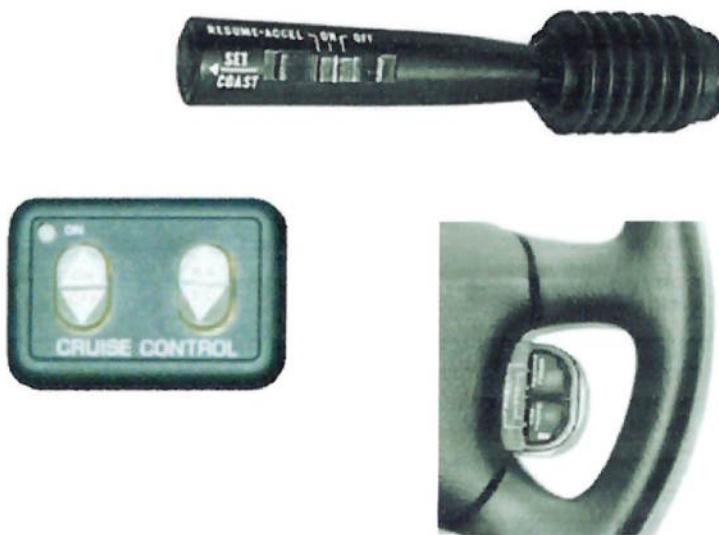


Fig.14: diferentes tipos de comandos internos do controle de velocidade

Há dois casos em que o sistema deve ser desligado automaticamente. Quando a velocidade programada não for possível de ser atingida, no caso de uma subida muito íngreme e desaceleração, e quando a velocidade programada for inferior à real, no caso de uma descida íngreme, em ambos os casos o motorista será alertado por uma luz espia no painel.

#### 4.7.3. Estudo econômico

Como dito anteriormente, este dispositivo destina-se a carros da categoria popular. Porém, o comprador deve ter recursos suficientes para adquirir este dispositivo. Não serão alvo deste produto pessoas que se dispõe a abrir mão de todo tipo acessório para conseguir um veículo ao menor preço possível, mas pessoas preocupadas em economizar, ou seja, que estejam comprando carros do tipo popular, mas que possuam recursos suficientes para adquirir alguns itens de conforto, segurança e estética.

Para representar o consumo destes itens adicionais pensou-se em pessoas que desejam ter seu veículo equipado com pára-choques pintados na mesma cor da carroceria, conjunto de som, rodas de liga-leve e o próprio controlador de velocidade.

Como já existem no mercado itens de controle de velocidade mais simples, como é o caso do VW Gol e o sistema SLM, percebe-se a preocupação dos fabricantes e do consumidor com este tipo de acessório em categorias do tipo popular.

Primeiramente foi definido quais veículos poderiam ser equipados com este dispositivo, ou seja, todos da categoria popular que tenham acelerador eletrônico. A Tabela 06 mostra os veículos que se beneficiariam do controle de velocidade.

Tabela 06: veículos da categoria popular equipados com acelerador eletrônico

<b>Marca</b>	<b>Modelo</b>	<b>Motor</b>	<b>Ano em que recebeu acelerador eletrônico</b>
Renault	Clio	1.0 16v	2001
Peugeot	206	1.0 16v	2001
Volkswagen	Gol/Parati Plus	1.0 16v	2002
Volkswagen	Polo	1.0 16v	2003
Volkswagen	Gol City	1.0 8v	2003
Volkswagen	Fox City/Plus	1.0 8v	2003
Fiat	Palio Fire	1.0 8v	2004
Fiat	Siena Fire	1.0 8v	2004

Foi feita uma pesquisa no mercado para levantar o preço médio dos carros aos quais se destinaria este produto e o custo dos itens de conforto, estética e segurança mencionados anteriormente.

Tabela 07: preços de automóveis populares alvo deste projeto

Carro	Preço
Peugeot 206 Sensation 2005 3p 1.0 16v <sup>2</sup>	R\$ 26.540,00
Clio Authentique Plus 2005 1.0 <sup>2</sup>	R\$ 22.900,00
Gol City GIII 2004 + parachoque na cor do veículo <sup>3</sup>	R\$ 19.944,94
Palio Fire 1.0 2004 + kit visual e desembacador <sup>3</sup>	R\$ 19.679,69
<b>Média</b>	<b>R\$ 22.266,16</b>

Tabela 08: preços levantados de conjuntos de som<sup>4</sup>

Equipamento de som	Preço
Aparelho de som com MP3 Sony	R\$ 460,00
Aparelho de som sem MP3 Sony	R\$ 320,00
Caixas de som dianteiras Sony	R\$ 140,00
Caixas de som traseiras Sony	R\$ 120,00
<b>Total com MP3</b>	<b>R\$ 720,00</b>
<b>Total sem MP3</b>	<b>R\$ 580,00</b>

Tabela 09: preços levantados do conjunto rodas de liga leve e pneus<sup>5</sup>

Rodas e Pneus	Preço
Rodas 15" TSW, unidade	R\$ 220,00
Pneus Firestone 195/55R15, unidade	R\$ 260,00
<b>Total, jogo completo</b>	<b>R\$ 1.920,00</b>

Tabela 10: preços levantados de controladores de velocidade<sup>6</sup>

Controle de velocidade	Preço
Acessório original VW Golf	R\$ 449,00
Acessório original Fiat Stilo	R\$ 378,00
Acessório aftermarket importado Rostra	R\$ 2.001,00

Pode-se perceber que o preço de um controle de velocidade só é razoável quando este é item opcional original de fábrica. Um destes motivos é o baixo custo para os fabricantes. Eles já conseguem lucros com outros opcionais, ou mesmo com o próprio veículo. Caso se opte por um dispositivo no mercado de reposição, o custo

<sup>2</sup> Fonte: <[www.webmotors.com.br](http://www.webmotors.com.br)>, Acesso no dia 01/12/2004.

<sup>3</sup> Fonte: <[www.webmotors.com.br](http://www.webmotors.com.br)>, Acesso no dia 16/10/2004.

<sup>4</sup> Fonte: Promocenter, Rua Augusta nº 1562 - São Paulo/SP, dia 03/10/2004.

<sup>5</sup> Fonte: <[www.autoz.com.br](http://www.autoz.com.br)>, Acesso no dia 12/10/2004.

será muito elevado, sendo que não existem produtos nacionais no mercado. Esta seria uma boa oportunidade para este tipo de produto, caso o preço fosse compatível com aquele do acessório original de fábrica.

Foi visto o preço de acessórios de conforto e segurança, como equipamentos de som e rodas, frente ao preço de um carro popular. O custo destes acessórios varia entre 3% do valor do veículo, no caso do som, a 9% no caso das rodas.

O preço ao consumidor do controle de velocidade deve ser calculado com mais detalhes, com base nos seus componentes e custo de fabricação, mas pode-se adiantar que este deve ficar na faixa dos R\$300,00, visto o público alvo.

**Preço alvo do controle de velocidade: R\$300,00**

Para saber o tamanho do potencial mercado consumidor para este dispositivo, é apresentada a Tabela 11, mostrando o volume de vendas[10] no mercado nacional de veículos da categoria popular, com motor 1.0.

Tabela 11: volume de vendas de carros 1.0 nos últimos anos

ano	número de veículos 1.0 vendidos
2002	801.869
2003	699.926
2004 <sup>7</sup>	603.789
2004 <sup>8</sup>	724.547

O cálculo detalhado da estimativa do número total de veículos vendidos com acelerador eletrônico, por ano, se encontra no Anexo B. A seguir serão apresentados apenas os resultados, ou seja, o número por ano.

Idealizando uma meta de vender este dispositivo para 0,25% dos compradores deste tipo de veículo, chegam-se aos números da Tabela 12.

<sup>6</sup> Fonte: sites dos fabricantes e [www.dalgas.com.br](http://www.dalgas.com.br), Acesso no dia 12/10/2004.

<sup>7</sup> Dados até o mês de Outubro.

<sup>8</sup> Projeção linear até Dezembro, com os dados de Janeiro a Outubro.

Tabela 12: meta de vendas e receita bruta

Ano	Número de veículos 1.0 vendidos com acelerador eletrônico	Meta de vendas (0,25% do total)	Preço unitário projetado (R\$)	Receita Bruta (R\$/mês)
2001	41.366	103	300,00	2.585,38
2002	101.656	254	300,00	6.353,50
2003	101.213	253	300,00	6.325,81
2004	198.922	497	300,00	12.432,63

A receita bruta não é um valor muito elevado, porém se fez uma meta de vendas extremamente modesta. Deve-se considerar que nos próximos anos o número de veículos equipados com acelerador eletrônico aumentará, aumentando o potencial mercado consumidor e as receitas projetadas. Além disso, este dispositivo pode ser utilizado em outros veículos fora da categoria dos populares, mas que possuam acelerador eletrônico, como é o caso do Chevrolet Astra, Zafira, Montana, Meriva, Renault Megane, Volkswagen Golf, Honda Fit, Peugeot 307, Citroen Picasso, entre outros.

Estes cálculos não tiveram por objetivo fazer uma análise precisa e conclusiva sobre a viabilidade do projeto, mas apenas dar uma noção do potencial de retorno de um produto deste tipo.

#### 4.7.4. Alternativas /Matriz de decisão

Foram pensadas três alternativas diferentes para serem avaliadas. As características de cada alternativa se encontram abaixo. As diferentes alternativas para a posição do comando interno foram mostradas na fig.14. Os *triggers* para desligar o sistema. O sistema para desligar o controle de velocidade pelos pedais, pode ser com dispositivos como sensores ligados direto aos pedais ou o sistema pode ser desligado eletronicamente, com sinais do sistema eletrônico do veículo (neste caso o carro deve possuir sensores que disparam sinais elétricos para a central eletrônica do veículo, de onde serão clonados estes sinais para uso no sistema de controle de velocidade).

### Alternativas

	A	B	C
<b>Posição do comando interno</b>	Volante	Painel	Alavanca
<b>Tipo de atuador</b>	Elétrico e partilhado	Elétrico e independente	Elétrico e partilhado
<b>Tipo de processamento</b>	Digital	Analógico discreto	Analógico discreto
<b>Sensores do pedal e acelerador</b>	Acionamento eletrônico	Acionamento mecânico nos pedais	Acionamento eletrônico

Para a matriz de decisão foram avaliados diferentes atributos, cada um com um peso diferente. Como o objetivo deste projeto é ter um dispositivo de baixo custo, este item recebeu o maior peso. As notas variam de 1 a 3.

### Matriz de decisão

Atributo	Peso	A		B		C	
		nota	nota x peso	nota	nota x peso	nota	nota x peso
Custo	0,4	3	1,2	1	0,4	2	0,8
Segurança	0,2	3	0,6	2	0,4	3	0,6
Confiabilidade	0,05	3	0,15	2	0,1	3	0,15
Universalidade	0,2	2	0,4	3	0,6	2	0,4
Facilidade de operação	0,1	3	0,3	2	0,2	3	0,3
Estética	0,05	3	0,15	1	0,05	2	0,1
<b>Total</b>	<b>1</b>	<b>17</b>		<b>11</b>		<b>15</b>	

Na atribuição das notas, pode-se destacar que a alternativa B teve um custo maior, por usar um atuador elétrico independente. A mesma alternativa teve nota baixa em segurança por usar mais componentes nos pedais, ou seja, maior propensão a falhas. A facilidade de implementação deu uma pequena vantagem a alternativa A que se mostra mais apropriada a veículos com acelerador eletrônico devido ao processamento digital de sinais. A facilidade de operação tratou da localização dos comandos internos e a estética da aparência dos comandos em diferentes posições.

A alternativa escolhida foi a A.

#### **4.8. Projeto Executivo**

Nesta etapa serão detalhados os componentes necessários para a construção do dispositivo, o custo de produção, e a partir dele será definido um preço de venda para o consumidor.

As funções que o sistema deve ter serão explicadas de forma mais detalhada, bem como as entradas e saídas que este sistema deve possuir.

O sistema de controle de velocidade será desenvolvido para veículos dotados de acelerador eletrônico já que esta tecnologia já equipa a maioria dos veículos populares a venda no país e deve se tornar padrão em breve. Utilizamos como referência o sistema do Volkswagen Gol que é um dos veículos mais vendidos do país, este veículo é dotado do sistema de acelerador eletrônico e de sensor de velocidade. O sensor de velocidade funciona emitindo pulsos que têm sua freqüência modificada de acordo com a velocidade em que o veículo se encontra. O sistema de cruise control deverá ser ligado na linha do sinal de velocidade que sai do pedal do acelerador e é ligada à ECU.

Para que o sistema funcione foi projetado um circuito eletrônico capaz de interpretar os pulsos emitidos pelo sensor comparando-os com a velocidade pré-escolhida pelo motorista.

O circuito do sistema foi dividido em diversos blocos funcionais que são:

##### **4.8.1. O circuito contador**

O circuito contador é capaz de contar quantos pulsos o sensor manda para a ECU e transforma esse sinal num valor em binário que sai por um bus de dados de 0,5 km/h de resolução.

Esta resolução foi atingida limitando as velocidades reconhecidas pelo sistema. Como a maioria dos veículos populares não é capaz de atingir altas velocidades e os limites das vias públicas brasileiras são de 120 km/h, a velocidade máxima reconhecida pelo contador é de 160 km/h. Como parâmetro de velocidade mínima, foi utilizado o padrão para este tipo de sistema, que é de 40 km/h, desta

maneira o sistema não poderá ser ligado em velocidades menores que 40 km/h e maiores que 160 km/h.

#### 4.8.2. O circuito DSP

O único sensor utilizado pelo controlador PID é o de velocidade, desta maneira os dados de aceleração e deslocamento devem ser obtidos através de circuitos eletrônicos discretos. Uma alternativa viável para a construção destes circuitos é a utilização de amplificadores operacionais funcionando como integradores, derivadores e somadores.

Os blocos funcionais destes circuitos são:

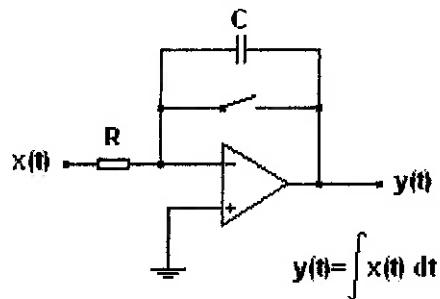


Fig.15: circuito integrador.

Este circuito integra o sinal da velocidade, desta maneira é obtido o valor do deslocamento. Pode-se observar que existe uma chave curto-circuitando o capacitor C, esta chave tem a finalidade de evitar a saturação do capacitor, já que se o tempo de integração for muito grande o capacitor é carregado com  $+V_{cc}$  o que faz com que o circuito pare de funcionar.

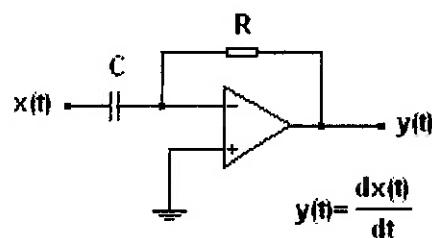


Fig.16: circuito derivador.

Este circuito deriva o sinal da velocidade, desta maneira é obtido o valor da aceleração do veículo.

Para que ambos os circuitos funcionem corretamente é necessária a adoção de um terceiro circuito, já que as saídas de ambos é inversora. Para a correção do sinal e a correta implementação dos circuitos acima é necessária a utilização do circuito somador mostrado a seguir:

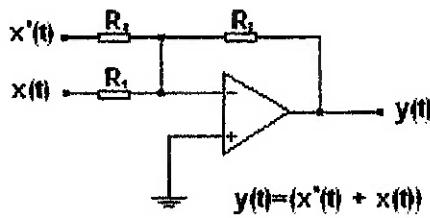


Fig.17: circuito somador.

Entretanto a alternativa adotada para o projeto foi o projeto de um circuito DSP, que significa *Digital Signal Processing*, ou seja processamento digital de sinal. Este circuito permite que a partir do diagrama de blocos implementado em MatLab, seja possível implementação das funções descritas anteriormente via software na memória não volátil de um circuito integrado.

#### 4.8.3. O micro controlador

O microprocessador utilizado será um Motorola 8051, devido a grande quantidade de entradas e saídas necessárias para a implementação do circuito. O microprocessador será responsável pelo controle de todo o sistema administrando o acionamento dos botões, e identificando os sinais provenientes dos pedais de freio e embreagem desativando o sistema sempre que um destes pedais é acionado.

#### 4.8.4. O multiplexador 2:1

O multiplexador é responsável pela seleção do sinal que chega a ECU do veículo, este circuito é controlado pelo microprocessador. Através da mudança de nível lógico no *gate* deste circuito é possível selecionar entre o sinal proveniente do sistema de controle de velocidade ou o sinal originado no pedal do acelerador.

#### 4.8.5. Diagrama de blocos

Todos estes circuitos são ligados da seguinte forma:

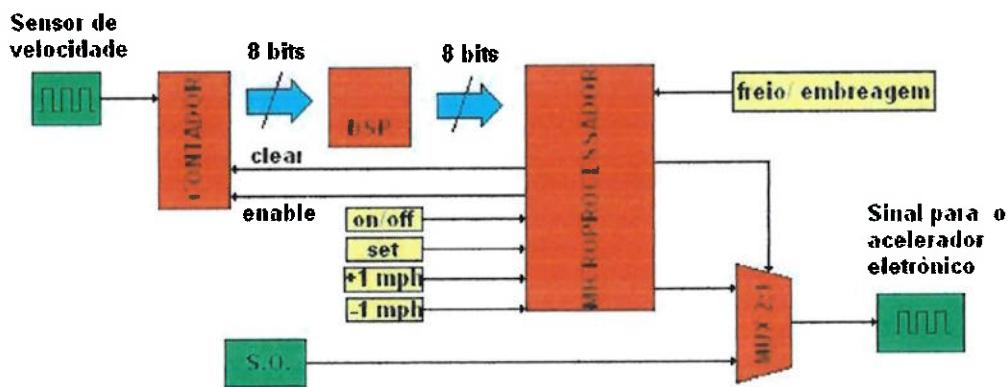


Fig.18: topologia do circuito

O contador é capaz de contar os pulsos e transformá-los em um sinal digital de 8 bits, este sinal entra no módulo DSP e é interpretado, o sinal já processado chega ao microprocessador com os dados de posição da borboleta. Estes dados são comparados aos dados de *preset*, e as atitudes necessárias são tomadas para que a velocidade seja corrigida.

O sinal é enviado da saída do multiplexador para a ECU do veículo que segue o esquema de ligação indicado a seguir:

**Conector A**

- 1 - Massa da unidade de comando e sensores 1
- 2 - Massa da unidade de comando e sensores 2
- 3 - Alimentação da unidade de comando - linha 30
- 4 - Alimentação da unidade de comando - linha 15
- 24- Massa do relé do eletroventilador 2<sup>a</sup> velocidade
- 30- Liga/desliga do pressostato do ar-condicionado (F129)
- 32- Massa
- 33- Massa do potenciômetro G185 do sensor do pedal do acelerador
- 34- Sinal do potenciômetro G185 do pedal do acelerador
- 35- Sinal do potenciômetro G79 do pedal do acelerador
- 36- Massa do potenciômetro G79 do pedal do acelerador
- 37- Sinal de rotação do motor para o instrumento combinado (conta-giros)
- 39- Sinal do interruptor do pedal da embreagem (linha 15)
- 40- Sinal do interruptor do ar-condicionado
- 41 - Sinal do termostato do ar-condicionado
- 43 - Linha serial do imobilizador (J362) e conector de diagnóstico
- 47 - Massa do relé do eletroventilador (1<sup>a</sup> velocidade)
- 48 - Lâmpada EPC K132 do painel

**Conector B**

- 82 - Sinal do sensor de rotação (G28)
- 83 - 5V para os sensores de posição da borboleta (G187 e G188)
- 84 - Sinal do sensor de posição da borboleta (G188)
- 85 - Sinal do sensor da temperatura do ar (G42)
- 86 - Sinal do sensor de fase (G40)
- 87 - 5V do sensor de rotação (G28)
- 88 - Comando da válvula injetora 3
- 89 - Comando da válvula injetora 4
- 91 - Massa dos potenciômetros do sensor da posição da borboleta (G187 e G188)
- 92 - Sinal do sensor de posição da borboleta (G187)
- 93 - Sinal do sensor de temperatura do líquido de arrefecimento (G2)
- 96 - Comando da válvula injetora 1
- 97 - Comando da válvula injetora 2
- 98 - 5V sensores de pressão (G71) e de fase (G40)
- 99 - Massa do sensor de detonação
- 102 - Comando da bobina 2
- 103 - Comando da bobina 1
- 106 - Sinal do sensor de detonação
- 108 - Massa dos sensores
- 109 - Sinal de pressão absoluta (G71)
- 116 - Comando do relé da plena potência para o ar-condicionado
- 117 - Comando (+) do servomotor da borboleta
- 118 - Comando (-) do servomotor da borboleta

- 50 - Massa dos sensores
  - 53 - Positivo de 5V de referência
  - 54 - Sinal do sensor do velocímetro
  - 55 - Sinal do interruptor do pedal de freio (linha 15)
  - 56 - Sinal de acionamento das lâmpadas de freio
  - 63 - (-) 12V para o aquecimento da sonda lambda
  - 64 - Comando da válvula do canister (N80) (limpeza do filtro de carvão ativado)
  - 65 - Comando do relé da bomba de combustível (J17)
  - 68 - Massa da sonda lambda (G39)
  - 69 - Sinal da sonda lambda (G39)
  - 72 - 5V do sensor do pedal do acelerador (G185)
  - 73 - 5V do sensor do pedal do acelerador (G79)
- Fig.19: esquema das ligações da ECU

#### 4.8.6. Levantamento de Custos

Os circuitos utilizados no sistema são de custo bastante baixo, já que todos são componentes padrão no mercado. O grande custo envolvido na construção do circuito é sem dúvida a confecção da placa de circuito impresso e a mão de obra de posicionamento dos componentes e soldagem.

Os custos envolvidos na compra dos componentes eletrônicos estão listados a seguir:

Tabela 13: custos dos componentes

Descrição	Preço (R\$)
Micro controlador (Motorola 8051)	12,00
Multiplexador	0,50
CI DSP	50,00
Contador	0,50
Outros Componentes	20,00

Desta maneira o custo total dos componentes é de R\$82,50, e o custo da mão de obra e fabricação do circuito impresso fica em torno de R\$ 50,00. Somando os custos das caixas e botões necessários para a fabricação do equipamento, os custos

totais chegam a R\$160,00 o que torna o produto viável para o mercado que se pretende explorar, visto que o preço de venda proposto está na faixa de R\$300,00.

## **4.9. Simulações numéricas**

### **4.9.1. Projeto do Controlador PI**

O Projeto de um controlador PI requer a consideração de vários fatores na seleção dos ganhos  $K_I$  e  $K_P$ . Várias técnicas de controle, como alocação de pólos, *root-locus*, e Diagrama de Bode podem ser usados. Estas técnicas são consideravelmente mais fáceis de serem aplicadas usando o suporte do softwares MatLab. O projeto do controlador é baseado nos valores de  $K = 0,0756$  (m/s)/N e  $t = 75,632$  s obtidos previamente. Os ganhos do controlador foram escolhidos para minimizar o *overshoot* ( $M_p = 0$  e  $\zeta = 1$ ) e tempo de estabilização de  $t_s = 46$  segundos. O programa também gera, para o valor fixo  $T_I = (K_P/K_I) = 18,686$ , a curva do *root-locus* com  $K_P$  como parâmetro.

Finalmente, para um valor de  $K_P = 186,86$  e  $K_I = 10$ , a simulação de valores de performance do sistema em malha fechada para mudanças de velocidade em degrau e de distúrbios nas entradas como mostram as Ilustrações 8 e 9. Para estes ganhos, o sistema em malha fechada apresentou erro na estabilização igual a zero e tempo de estabilização de aproximadamente 45 segundos como esperado. Entretanto, apesar do valor de  $\zeta = 1$  a resposta mostra algum *overshoot*. Isto acontece porque foi escolhido um tempo de estabilização e critério de *overshoot* coerentes a um sistema de segunda ordem, sem zeros, e o sistema escolhido é de segunda ordem mas tem um zero no ponto -0,0535. Se a resposta do sistema fosse determinada para ser mais lenta, um  $T_I$  menor poderia ser escolhido.

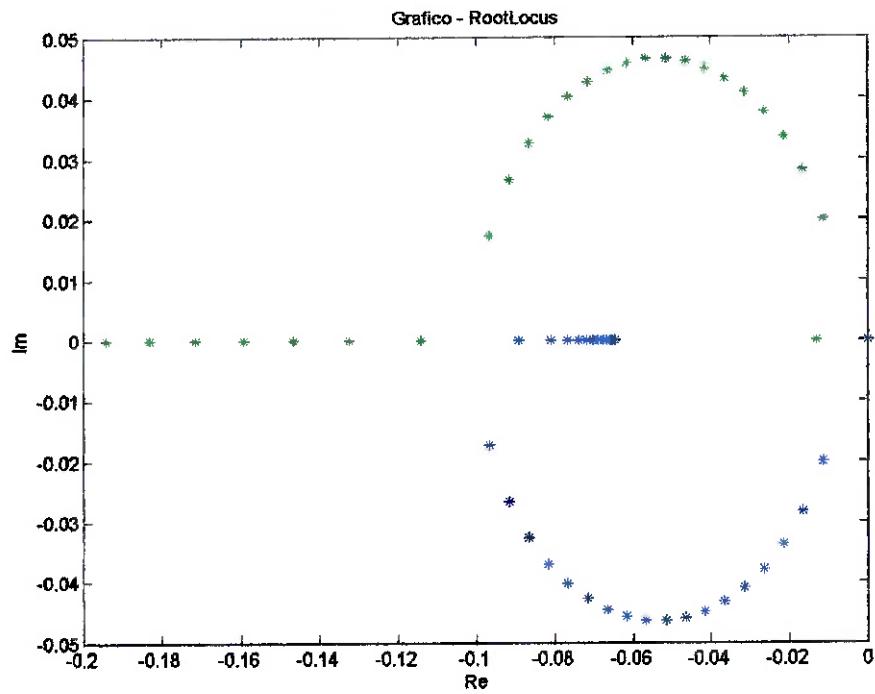


Fig.20: lugar das raízes para o sistema PI

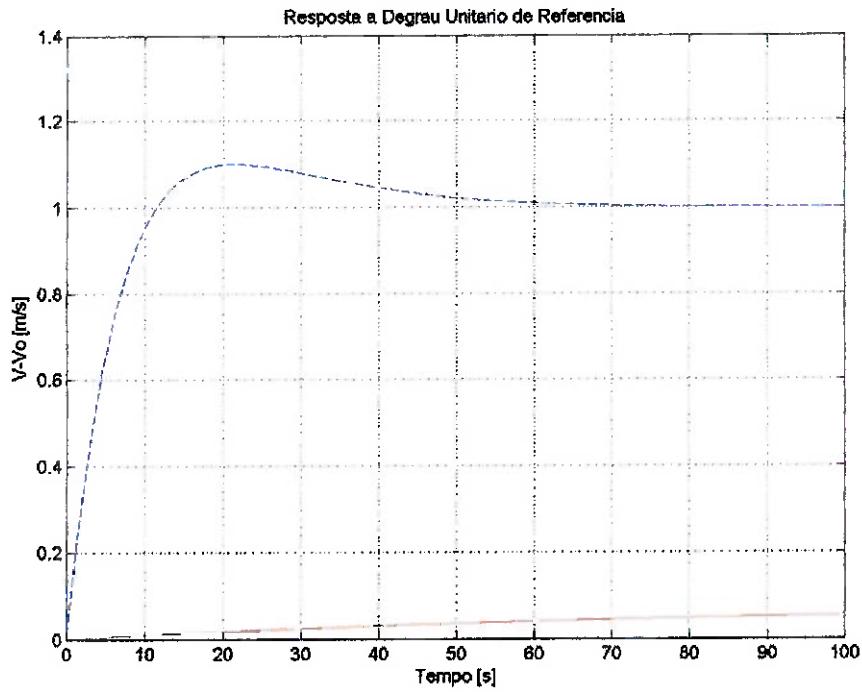


Fig.21: resposta ao Degrau Unitário de Referência para o sistema PI

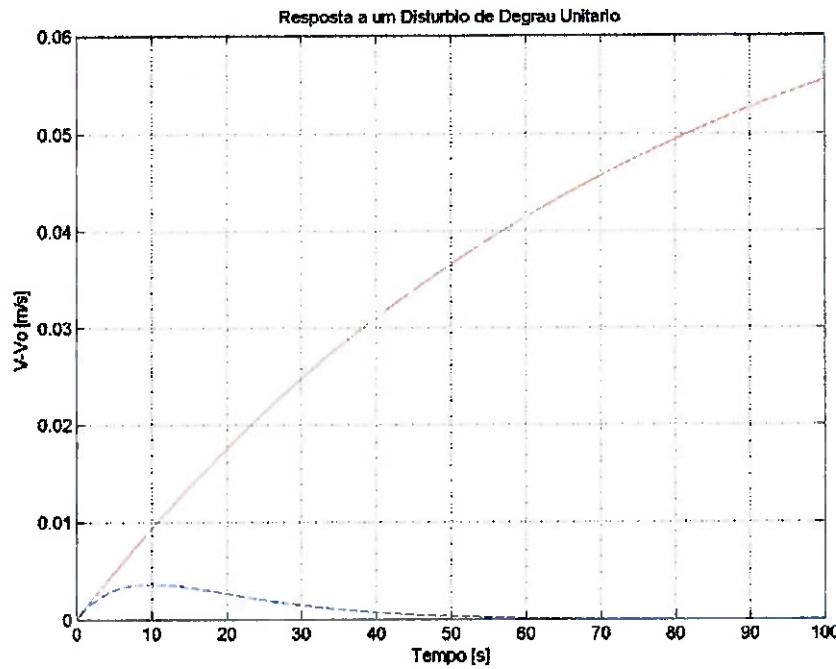


Fig.22: resposta a Distúrbio Unitário para o sistema PI

Os comandos utilizados no Matlab para simular este sistema se encontram no Anexo C.

Observa-se que o tempo de estabilização para uma entrada do tipo degrau no valor de referência é de 46 s para este tipo de controlador. Para uma entrada de distúrbio, o tempo de estabilização é de, aproximadamente, 46 s também. Nota-se que este valor é excessivamente elevado, e não serve para o projeto.

O modelo simplificado usado neste projeto do *cruise-control* tem várias limitações. Primeiro, assume-se que a força de tração pode ser modificada instantaneamente pelo controlador, assim, negligenciando a dinâmica inerente ao sistema acelerador/motor. Segundo, o projeto do controlador é baseado em equações linearizadas da dinâmica longitudinal do veículo, e a constante do tempo e ganho irão variar dependendo das condições de operação. Por estas razões foi decidido projetar um controlador PID (proporcional, integral, derivativo) que se baseia num modelo mais complicado, mas ainda linear, que considera a dinâmica envolvida no conjunto acelerador/motor.

#### 4.9.2. Projeto do Controlador PID

Para o sistema com controlador tipo PID, os valores utilizados como parâmetros são os mesmos usados para o sistema com controlador PI, mais as constantes da função de transferência do atuador da borboleta. São estes  $K_a = 10^\circ / \%$  e a constante do tempo do atuador que é de  $\tau_a = 0,05$  s.

No caso do controlador PID os ganhos,  $K_P = 120$ ,  $K_I = 12$ , e  $K_D = 120$ , foram ajustados de modo a apresentarem respostas ao degrau de referência e ao distúrbio mais rápidas do que o controlador PI. O ganho proporcional  $K_P$  foi ajustado para uma taxa de decaimento de 0,707.

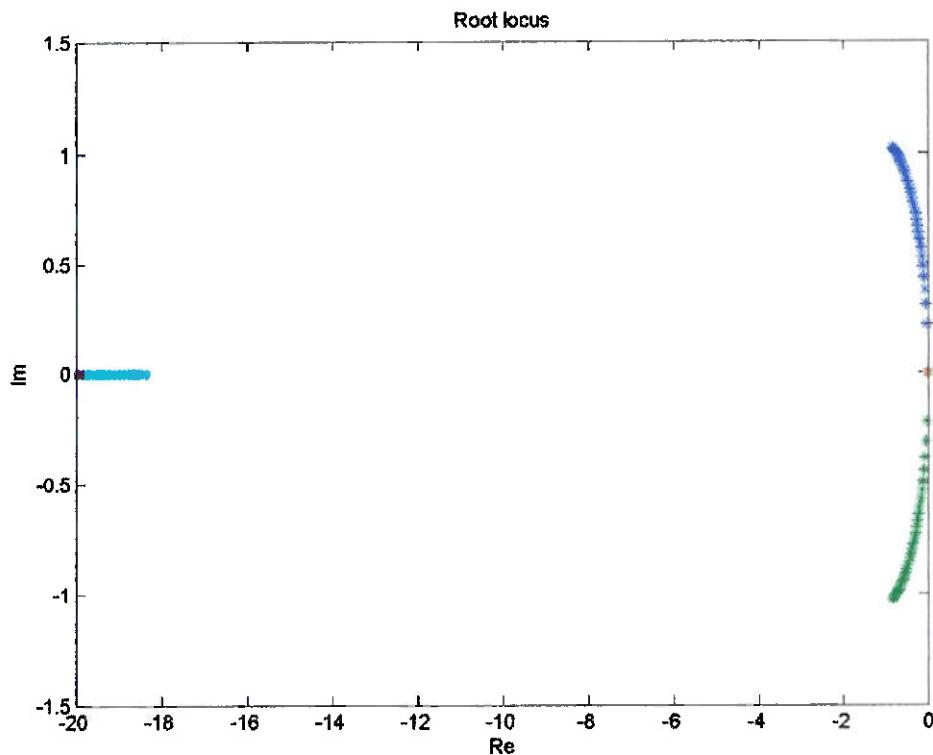


Fig.23: lugar das raízes para o sistema PID

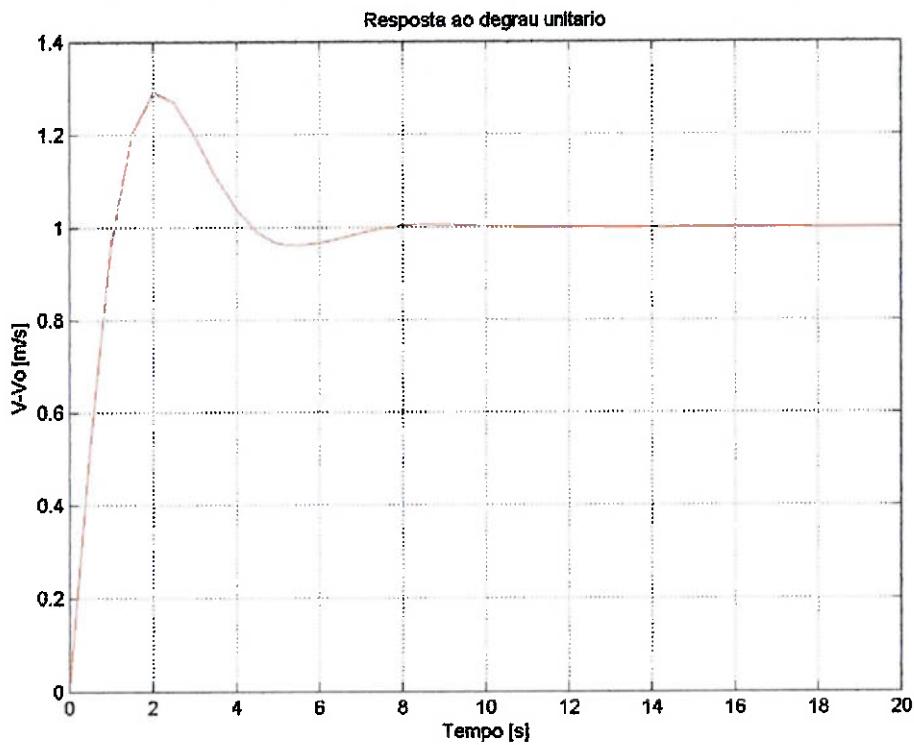


Fig.24: resposta ao Degrau Unitário de Referência para o sistema PID

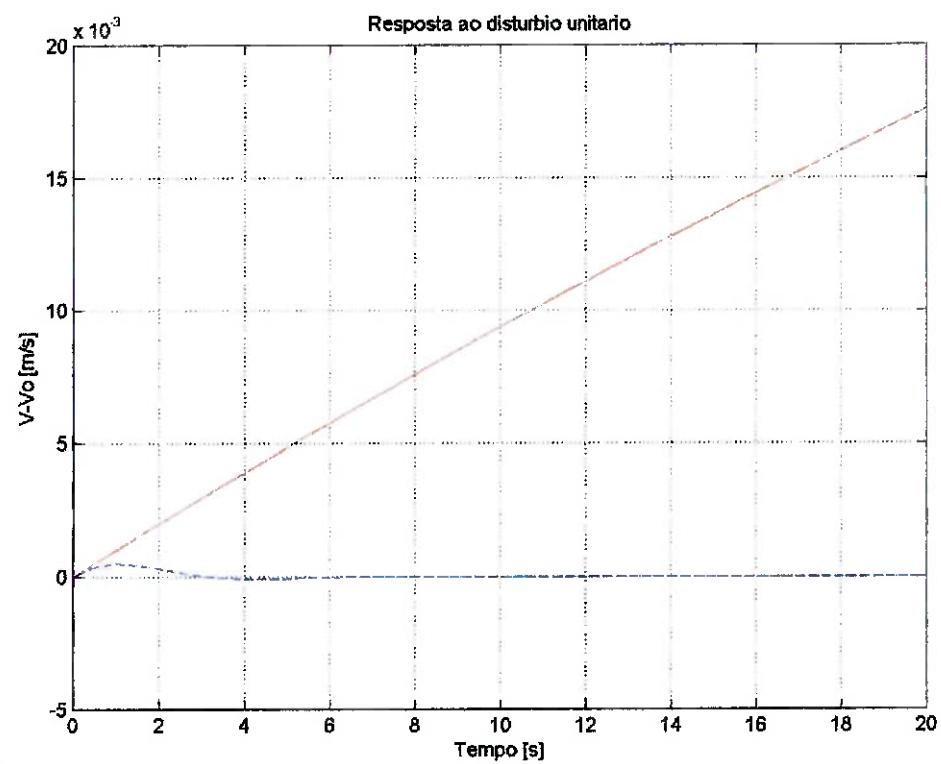


Fig.25: resposta ao Distúrbio de Degrau Unitário para o sistema PID

Os comandos utilizados no software Matlab para simular este sistema se encontram no Anexo D.

Nota-se que os tempos de estabilização foram melhorados significativamente em relação ao sistema com controlador tipo PI. Para a entrada tipo degrau na referência, o tempo de estabilização é de 8 s, enquanto que para a entrada tipo distúrbio, é de 5 s. Obteve-se um *overshoot* de aproximadamente 30 % do valor de referência para a entrada degrau de velocidade. Não foi possível achar valores de ganhos que diminuíssem este valor sem comprometer o tempo de estabilização. Foram escolhidos estes ganhos, mesmo estando acima do valor máximo de *overshoot* especificado de 10 %, pensando que na maioria das situações o condutor estará mais preocupado em manter a velocidade sobre irregularidades e inclinações da pista do que para acelerar ou desacelerar através do controlador de velocidade.

Este sistema mostrou um desempenho muito superior ao sistema que usa controlador tipo PI. Ele será escolhido para ser implementado no projeto.

## 5. CONCLUSÃO

Verificou-se que o controlador PID se mostrou mais eficiente no controle da velocidade do veículo do que o controlador PI. Para se obter maior universalidade na aplicação do controlador de velocidade, em diferentes tipos de veículos e velocidades, seria preciso fazer uso de um controlador adaptativo.

Uma vez que o dispositivo é destinado a veículos com acelerador eletrônico, pode-se obter uma economia em componentes mecânicos, como o atuador da borboleta de admissão de ar. Verificou-se que o preço estipulado para venda deste acessório está abaixo do valor de acessórios semelhantes comercializados pelos fabricantes. Este acessório atualmente só está disponível para carros de luxo ou médios, portanto este preço de venda menor era pré-requisito. Projeções de vendas mostraram que este projeto é viável.

## 6. ANEXOS

### *Anexo A*

Economia relativa ao se usar álcool em vez de gasolina com o combustível.

Dados levantados do *site* da Agência Nacional do Petróleo em 05/12/2004.

[<http://www.anp.gov.br/i\\_preco-web/include/Resumo\\_Por\\_Estado\\_Municipio.asp?cod\\_combustivel=62A>](http://www.anp.gov.br/i_preco-web/include/Resumo_Por_Estado_Municipio.asp?cod_combustivel=62A)

[<http://www.anp.gov.br/i\\_preco-web/include/Resumo\\_Por\\_Estado\\_Municipio.asp?cod\\_combustivel=997>](http://www.anp.gov.br/i_preco-web/include/Resumo_Por_Estado_Municipio.asp?cod_combustivel=997)

Preço médio para o consumidor em São Paulo Capital, no período de 28/11/2004 a 04/12/2004.

preço médio ao consumidor	
gasolina	R\$ 2,174
álcool hidratado	R\$ 1,274

Considerando um consumo específico 30 % maior para o álcool hidratado:

combustível	multiplicador	preço normalizado	preço relativo
gasolina	1	R\$ 2,174	100,0%
álcool hidratado	1,3	R\$ 1,656	76,2%

Constata-se, portanto, uma economia de 23,8% ao se usar o álcool em vez da gasolina como combustível.

## Anexo B

Cálculos feitos com base nas Tabelas da Anfavea realizados para estimar o número de veículos 1.0 vendidos com acelerador eletrônico, desde 2001.

ano	total veículos 1.0 vendidos	modelo	veículos vendidos	% do total de vendas	soma das %	total vendidos com acelerador eletronico
2001	878.260	Clio	22.966	2,61%	4,71%	41.366
		Clio Sedan	11.755	1,34%		
		206	6.645	0,76%		
2002	801.869	Clio	23.502	2,93%	12,68%	101.656
		Clio Sedan	12.399	1,55%		
		206	24.464	3,05%		
		Gol <sup>1</sup>	37.218	4,64%		
		Parati <sup>1</sup>	2.338	0,29%		
		Pólo	1.735	0,22%		
2003	699.930	Clio	21.715	3,10%	14,46%	101.213
		Clio Sedan	11.431	1,63%		
		206	19.157	2,74%		
		Gol <sup>2</sup>	41.341	5,91%		
		Parati <sup>2</sup>	799	0,11%		
		Fox	6.326	0,90%		
		Pólo	444	0,06%		
2004*	724.547	Clio	18.744	2,59%	27,45%	198.922
		Clio Sedan	10.136	1,40%		
		206	11.749	1,62%		
		Gol <sup>3</sup>	56.746	7,83%		
		Parati <sup>3</sup>	240	0,03%		
		Fox	36.920	5,10%		
		Palio <sup>4</sup>	37.839	5,22%		
		Siena	26.548	3,66%		

1 - Foi projetado que 20% dos veículos Gol/Parati vendidos possuía acelerador eletrônico

2 - Foi projetado que 30% dos veículos Gol/Parati vendidos possuía acelerador eletrônico

3 - Foi projetado que 40% dos veículos Gol/Parati vendidos possuía acelerador eletrônico

4 - Foi projetado que 40% dos veículos Palio vendidos possuía acelerador eletrônico

\*Dados projetados linearmente

## Anexo C

Comandos utilizados no Matlab, para o controlador tipo PI.

```
% Define parametros do modelo
u0=20;
g=9.81;
m=1000;
f=0.015;
theta=0;
rho=1.202;
a=1;
cd=0.5;
uw=2;
% Calcula Fx0:
fx0 = m*g*sin(theta) + f*m*g +0.5*rho*a*cd*(u0+uw)^2;
% Constante do tempoe ganho dc:
tau=(m/(rho*a*cd*(u0+uw)));
k=tau/m;
% Fixa ganho TI para o controle PI:
ti=186.86/10.0;
% FT Malha aberta para controle PI e'
% Kp*(num/den) onde:
num=k*[ti 1];
den=[ti*tau ti 0];
% Calcula zeros e polos de malha aberta:
z=roots(num)
p=roots(den)
% Obtem root locus para Kp:
kp=[0:10:300];
r=rlocus(num,den,kp);
plot(r,'*');
title('Grafico - RootLocus');
xlabel('Re');
ylabel('Im');
axis([-0.2 0 -0.05 0.05]);
pause;
[kp, poles]=rlocfind(num,den);
```

```
pause;  
% Resposta ao degrau unitario com e sem controle:  
t=[0:0.5:100];  
y=step([k],[tau 1],t);  
kp=186.86;  
numc=kp*num;  
denc=den+kp*[0 num];  
% Zeros and polos de malha fechada:  
zc=roots(numc);  
pc=roots(denc);  
yc=step(numc,denc,t);  
plot(t,y,'r',t,yc,'b'), grid;  
xlabel('Tempo [s]')  
ylabel('V-Vo [m/s]');  
title('Resposta a Degrau Unitario de Referencia');  
pause;  
% Simula o disturbio de degrau unitario  
% com e sem controle:  
yd=step([k],[tau 1],t);  
ycd=step([k*ti 0],denc,t);  
plot(t,yd,'r',t,ycd,'b');  
xlabel('Tempo [s]'),grid;  
ylabel('V-Vo [m/s]');  
title('Resposta a um Disturbio de Degrau Unitario');
```

## Anexo D

Comandos utilizados no Matlab, para o controlador tipo PID.

```
% Define os parametros do modelo linearizado
u0=20; g=9.81; m=1000; f=0.015;
Theta=0;
rho=1.202; A=1; Cd=0.5; uw=2;
% Calcula Fx0:
Fx0 = m*g*sin(Theta) + f*m*g + ...
0.5*rho*A*Cd*(u0+uw)^2;
% Constante de tempo e ganho dc
Tau=(m/(rho*A*Cd*(u0+uw))); K=Tau/m;
% Atuador
Ka=10; TauA=0.05;
% Arruma ganho Ti para controle PID:
Ti = 100.0;
% Arruma ganhoTd para controle PID:
Td = 1.0;
% TF de malha aberta:
% Kp*(num/den) onde:
num=K*Ka*[Td*Ti Ti 1];
den=[Ti*Tau*TauA Ti*(Tau+TauA) Ti 0 0];
% Zeros e polos de malha aberta:
z=roots(num)
p=roots(den)
%
% Obtem root locus para Kp:
KK=0.5:160;
R=rlocus(num,den,KK);
plot(R,'*');
title('Root locus')
xlabel('Re');
ylabel('Im');
pause;
% Resposta degrau unitario controle PID:
t=[0:0.5:20];
Kp=120.0;
```

```
numc=Kp*num;
denc=den+[0 0 numc];
% Zeros e polos em malha fechada:
zc=roots(numc);
pc=roots(denc);
yc=step(numc,denc,t);
plot(t,yc,'r'); xlabel('Time (sec)');
grid;
title('Resposta ao degrau unitario');
xlabel('Tempo [s]');
ylabel('V-Vo [m/s]');
pause;
% Disturbio degrau unitario com e sem controle:
yd=step([K],[Tau 1],t);
ycd=step([K*Ti*TauA K*Ti 0 0],denc,t);
plot(t,yd,'-r',t,ycd,'-b');
title('Resposta ao disturbio unitario');
xlabel('Tempo [s]');
ylabel('V-Vo [m/s]');
grid;
```

## 7. BIBLIOGRAFIA

1. VOLKSWAGEN DO BRASIL, **Manual de instruções Gol/Parati**, 2003
2. ULSOY, A.G.; PENG,H. **Lecture Notes: ME568 Vehicle Control Systems**, 1997. Disponível em:  
[http://www.me.utexas.edu/~lotario/VSDC/leks/ME568\\_NotesC7.pdf](http://www.me.utexas.edu/~lotario/VSDC/leks/ME568_NotesC7.pdf) Acesso em: 04 dez. 2004.
3. LIUBAKKA, Michael K. et al, Adaptive Automotive Speed Control. **IEEE Transactions on automatic control**, Vol.38, Nº7, Julho 1993. P. 1011-1020.
4. INJETRONIC Tecnologia Automotiva, Dica 18: Acelerador eletrônico - drive by wire (parte 2), **Testes de sensores e atuadores**. Disponível em <http://www.injetronic.com.br/dica18.htm> Acesso em: 04 dez. 2004.
5. GILLESPIE, Thomas D., **Fundamentals of vehicle dynamics**. Society of Automotive Engineers, 1992.
6. BEER, Ferdinand Pierre.; JOHNSTON, Elwood Russell, Jr., **Mecânica vetorial para engenheiros**, 5ª edição, São Paulo: Makron Books do Brasil, 1991.
7. OGATA, Katsuhiko, **Engenharia de Controle Moderno**, 3ª edição, Editora LTC.
8. TSUJII, M., TAKEUCHI, H., ODA, K., and Ohba, M., 1990, Application of Self-Tuning To Automotive Cruise Control, **Proceedings of the American Control Conference**, San Diego, California, May 1990, pp 1843-1848. *apud* ULSOY, A.G.; PENG, H., 1997.
9. KAMINSKI, Paulo Carlos, **Desenvolvendo produtos com planejamento, criatividade e qualidade**, Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 2000.
10. ANFAVEA, **Automóveis 1000cc - Vendas internas no atacado por modelo e combustível e participação nas vendas de automóveis nacionais, Estatísticas**, 2004. Disponível em:  
<http://www.anfavea.com.br/Tabelas2004/VDPOP04.xls> Acesso em: 04 dez. 2004.