

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - CPGEE

**CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO  
DE UM VEÍCULO AUTOGUIADO - A G V, DE  
BAIXO CUSTO, PARA USO EM ENSINO E  
PESQUISA**

RUBEM SPRENGER DREGER

Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre

2001

ESCOLA DE ENGENHARIA  
BIBLIOTECA

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - CPGEE

**CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO  
DE UM VEÍCULO AUTOGUIADO - A G V, DE  
BAIXO CUSTO, PARA USO EM ENSINO E  
PESQUISA**

RUBEM SPRENGER DREGER

Engenheiro Eletrônico

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – CPGEE, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.  
Área de concentração: Instrumentação Eletro-Eletrônica.  
Desenvolvida no Laboratório de Máquinas Elétricas do curso de Engenharia Elétrica da UNISINOS.

São Leopoldo

2001

# CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM VEÍCULO AUTOGUIADO - A G V, DE BAIXO CUSTO, PARA USO EM ENSINO E PESQUISA

RUBEM SPRENGER DREGER

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador:



Prof. Renato Machado de Brito, UFRGS

Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Banca Examinadora:

Prof. Altamiro Amadeu Susin, UFRGS

Dr. pela Universidade de Grenoble – França – 1981

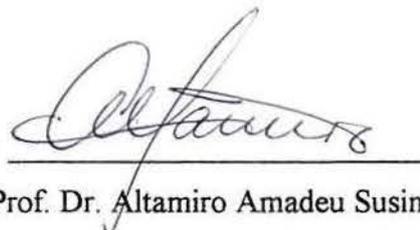
Prof. João César Netto, UFRGS

Dr. pela Universidade de Louvain – Bélgica - 1995

Prof. John Oersted Wisbeck, UFRGS

Dr. pela Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC – 2000

Coordenador do CPGEE:



Prof. Dr. Altamiro Amadeu Susin

Porto Alegre, abril de 2001.

A minha família,  
que sempre esteve ao meu lado,  
me incentivando em todos os momentos.

## AGRADECIMENTOS

A todos os que de alguma forma colaboraram para o êxito deste trabalho.

Aos meus alunos, em especial a Diogo Borges, pelos incansáveis auxílios prestados na elaboração de circuitos e programas, bem como dos diversos testes realizados.

Aos meus colegas da UNISINOS, em particular ao Professor André Henz, pelos ensinamentos emprestados na área de Controle.

Ao Professor Renato Machado de Brito pelos preciosos ensinamentos e pelo inesgotável estímulo. O meu sincero reconhecimento a este profissional e amigo, que em nenhum momento permitiu que se olhasse para trás diante das dificuldades, superando uma série de obstáculos com serenidade e segurança, nunca deixando esta nau à deriva.

A minha esposa Rosangela e ao meu filho Lucas, pelos tantos momentos que os privei de nossa convivência familiar, mas que sempre me incentivaram e acreditaram em mim.

Aos meus pais, Ophir e Frida, por estarem sempre ao meu lado, que Deus os abençoe e ilumine.

Ao Grande Arquiteto do Universo, a quem tudo é devido.

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>ix</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>xii</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS .....</b>	<b>xiii</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>xiv</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xv</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 TEMA ESCOLHIDO .....	1
1.2 OBJETIVOS .....	1
1.3 HISTÓRICO DO AGV .....	2
1.4 ESTRUTURA DE CONTROLE DE AGVS .....	7
1.5 AGV's PARA USO EM ENSINO E PESQUISA .....	10
<b>2 PROJETO E DESCRIÇÃO DO AGV CONSTRUÍDO</b>	<b>11</b>
2.1 PROJETO MECÂNICO E ELÉTRICO .....	11
2.1.1 Sistema de tração e direção .....	11
2.1.2 Instrumentação eletro-eletrônica .....	12
2.1.3 Sistema de alimentação .....	14
2.1.4 Transdutores para monitoração da trajetória (TMT) .....	14
2.1.5 Condicionadores de sinais e circuitos de acionamento (PTS) .....	15
2.1.6 Placas do microcontrolador e de comunicação (PCOM) .....	15
2.2 VEÍCULO MONTADO – IDENTIFICAÇÃO DOS MÓDULOS .....	15
2.3 DETALHAMENTO DAS SOLUÇÕES IMPLEMENTADAS .....	17
2.3.1 Gerador de pulsos infravermelhos .....	21
2.3.2 Receptor de IR e condicionador de sinais (PTS) .....	22
2.3.3 Conversor A/D e saídas PWM .....	24

2.4	PISTA UTILIZADA PARA OS ENSAIOS .....	28
<b>3</b>	<b>TÉCNICAS DE CONTROLE .....</b>	<b>31</b>
3.1	CONTROLE EM MALHA ABERTA E MALHA FECHADA .....	32
3.1.1	Controle em malha aberta .....	32
3.1.2	Controle em malha fechada .....	33
3.2	CONTROLADORES ANALÓGICOS E DIGITAIS .....	33
3.2.1	Controladores analógicos .....	34
3.2.2	Controladores digitais .....	34
3.3	AÇÕES BÁSICAS DE CONTROLE .....	35
3.3.1	Ação liga-desliga (on-off) .....	35
3.3.2	Ação proporcional .....	38
3.3.3	Ação integral .....	39
3.3.4	Ação derivativa .....	40
3.4	O CONTROLADOR PID .....	42
3.4.1	A banda proporcional .....	43
3.4.2	O controlador proporcional .....	45
3.4.3	O controlador PI .....	45
3.4.4	O controlador PD .....	46
3.5	DIAGRAMA BÁSICO DO CONTROLE DO AGV .....	48
<b>4</b>	<b>EXPERIMENTOS REALIZADOS .....</b>	<b>55</b>
4.1	DESCRIÇÃO DA TOMADA DE MEDIDAS .....	55
4.2	DESCRIÇÃO INDIVIDUAL DOS SISTEMAS .....	56
4.2.1	Liga-desliga (on-off) .....	56
4.2.2	Proporcional .....	57
4.2.3	Proporcional-derivativo .....	57
4.3	RESULTADOS OBTIDOS .....	58
4.3.1	Deslocamento linear .....	58
4.3.1.1	Sistema on-off .....	58
4.3.1.2	Sistema proporcional .....	60
4.3.1.3	Sistema proporcional-derivativo .....	62

P4.3.2	Desempenho em curvaturas .....	65
4.4	TESTE DE OPERAÇÃO AUTÔNOMA .....	70
4.4.1	Transferência do programa de controle .....	70
4.4.2	Parâmetros utilizados no teste autônomo .....	71
<b>5</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>72</b>
5.1	SISTEMA LIGA-DESLIGA (ON-OFF) .....	74
5.2	SISTEMA PROPORCIONAL .....	77
5.3	SISTEMA PROPORCIONAL-DERIVATIVO .....	81
5.4	COMPARAÇÃO ENTRE DIVERSAS CONDIÇÕES .....	83
5.5	ANÁLISE DE OPERAÇÃO AUTÔNOMA .....	87
<b>6</b>	<b>DIFICULDADES ENCONTRADAS .....</b>	<b>89</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES, E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>93</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>96</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>99</b>

## LISTA DE FIGURAS

1.1 – AGV para transporte de carga .....	3
1.2 – AGV para transporte de carga leve .....	4
1.3 a, b - AGV's industriais .....	5
1.4 a, b – AGV's para carga pesada .....	6
1.5 – Diagrama de AGVSC .....	8
2.1 - Protótipo construído .....	12
2.2 – Diagrama em blocos da instrumentação.....	13
2.3 – Veículo vista geral .....	16
2.4 – Veículo vista frontal .....	16
2.5 – Veículo vista anterior .....	17
2.6 – Sensores.....	18
2.7 – Sinais dos sensores .....	19
2.8 – Composição do sinal de erro .....	20
2.9 – Detalhamento do diagrama em blocos .....	21
2.10 – Gerador de IR .....	22
2.11 – Condicionador do sensor .....	23
2.12 – Chave eletrônica .....	24
2.13 – Kit AES-51.....	25
2.14 – Acionamento dos motores .....	26
2.15 – Fonte simétrica .....	27
2.16 – PCI .....	27
2.17 – PCI montada e microcontrolador .....	28
2.18 – Pista utilizada .....	29
2.19 – Dimensões e formato da pista utilizada .....	29
2.20 – Pista para curvatura .....	30
2.21 – Pista para curvatura e veículo .....	30

3.1 – Sistema de controle .....	31
3.2 – Controle em malha aberta .....	32
3.3 - Controle em malha fechada .....	33
3.4 – Controle liga-desliga .....	36
3.5 – Histerese .....	37
3.6 – Resposta do controle liga-desliga .....	38
3.7 – Ação proporcional .....	39
3.8 - Resposta do diferenciador .....	42
3.9 – Banda proporcional .....	44
3.10 – Ação integral .....	46
3.11 – Ação proporcional-derivativa .....	47
3.12 – Diagrama básico do AGV construído .....	48
3.13 – Tratamento do sinal de erro .....	50
3.14 – Leitura dos sensores .....	51
3.15 – Comunicação entre o PC e o microcontrolador .....	52
3.16 – Saída PWM para desvio zero .....	53
3.17 – Saída PWM para desvio diferente de zero .....	54
5.1 – Erro instantâneo .....	72
5.2 – Erro instantâneo e eficaz ( $t_{mp}=40$ ; $K=30$ ) .....	74
5.3 – Erro médio e eficaz ( $t_{mp}=40$ ; $K=30$ ) .....	75
5.4 – Controle para três voltas ( $t_{mp}=40$ ; $K=30$ ).....	76
5.5 – Controle para uma volta e meia ( $t_{mp}=40$ ; $K=30$ ) .....	76
5.6 - Erro instantâneo e eficaz ( $t_{mp}=40$ ; $P=0,5$ ) .....	77
5.7 - Erro médio e eficaz ( $t_{mp}=40$ ; $P=0,5$ ) .....	78
5.8 – Controle para três voltas ( $t_{mp}=40$ ; $P=0,5$ ).....	79
5.9 – Controle para uma volta e meia ( $t_{mp}=40$ ; $P=0,5$ ) .....	80
5.10- Erro instantâneo e eficaz ( $t_{mp}=40$ ; $P=0,5$ ; $D=5$ ) .....	81
5.11 - Erro médio e eficaz ( $t_{mp}=40$ ; $P=0,5$ ; $D=5$ ) .....	82
5.12 – Controle para três voltas ( $t_{mp}=40$ ; $P=0,5$ ; $D=5$ ).....	82
5.13 – Controle para uma volta e meia ( $t_{mp}=40$ ; $P=0,5$ ; $D=5$ ).....	83
5.14 – Erro gerado em função da velocidade.....	84

5.15 – Reação do controle em função da velocidade.....	85
5.16 – Erro gerado em função do sistema utilizado.....	86
5.17 – Reação do controle em função do sistema utilizado.....	86
A.1 – Diagrama em blocos do kit AES-51.....	100
A.2 – Níveis de tensão gerados pelos sensores .....	128
A.3 – Diferença entre os níveis de tensão gerados pelos sensores .....	129
A.4 – Soma dos sinais gerados pelos sensores .....	130

## LISTA DE TABELAS

4.1- Controle on-off.....	59
4.2- Controle Proporcional .....	61
4.3- Controle PD - tmp 40 .....	62
4.4- Controle PD - tmp 60 .....	63
4.5- Controle PD - tmp 80 .....	64
4.6- Raio 30 cm .....	66
4.7- Raio 40 cm .....	67
4.8- Raio 50 cm .....	68
4.9- Raio 60 cm .....	69
A.1 – Resposta dos sensores .....	126

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

amplitude do erro	- nível de tensão do sinal de erro baseado na conformação dos sinais $v_d$ e $v_e$ , expresso no eixo das ordenadas como dezenas de mV ( $\times 10\text{mV}$ )
intensidade do controle	- intensidade da ação aplicada ao sistema avaliada com base nos valores da tensão aplicada aos motores, expresso em unidades percentuais do ciclo ativo do PWM.
cont inst	- controle instantâneo aplicado
cont medi	- controle médio simples aplicado
cont rms	- controle médio quadrático aplicado
diff	- diferença entre as tensões do sensor direito e esquerdo
diff <sub>ant</sub>	- último valor do erro baseado na <i>diferença</i> dos sensores esquerdo e direito
$e$	- sinal de erro. O mesmo que $e(t)$
$e(t)$	- sinal de erro gerado a partir do desvio de uma referência ( <i>set-point</i> )
erro inst	- erro instantâneo produzido
erro medi	- erro médio simples produzido
erro rms	- erro médio quadrático produzido
$V_d, V_e$	- tensão instantânea recebida pelos sensores direito e esquerdo, respectivamente
PWM1	- nível de tensão aplicado ao motor 1, para correção de trajetória.
PWM2	- nível de tensão aplicado ao motor 2, para correção de trajetória.
tmp	- velocidade, equivalente ao percentual do ciclo ativo do PWM (nível médio da tensão aplicada aos motores).
$U_1$	- nível médio de tensão aplicado ao motor 1, da saída PWM1.
$U_2$	- nível médio de tensão aplicado ao motor 2, da saída PWM2.
$U_m$	- nível médio de tensão na saída PWM para uma velocidade estabelecida (tmp).
$u$	- sinal de controle. O mesmo que $u(t)$
$u(t)$	- sinal de controle presente na saída do controlador
Vel <sub>1</sub>	- velocidade do motor 1 devido a aplicação da tensão $U_1$
Vel <sub>2</sub>	- velocidade do motor 2 devido a aplicação da tensão $U_2$
$V_{LIM}$	- último valor de erro baseado na <i>soma</i> dos sensores esquerdo e direito
Vel <sub>media</sub>	- velocidade média do veículo em dado intervalo de tempo.
$y(t)$	- sinal presente na saída do processo (ou planta)

## RESUMO

Este trabalho mostra como se pode construir um Veículo Autoguiado (AGV) de baixo custo, montado sobre uma plataforma móvel, tracionada por dois motores de corrente contínua, e propõe uma metodologia para avaliação de seu desempenho.

O AGV construído é um protótipo didático que pode ser empregado no ensino de graduação, pós-graduação e pesquisa, permitindo abordagem de conceitos básicos nas áreas de instrumentação, eletro-eletrônica e controle.

Para análise do desempenho do AGV foram exploradas algumas técnicas de controle tais como: liga-desliga, proporcional e proporcional-derivativo.

A modificação da técnica de controle é facilitada pelo uso de uma placa microcontrolada associada ao AGV. Através de um canal de comunicação serial em radiofrequência ou por linha física, pode-se transmitir e receber informações da placa microcontrolada. Assim sendo, a partir de um microcomputador com capacidade de registrar e tratar adequadamente as informações de interesse é possível monitorar remotamente qualquer dos sinais envolvidos na movimentação do AGV.

Ao final são apresentadas sugestões de aplicação e melhorias que podem ser implementadas no sistema atual.

## ABSTRACT

This work shows how to build a low cost Automated-Guided Vehicle (AGV), mounted on a mobile platform, driven by two continuous current motors, and suggest a test methodology to evaluate its behavior.

The builded AGV is a didactic prototype that can be used on under-graduation or graduation teaching, and research experiments, allowing focus on basic concepts of instrumentation , eletro-electronic, communication and control areas.

To analyse the AGV behavior some classical control techniques were explored: on-off, proportional and proportional-derivative.

The modification of control technique is facilitated by the use of a microcontrolled board associated to the AGV. Through a serial communication channel with radiofrequency modulation or by physical line, its possible to transmit and receive information to or from the microcontrolled board. Like this being, it is possible to monitor any of the signals involved in the movement of AGV remotely, starting from a microcomputer with capacity to register and to treat the information of interest appropriately.

At the end they are presented application suggestions and improvements that can be implemented in the current system.

# 1 . INTRODUÇÃO

## 1.1 TEMA ESCOLHIDO

A idéia de construir e avaliar o desempenho de um Veículo Autoguiado (AGV), de baixo custo, para uso em ensino e pesquisa, nasceu da tentativa de encontrar um sistema a ser instrumentado que reunisse as técnicas estudadas ao longo do curso de Mestrado e permitisse incluir aspectos didáticos e a área de comunicação, nas quais o autor tem maior experiência, pois é professor do curso de Engenharia Elétrica da UNISINOS.

Como se pode observar a partir das referências levantadas, um AGV reúne características de instrumentação e automação excelentes para uso em ensino e pesquisa em diversos níveis.

Sendo um veículo que se movimenta autonomamente, é necessário que possua forma de orientar-se, ou perseguir uma trajetória previamente fixada. Também o fornecimento de energia e sua comunicação com instâncias hierarquicamente superiores deve ser planejada.

Percebe-se que todos estes desafios são altamente motivadores para qualquer estudante de engenharia e também para pesquisadores em instrumentação e controle.

## 1.2 OBJETIVOS

Os objetivos principais deste trabalho são:

a) Construir um pequeno AGV capaz de locomover-se, percorrendo uma trajetória pré-definida, em uma sala de aula ou laboratório de ensino.

b) Utilizar dispositivos facilmente encontrados no mercado e de custo reduzido, para que o mesmo possa ser reproduzido por todas as instituições de ensino e pesquisa interessadas no tema.

c) Instrumentar o AGV com transdutores, sensores e atuadores, bem como dotá-lo de uma unidade de controle, com possibilidade de comunicação com o meio exterior.

d) Avaliar o desempenho do AGV em uma trajetória fechada previamente estabelecida, com trechos retos e curvos, empregando técnicas de controle do tipo liga-desliga (on-off), derivativo e proporcional-derivativo.

### 1.3 HISTÓRICO DO AGV

Um Sistema de Veículo Autoguiado (AGVS – Automated Guided Vehicle System) é um sistema de transporte de materiais que utiliza um veículo que se desloca por um caminho previamente definido, fixo ou variável, dependendo da aplicação. Poderíamos citar os bondes, no transporte de passageiros, como sendo um tipo de AGV, uma vez que estes veículos realizam seu tráfego num caminho previamente determinado, não podendo modificar seu trajeto sem que haja uma modificação no *layout* da pista onde trafegam, ou seja, nos trilhos. Há que se levar em conta que no caso de bondes e trens, existe a figura humana (motorneiro e maquinista) que podem interferir no sistema, o que descaracteriza uma automação neste tipo de veículo.

Os veículos autoguiados são controlados por um computador de bordo ou por um microprocessador. Originalmente foram desenvolvidos para transporte e distribuição de materiais em depósitos, porém, nos dias atuais, suas aplicações tem sido estendidas para linhas de produção na indústria, atuando desde as primeiras fases da manufatura, até a conclusão do produto final. As figuras 1.1, 1.2, 1.3 e 1.4 ilustram alguns tipos de AGV's.

Em nível industrial, os AGV's têm sido utilizados como ferramenta de transporte em sistemas de fabricação flexíveis (FMS – Flexible Manufacturing System), que

consistem na interconexão de máquinas e robôs da produção, com transportadores e setores de montagem, de elevadores e de armazenadores automáticos, entre outros sistemas, e também com um computador central responsável pelo gerenciamento de todas as tarefas. Este computador centraliza as tarefas de controle do material enviado às máquinas e robôs e os produtos finais. Desse modo, ele é capaz de monitorar o material utilizado no processo de produção e controlar o seu consumo. O uso de AGVS em um FMS tem, entre outras, as seguintes vantagens:

- a. redução da energia dispendida (não apenas na força humana empregada para carga de materiais, mas também no controle de estoques);
- b. redução de esforços físicos prejudiciais à saúde;
- c. operação de deslocamento não-tripulado;
- d. melhor utilização dos sistemas de carga, de transporte e de máquinas;
- e. fornecimento de material de acordo com o fluxo da produção, resultando num controle mais eficiente;
- f. redução dos danos provocados pelo transporte manual no material de produção.

Além das aplicações industriais, os AGV's são também encontrados em áreas não-industriais como no transporte de malas, pacotes, correspondências em escritórios e firmas,

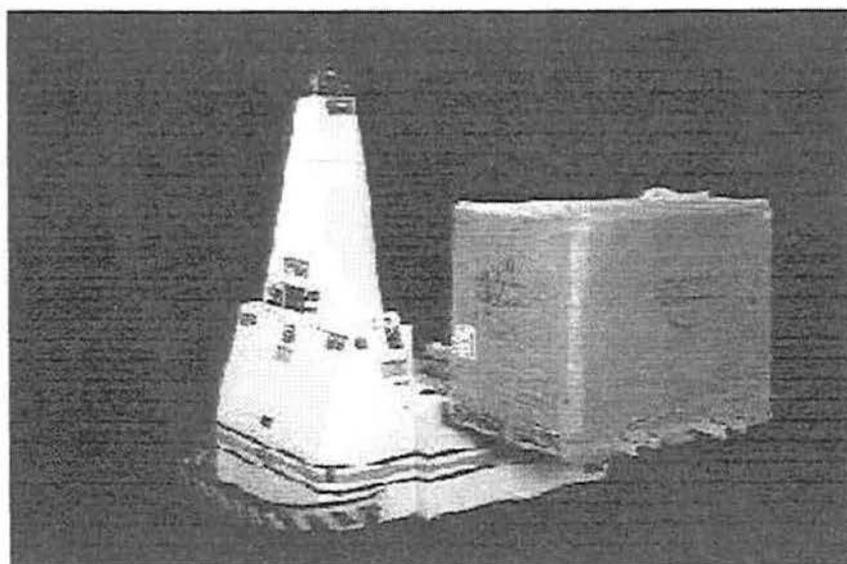


Figura 1.1 – Um AGV para transporte de carga.

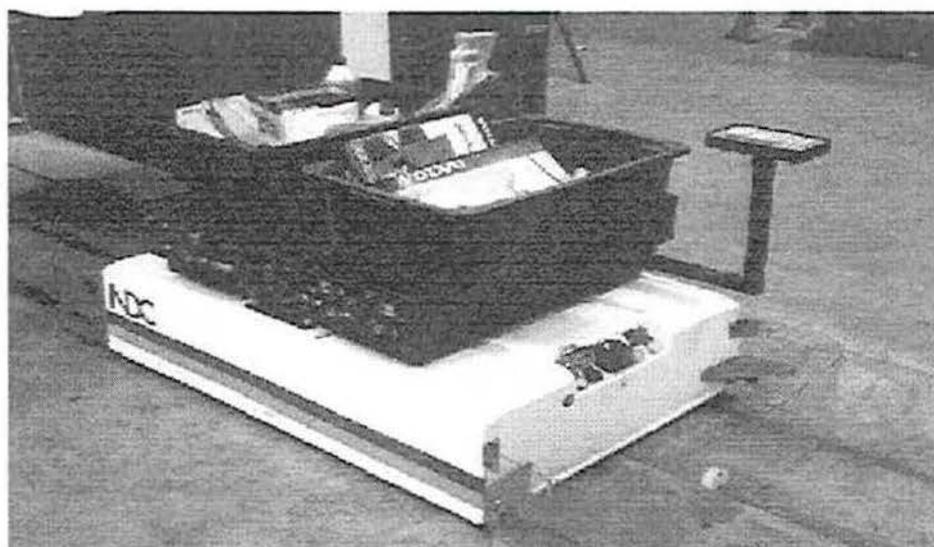


Figura 1.2 - AGV tipo plataforma para transporte de carga leve.

transportando alimentos, roupas, produtos farmacêuticos, amostras de laboratório em hospitais, na exploração espacial, deslocamento nas áreas de risco em plantas nucleares e para serviços de vigilância, entre outros. Em alguns casos são utilizados para transporte de visitantes em áreas fabris. Também nas residências os AGV's estão ganhando popularidade em aplicações de corte de grama em jardins. Algumas companhias utilizam AGV's na limpeza de pisos, desde lavagem até polimento.

Cabe ressaltar que na indústria são utilizados, simultaneamente, diversos AGV's numa grande variedade de aplicações, como pode ser visto nas figuras 1.3 a,b. Isto pode tornar bastante complexo o controle dos diversos veículos, exigindo uma planificação bastante detalhada. Nesta devem ser previstos os deslocamentos, o número e tipo de veículos, atividade em caso de pane de algum deles, congestionamentos, entre outros procedimentos operacionais aplicáveis a cada caso. Nesta situação, é de grande importância a estrutura de controle de um sistema para o AGV. Muitos autores tem pesquisado sobre os diferentes aspectos do projeto de AGVS, tais como Maxwell e Muckstadt, 1982 [12], Gaskins e Tanchoco, 1987 [9], Sinriech e Tanchoco, 1991 [23] e 1992 [24]. Também estratégias para levar uma única carga são apresentadas por Egbelu e Tanchoco, 1984 [ 7 ], e por Russell e Tanchoco, 1984 [ 19 ], enquanto que para cargas múltiplas há referências



(a)



(b)

Figura 1.3 a,b – Ambiente de fábrica com vários AGV's.



(a)



(b)

Figura 1.4 a,b – AGV tipo plataforma para cargas mais pesadas.

em Ozden, 1988 [15], e em Bartholdi e Platzman, 1989 [2].

Embora este trabalho enfoque o controle de apenas um AGV, será feita uma rápida abordagem salientando alguns aspectos da estrutura de controle para AGV's.

#### 1.4 ESTRUTURA DE CONTROLE DE AGVS

Em plantas industriais automatizadas ou semi-automatizadas, o controle de sistemas de AGV é parte integrante das plantas industriais. Estes sistemas são responsáveis pelo deslocamento de produtos entre as diversas etapas da produção. A função do AGV é facilitar o transporte de peças e ferramentas entre as etapas intermediárias dos processos definidos nas plantas industriais até a elaboração do produto final.

A Bibliografia refere mais frequentemente as funções de controle hierárquico de um sistema com vários AGV's com funções diversas. Como ilustração deste fato, a seguir são citadas algumas referências encontradas.

Joshi *et all* (1990) [10] e Smith *et all* (1992) [25] descrevem um sistema hierárquico no qual as funções de controle são divididas em *planejamento*, *programação* e *funções de execução*. De acordo com esta arquitetura, o *planejamento* é responsável pela determinação de quais tarefas o sistema de controle deve desempenhar. Esta responsabilidade inclui a divisão das tarefas em sub-tarefas, e a seleção das prioridades quando for o caso. Por exemplo, no caso onde diversas máquinas estão disponíveis para processar uma determinada parte, a função *planejamento* selecionará uma máquina específica. A função *programação* determina a seqüência de ocupação das máquinas, bem como o início e o final de cada tarefa. Finalmente, a função *execução* interage com os níveis de controle mais baixos ou com o próprio equipamento físico para executar cada tarefa. A razão desta divisão é que a execução das funções depende somente da configuração do sistema físico, enquanto que as funções de *planejamento* e *programação* também dependem dos requisitos da produção. Em um sistema industrial flexível, as exigências da produção mudam muito

mais freqüentemente do que a configuração física do sistema. Conseqüentemente, as funções de *planejamento e programação* podem se modificar em função das necessidades da produção, enquanto que as funções de *execução* permanecem inalteradas.

O sistema de AGV pode ser visto como composto de um controlador de supervisão (AGVSC) e de controladores de veículos subordinados. Debaixo deste paradigma de controle, os controladores de veículos são responsáveis pelas funções de baixo nível do sistema de controle (por exemplo, motores, transmissão, etc.), enquanto que o supervisor de controle é responsável pelas funções de alto nível, incluindo o gerenciamento de interações entre veículos. Funcionalmente, o sistema de controle pode ser dividido em funções de *planejamento, programação e execução*. O AGVSC é responsável pelo desempenho destas funções. A estrutura global do AGVSC é mostrada na figura 1.5 .

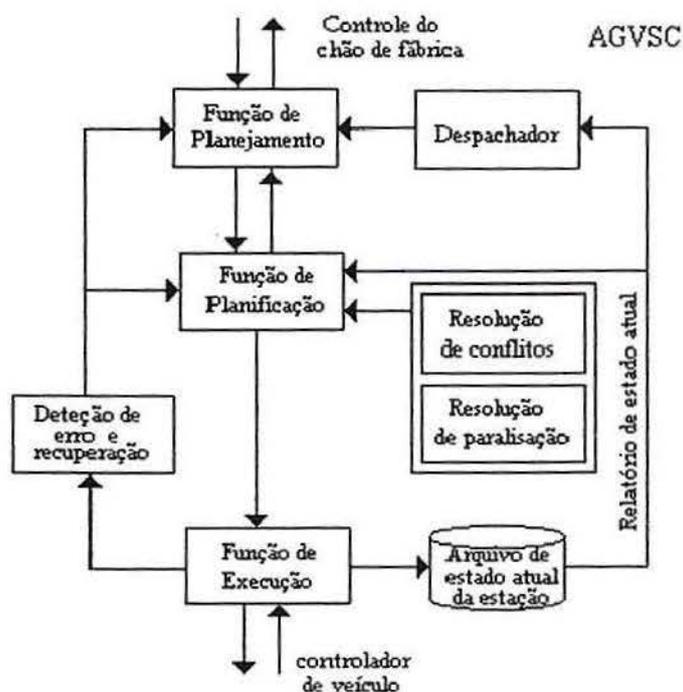


Figura 1.5 – Diagrama esquemático de um Sistema Controlador de AGV.

A função de *planejamento* do AGVSC é responsável pela seleção de um veículo apropriado e a rota mais adequada para este veículo. O *planejamento* pode ser visto como elegendo tarefas para veículos individuais, onde a tarefa identifica o caminho que o veículo

irá seguir. O *planejamento* é geralmente referido como sendo *routing* e *dispatching* no contexto de AGVS

A designação de tarefas pode ser realizada dinamicamente. As tarefas são destinadas para os veículos que estão sem designação como pedidos de serviço, ou pré-planejamento. Estas tarefas são nomeadas aos veículos sem levar em conta seu estado de tarefa atual (Co e Tanchoco, 1991 [3]). Egbelu e Tanchoco (1984) [7] identificaram duas categorias de tarefas no contexto de manufatura flexibilizada: um *centro de trabalho inicial*, referindo-se à seleção de veículos em estado ocioso; e *veículo-iniciado*, referindo-se à nomeação de um centro de trabalho para um veículo oriundo de outros centros de trabalho.

O estudo também demonstra o efeito de estratégias de tarefas diferentes em congestionamento de veículos e o desempenho global em chão de fábrica. Foram avaliadas várias estratégias de tarefas para o transporte de carga simples ( Egbelu e Tanchoco, 1984 [7]; Russell e Tanchoco, 1984 [19]) e cargas múltiplas (Ozden, 1988 [15]; Bartholdi e Platzman, 1989 [2]).

A função de *planificação* é responsável por combinar todas as rotas individuais dos veículos numa sequência global de segmentos. Em outras palavras, a função de *planejamento* é responsável por dividir os caminho individuais em segmentos menores, e a *planificação* é responsável pelo acesso sequencial dos veículos em cada segmento. A função de *planificação* também é responsável pela solução de conflitos entre veículos ou da paralisação total, além da atualização de dados para iniciar e terminar uma rota selecionada. Um número de rotas alternativas para um dado par *origem-destino* devem ser previstas antes de se definir uma possível rota. Neste contexto, *possibilidade* significa que a rota selecionada não está bloqueada, e que o veículo ao seguir por esta rota não encontrará uma solução indesejável ou inviável. Note que tanto o *bloqueio* quanto a *paralisação total* são problemas dinâmicos, e só podem ser gerenciados considerando os outros veículos no sistema.

## 1.5 – AGV's PARA USO EM ENSINO E PESQUISA.

Neste trabalho se dá enfoque apenas à utilização de um único AGV de baixo custo, que foi concebido para uso em ensino e pesquisa. Trabalha-se pois com um sistema de controle interno ao AGV que recebe as tarefas à executar a partir de um gerente hierarquicamente superior.

O AGV proposto utiliza leitura óptico a partir de receptores de IR para sua referência sobre a pista. Seu controle é feito por software, podendo ser modificado dinamicamente.

São utilizados dois motores de corrente contínua, com caixa de redução interna, do tipo adotado em limpador de para-brisa de veículos automotores. Também os componentes utilizados, como microcontrolador, amplificadores operacionais e componentes discretos, além do sistema de baterias para alimentação, são do tipo facilmente encontrado em nosso comércio, o que garante a característica de baixo custo, permitindo sua viabilização por qualquer tipo de Instituição que se interesse pelo tema.

As técnicas de controle utilizadas, permitem observar as diferentes reações de controle impostas ao veículo quando em deslocamento. A posição do veículo é monitorada constantemente, provocando a reação do controle toda vez que o AGV se afaste da posição central da pista.

Embora aplicado apenas a um AGV, este trabalho pode servir como referência para a implementação de sistemas mais amplos de AGV's, com a utilização de outros tipos de sensores e atuadores, que permitam aplicações mais específicas que as propostas.

## 2. PROJETO E DESCRIÇÃO DO AGV CONSTRUÍDO

Neste capítulo são descritos dados referentes ao projeto mecânico do AGV, aos sensores, motores, circuitos condicionadores de sinais e ao controle utilizados. Também apresenta-se neste capítulo o formato da pista que foi preparada para ensaiar o AGV.

### 2.1 PROJETO MECÂNICO E ELÉTRICO

Inicialmente, definiu-se as características geométricas do AGV. Esta definição apoiou-se no objetivo de construir um veículo de pequenas dimensões mas que não perdesse as características próprias dos AGV's, como possibilidade de transportar materiais, ser instrumentado e utilizar-se de alguma forma de controle que o mantivesse autônomo. Optou-se por uma plataforma quase triangular, onde se inscreve um quadrado de 50 cm de lado, a fim de poder-se manuseá-la com certa facilidade. Esta forma geométrica permite o transporte de uma carga razoável, capaz de simular uma condição mais avançada. Ao mesmo tempo, não requer uma sala com dimensões muito avantajadas para seu deslocamento.

Por questão de simplicidade e economia, optou-se por utilizar três rodas ao invés da abordagem convencional com quatro rodas. Assim, tem-se duas rodas em um extremo do veículo, e uma terceira colocada no centro do lado oposto às outras duas.

#### 2.1.1 Sistema de tração e direção

Para movimentar o veículo estudou-se duas possibilidades: a) tração e direção na roda única central, enquanto as duas outras serviriam apenas de apoio à estrutura; b) tração e direção em duas rodas e apenas apoio na terceira roda. Optou-se pela última alternativa, pois embora necessitando utilizar dois motores, um para cada roda, o controle de direcionamento fica mais simples, resultando da diferença de velocidade imprimida a cada um dos motores. Esta técnica produziu um resultado bastante

satisfatório. Além disso, os motores utilizados são de corrente contínua, ao invés de motores de passo que exigiriam circuitos mais elaborados para resultados semelhantes. A figura 2.1 mostra o AGV montado.

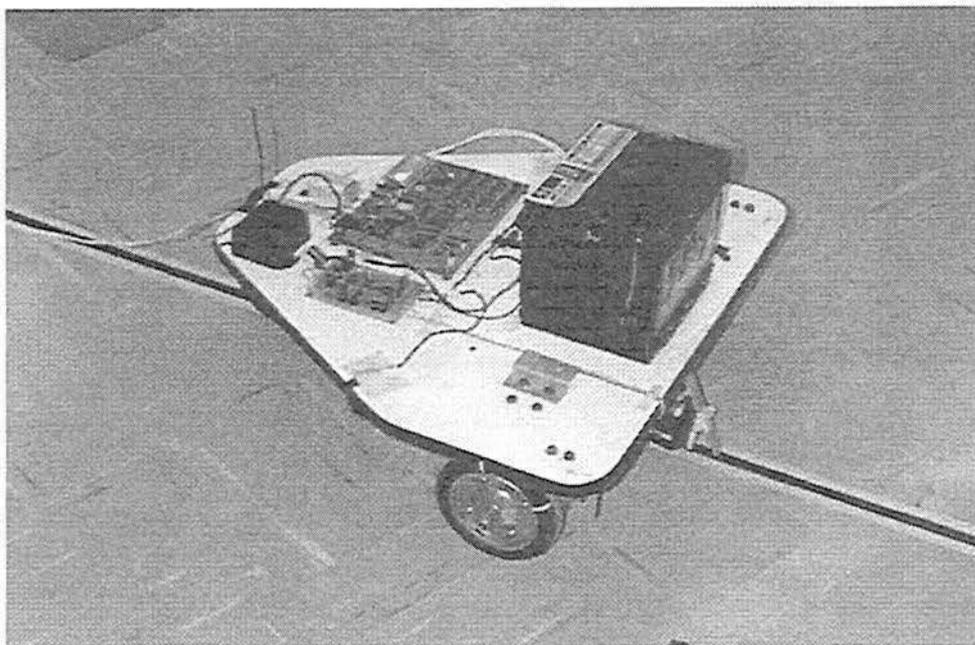


Figura 2.1 – Foto do protótipo construído.

Foram utilizados dois motores de corrente contínua, de 12V/750 mA cada um, do tipo utilizado em limpadores de para-brisa de automóveis, com caixa de redução interna. O motor escolhido foi este porque, além de ser facilmente encontrado no mercado, suas características vinham ao encontro do esperado para o AGV, pois era mais importante o veículo possuir um torque acentuado do que uma elevada velocidade. Além disso, a escolha de um motor deste tipo leva a uma imediata redução do custo final do AGV, bem como permite que seja utilizada uma bateria automotiva de 12V para energizá-lo.

### 2.1.2 Instrumentação eletro-eletrônica

Para um melhor entendimento das funções de cada um dos subsistemas desenvolvidos, sugere-se o diagrama mostrado na figura 2.2. A partir deste, apresentam-se, a seguir, os diversos circuitos implementados.

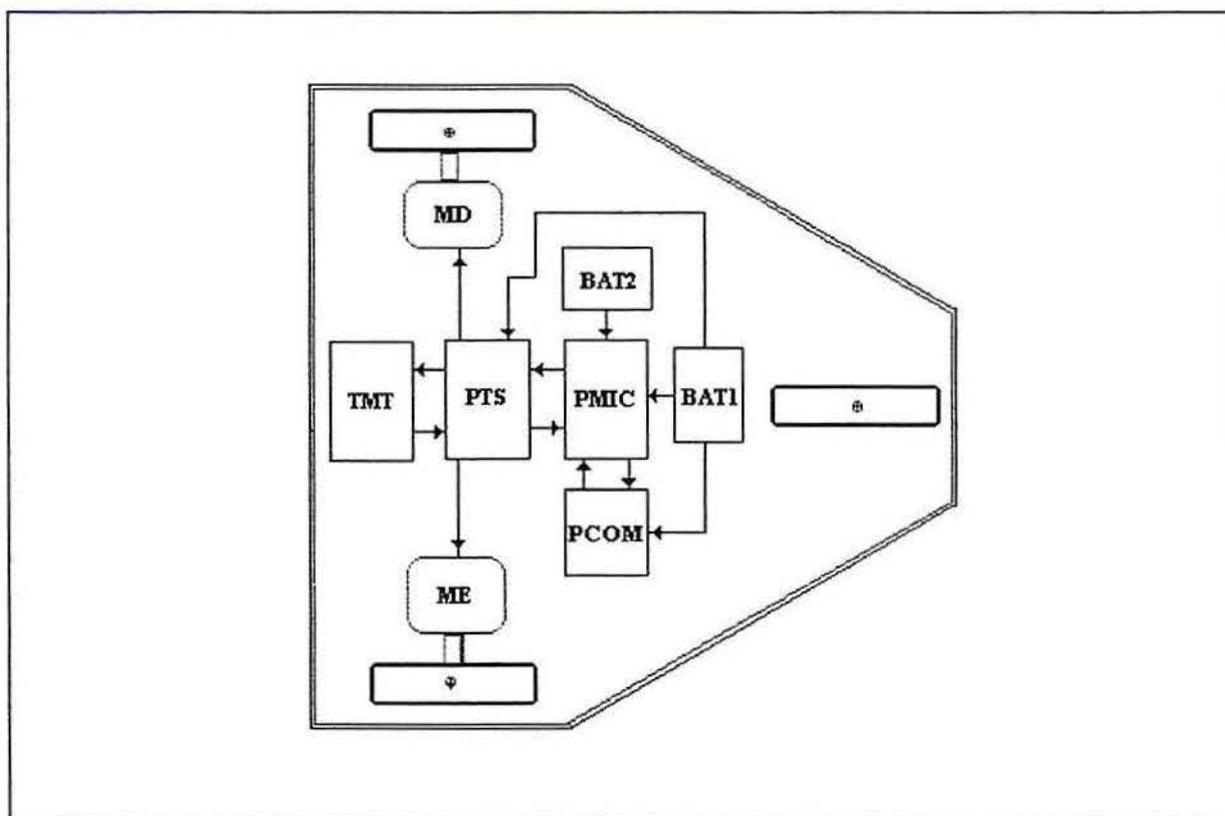


Figura 2.2 - Diagrama em blocos da instrumentação eletro-eletrônica.

Nesta figura observa-se que os sinais são emitidos e recebidos a partir do bloco indicado por TMT - *transdutores para monitoração de trajetória*. Estes sinais são gerados e tratados no bloco PTS - *placa de tratamento de sinais*. Esta placa contém todos os circuitos necessários ao tratamento e condicionamento dos sinais recebidos, para posterior digitalização e controle dos motores esquerdo (ME) e direito (MD).

Os sinais recebidos pelo bloco PTS são enviados ao bloco PMIC, *placa do microcontrolador*, que contém os circuitos de conversão A/D, software de controle para o microcontrolador, e os circuitos de saída em PWM. As informações presentes nestas saídas retornam ao bloco PTS e são aplicadas aos circuitos de acionamento dos motores, a fim de controlá-los.

O bloco indicado por PCOM, *placa de comunicação*, encarrega-se de receber e enviar os dados do software de controle para uma unidade de controle externa, via

unidade serial de dados. Esta comunicação pode ocorrer por meio de linha física, por meio óptico, por radiofrequência ou qualquer outro meio adequado à comunicação de dados.

Os blocos indicados por BAT1 e BAT2 representam, respectivamente, a bateria utilizada para energizar os motores e os circuitos de controle, e a bateria auxiliar utilizada para os circuitos de memória da *placa do microcontrolador*. Estes blocos são descritos com maiores detalhes nos itens a seguir.

### 2.1.3 Sistema de alimentação (BAT1, BAT2)

Como indicado por BAT1 na figura 2.2, foi utilizada uma bateria automotiva chumbo-ácido, de 12V, com capacidade de 45 Ah, do tipo selada, a fim de garantir uma maior segurança em caso de queda acidental do veículo, bem como uma eficiente autonomia de rodagem para a realização dos diversos testes. Para os circuitos de memória da placa controladora foi utilizada uma bateria adicional indicada por BAT2, do tipo recarregável de NiCd, de 6 V/650 mAh.

### 2.1.4 Transdutores para monitoração da trajetória (TMT)

Após o estudo de algumas alternativas, decidiu-se pela utilização de instrumentação óptica para o acompanhamento do deslocamento do veículo. A escolha dos sensores de luz infravermelho (InfraRed – IR), deveu-se as facilidades de implementação e ao baixo custo dos mesmos. Com o sensoreamento óptico houve facilidade em definir uma trajetória, utilizando-se fitas adesivas nas cores amarelo e preto, coladas diretamente no piso do laboratório, configurando uma “pista” fechada.

Foram utilizados sensores ópticos IRD500 na recepção dos sinais produzidos pelo gerador de sinais. Este fotodetector opera com ganho elevado na faixa de IR em torno 940 nm. Na geração dos sinais não foi utilizado um emissor específico para a faixa de 940 nm, mas sim um diodo emissor de luz de grande intensidade, que responde bem nesta faixa, e também produz um ponto luminoso sobre a pista, o que facilita o

acompanhamento visual do deslocamento do veículo em relação à trajetória imposta pela pista.

#### 2.1.5 Condicionadores de sinais e circuitos de acionamento (PTS)

Consideram-se como condicionadores de sinais os circuitos necessários a geração e captura dos sinais dos sensores ópticos, o chaveamento das entradas referentes ao sensor esquerdo e direito, a alimentação simétrica a partir dos 12V da bateria e a geração do nível dc que será aplicado ao conversor A/D. Todos estes circuitos foram alojados em uma única placa de circuito impresso, denominada *placa de tratamento de sinal*. Ainda nesta placa, encontra-se o circuito de acionamento dos motores. Este é também um condicionador de sinais para os motores, que são os transdutores atuadores.

#### 2.1.6 Placa do microcontrolador e placa de comunicação (PMIC, PCOM)

Na *placa do microcontrolador* estão os circuitos que realizam a parte “inteligente” do controle. Nela encontram-se todos os circuitos destinados à conversão A/D, software do microcontrolador e saídas em PWM para controle dos motores. Também a comunicação de dados entre o sistema de microcontrolador e a unidade central de comando ou controle, feita via RS 232, encontra-se nesta etapa, sendo indicado como *placa de comunicação* uma vez que pode enviar seus dados por qualquer método adequado, como RF, ou linha física, conforme a necessidade ou conveniência.

### 2.2 VEÍCULO MONTADO – IDENTIFICAÇÃO DOS MÓDULOS PRINCIPAIS

Conforme já mencionado na seção 2.1, o veículo foi montado em uma plataforma quase triangular, sendo apresentado nas figuras 2.3, 2.4 e 2.5. Os motores estão colocados na parte mais larga, realizando a tração nas rodas esquerda e direita, diretamente acoplados aos eixos. Nestas figuras pode-se observar a *placa do microcontrolador*, a *placa de tratamento de sinal*, a *bateria* automotiva de 45 Ah e a *alimentação adicional* para os circuitos de memória. Esta alimentação, conforme mencionado anteriormente, é fornecida por um conjunto de quatro pilhas de NiCd,

mencionado anteriormente, é fornecida por um conjunto de quatro pilhas de NiCd, tamanho AA. Vê-se também um circuito indicado como *receptor de acionamento*. Trata-se de um receptor operando

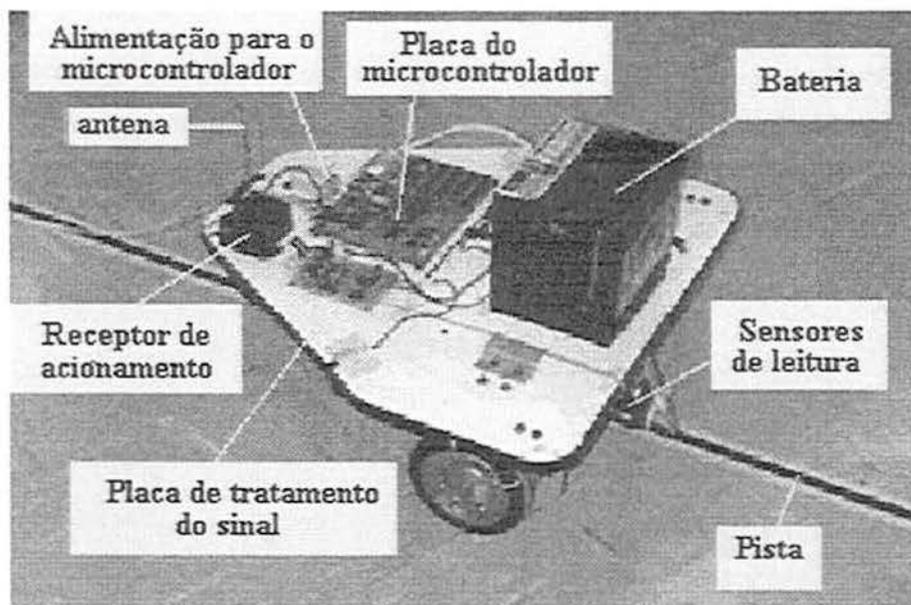


Figura 2.3 - Veículo montado, vista geral.

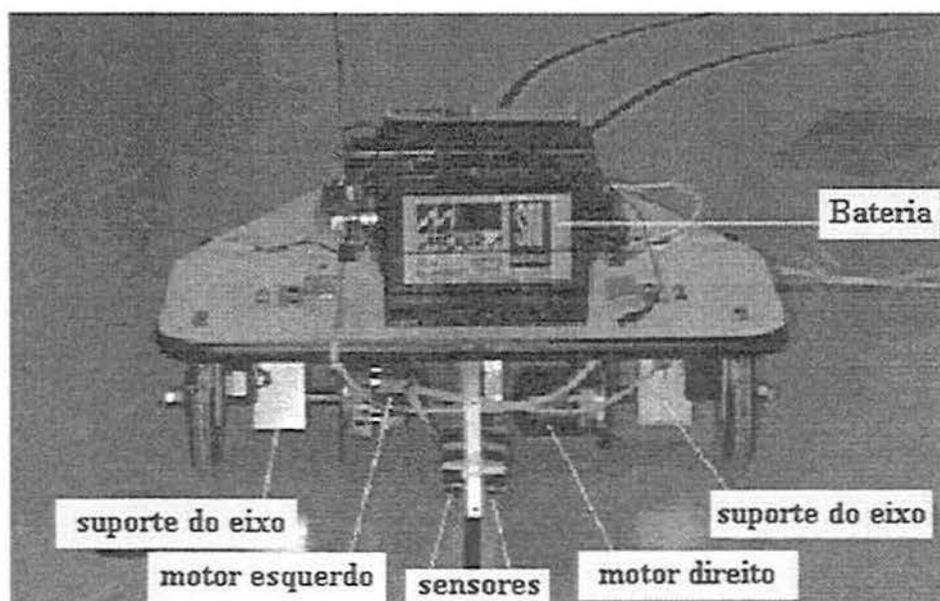


Figura 2.4 - Veículo montado, vista frontal.

na faixa de 300 MHz que recebe uma informação codificada de um transmissor que é utilizado para acionar e desacionar o veículo à distância.

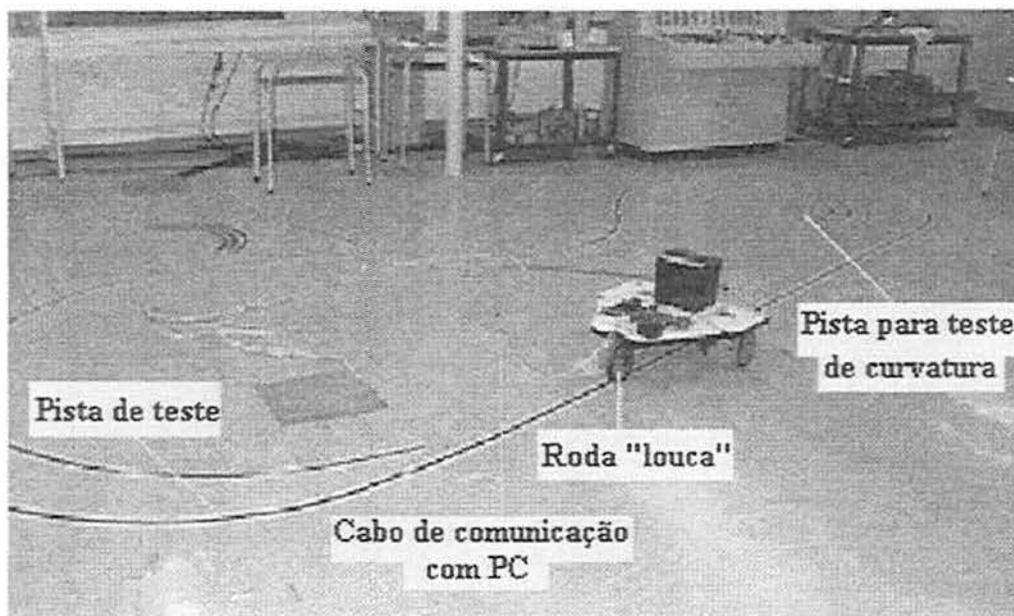


Figura 2.5 – Veículo montado, vista anterior.

Na parte mais estreita está colocada a terceira roda, chamada de “roda louca”, que possui movimentos livres para a esquerda e direita, a fim de adequar-se à trajetória que estiver sendo realizada pelo veículo, servindo de apoio para o equilíbrio do AGV.

### 2.3 DETALHAMENTO DAS SOLUÇÕES MECÂNICAS, ELÉTRICAS E ELETRÔNICAS IMPLEMENTADAS

Nesta seção são descritas as soluções implementadas na construção do veículo, que envolvem soluções de ordem mecânica, como na leitura dos sensores, e também de ordem elétrica, como na parte de condicionamento e controle dos sinais sensoreados.

Na parte de geração e tratamento dos sinais ópticos utiliza-se um sistema básico que consta de um emissor de IR e dois receptores na mesma faixa. O emissor emite os sinais pulsados em direção à linha que serve de trajetória, enquanto que os receptores, pela intensidade dos sinais recebidos, identificam a posição sobre a linha ou fora dela.

Esta linha possui 5 cm de largura, tendo a parte interna na cor preta, com 1,8 cm de largura, e as bordas na cor amarela. Ao emitir em direção ao centro da linha, haverá uma grande atenuação dos pulsos de IR refletidos devido a cor preta, enquanto que ao emitir para os extremos a atenuação será menor devido a cor mais clara. Tanto o emissor, indicado por  $T_x$ , quanto o receptor, indicado por  $R_x$ , estão alojados num gabinete na parte inferior do veículo. A figura 2.6 dá uma idéia da forma como estão alojados os fotodiodos.

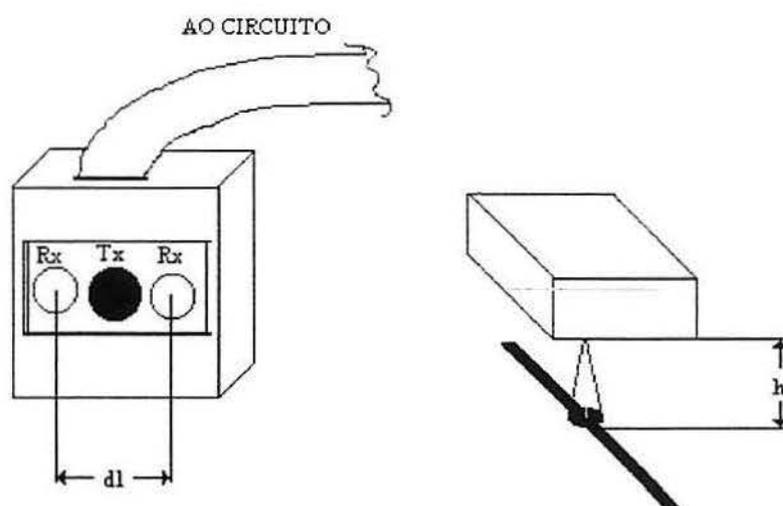


Figura 2.6 - Aspecto físico do fotoemissor e dos fotoreceptores.

Como se percebe nesta figura, a distância  $dl$  que separa os dois receptores extremos deve estar relacionada com a largura total da faixa onde será feita a leitura (parte amarela), enquanto que a altura  $h$  entre o fotoemissor e a linha central da faixa (parte preta), define a largura total da atenuação produzida.

Foram realizadas medidas nos sensores esquerdo e direito, obtendo-se as tensões denominadas  $v_e$  e  $v_d$ , respectivamente, considerando-se o deslocamento do veículo em relação ao centro da linha que define a trajetória. Na figura 2.7 apresentam-se as combinações  $(v_d + v_e)$  e  $(v_d - v_e)$ . No anexo 5 são apresentados alguns detalhamentos destas curvas.

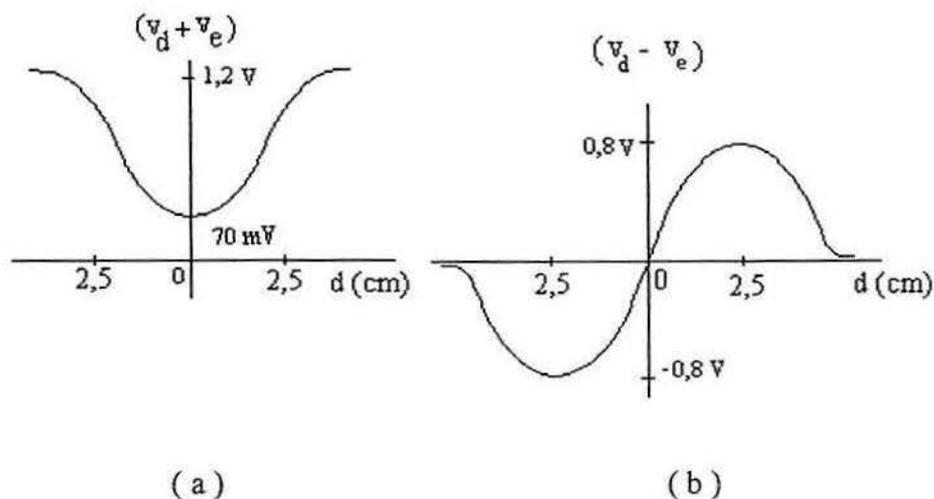


Figura 2.7 – Composição dos sinais dos sensores ópticos- a ) soma dos sinais dos sensores; b ) diferença dos sinais dos sensores.

Observando-se os sinais *soma* e *diferença*, verifica-se que pode-se optar por utilizar um ou outro para servir de indicação do desvio da trajetória do AGV.

Tendo-se em vista a sensibilidade variável dos sinais em relação à amplitude do desvio da trajetória, optou-se, neste trabalho, por uma combinação dos sinais *soma* e *diferença*, como a seguir se descreve.

Basicamente a diferença  $(v_d - v_e)$  indica para que lado da trajetória desejada o veículo se desviou, enquanto que a soma  $(v_d + v_e)$  indica o quão afastado da trajetória, para determinado lado, se encontra o veículo. Assim sendo, o sinal de *erro* foi composto aproveitando-se os trechos de maior sensibilidade dos sinais mostrados na figura 2.7. Esta combinação permite, também, que se amplie a faixa de deslocamento detectada sem perda do comportamento monotônico. Na figura 2.8 mostra-se a forma de composição do sinal de *erro*.

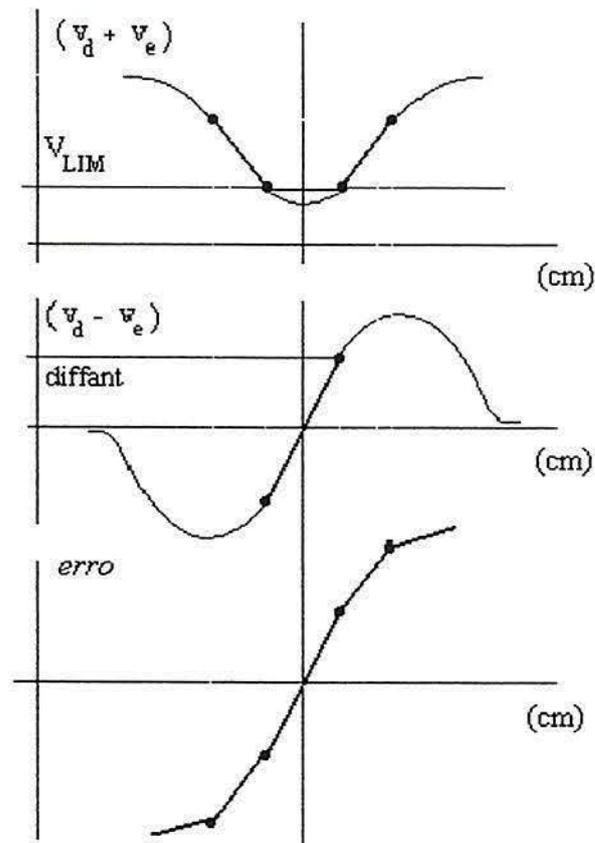


Figura 2.8 – Composição do sinal de *erro*.

O valor indicado como  $V_{LIM}$  define o limite entre utilizar a *soma* ou a *diferença* do nível de sinal de cada sensor. O valor *diffant* é o último valor de *erro* baseado na *diferença*, após o que passa a utilizar a *soma*. Este valor pode ser definido como a diferença entre os valores limites gerados pelo sensor direito e esquerdo, ou seja:

$$diffant = V_{D(LIMITE)} - V_{E(LIMITE)}$$

Efetivamente, pode-se utilizar apenas o sinal *diferença* para saber-se em que lado da curva se encontra o veículo. Porém, como a curva da *diferença* não apresenta comportamento monotônico, a partir de determinado ponto já não haveria certeza quanto à posição do veículo, pois como se vê na figura 2.8, o valor *diffant* existe para dois pontos diferentes da curva.

É importante observar que a composição do sinal de *erro* é realizada pelo próprio *software* de controle, podendo seus parâmetros serem facilmente modificados.

A figura 2.9 mostra, de uma forma mais minuciosa, a implementação realizada na construção do veículo, sendo mais um detalhamento daquela estrutura mostrada na figura 2.2.

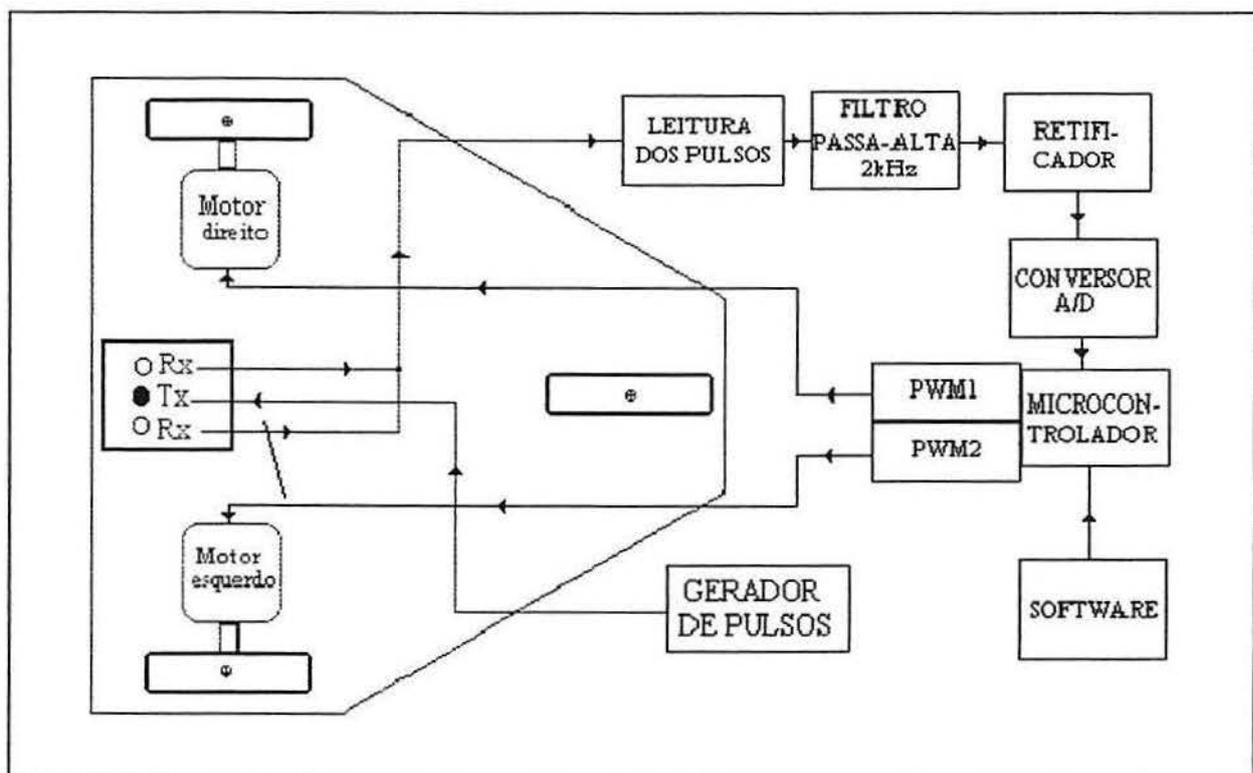


Figura 2.9 – Diagrama em blocos mais detalhado da instrumentação eletro-eletrônica.

### 2.3.1 – Gerador de pulsos infravermelhos

O gerador de infravermelho compõe parte do bloco TMT da figura 2.2 e é formado por um multivibrador astável, operando na frequência de 2kHz, a fim de evitar interferências de baixa frequência, particularmente os 60 Hz da rede elétrica. Este

circuito possui em sua saída um LED de alta intensidade que emite pulsos na faixa de infravermelho em direção à linha que servirá de trajetória para o AGV. Com isso, foi possível visualizar na pista o ponto luminoso formado pela emissão do LED, o que facilitou o acompanhamento do desempenho do controle adotado em cada situação. A figura 2.10 mostra o diagrama elétrico do circuito utilizado.

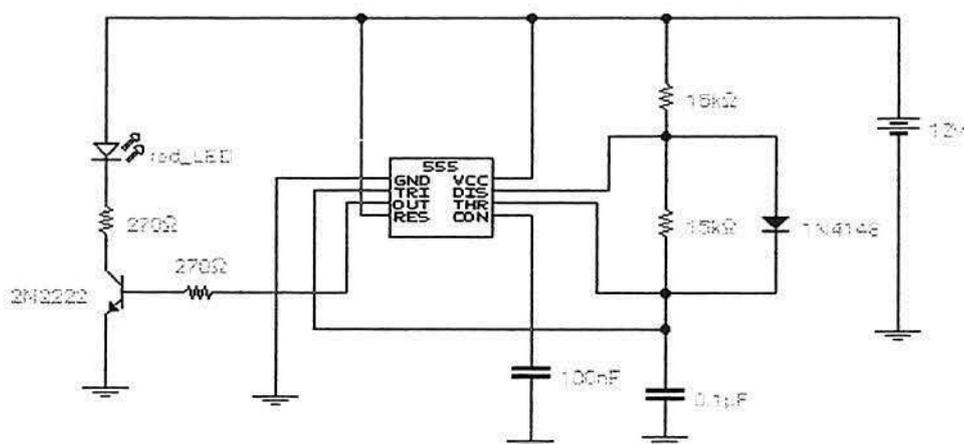


Figura 2.10 – Gerador de sinais IR.

A configuração do circuito é clássica, utilizando um diodo em paralelo com um dos resistores do circuito de carga para que haja uma maior simetria entre os tempos de carga e descarga do capacitor de  $0,1 \mu\text{F}$ . Isto permite um ciclo de trabalho de 50%. Na saída foi utilizado um transistor 2N2222 que é adequado para uso geral e chaveamento rápido, o que permite a produção de uma onda quadrada de boa qualidade.

### 2.3.2 Receptor de infravermelho e condicionador de sinais (PTS)

A figura 2.11 mostra o circuito responsável pelo condicionamento elétrico dos sinais provenientes do detetor de infravermelho, a partir dos sinais de leitura emitidos em 2kHz. Este circuito faz parte da *placa de tratamento de sinais*. O

detetor de IR utilizado é um IRD500, que apresenta uma boa resposta espectral em torno de 940 nm, segundo especificações do fabricante.

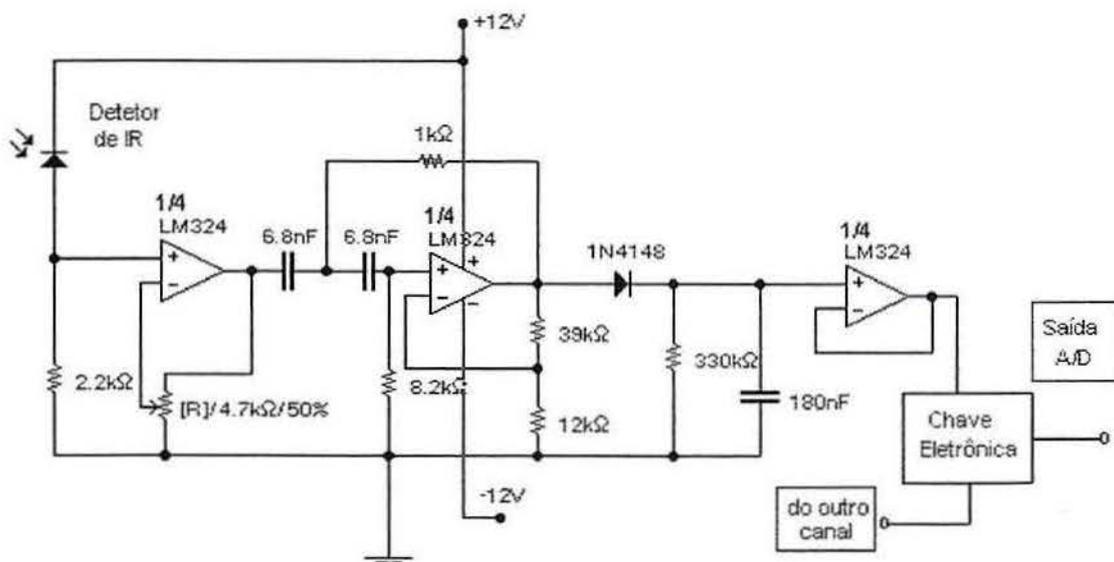


Figura 2.11 – Condicionador do sensor.

Nesta figura vemos que são utilizados apenas três dos quatro amplificadores operacionais que compõe o LM324. Trata-se de amplificadores de alto ganho, com compensação interna de frequência e que apresentam um bom desempenho com o uso de fontes simples ou simétricas [13].

Os sinais provenientes dos sensores estão modulados numa frequência de 2kHz. Após passarem por um buffer, são aplicados em um filtro passa-alta, de 2ª ordem, com resposta tipo Butterworth [8] [16]. Na saída do filtro, temos um circuito retificador de meia onda convencional, cuja finalidade é converter o sinal ali presente em um nível dc, proporcional à amplitude do sinal recebido. Este circuito é formado pelo diodo 1N4148, pelo resistor de 330 kΩ e pelo capacitor de 180 nF. O nível médio de tensão presente nesse capacitor irá servir de referência para o acionamento dos motores na saída PWM, após a conversão A/D.

Como existe apenas uma entrada para a conversão A/D [1], e necessita-se digitalizar duas leituras de diferentes sensores, utilizou-se um chaveamento eletrônico que alterna entre a leitura do sensor esquerdo e do sensor direito. O circuito da chave eletrônica está mostrado na figura 2.12.

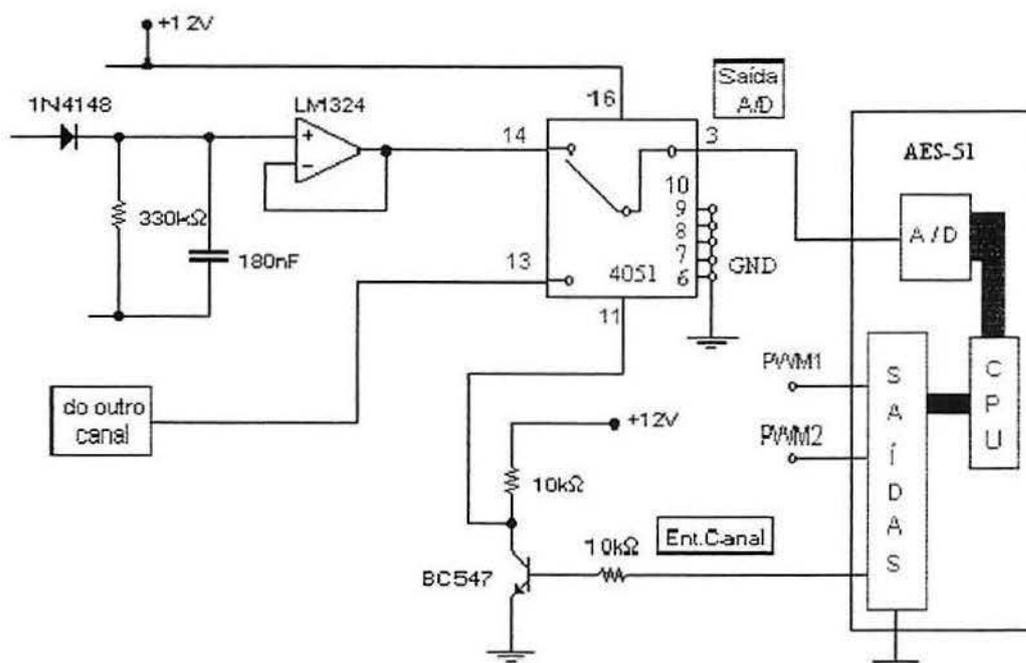


Figura 2.12– Chave eletrônica.

Como mostra a figura 2.12, a chave é composta pelo CI 4051, que recebe os sinais dos sensores nos pinos 13 e 14, e os aplica à entrada do conversor A/D pelo pino 3. A comutação das entradas é controlada pelos pulsos de sincronismo emitidos pela placa de processamento.

### 2.3.3 Conversor A/D , microcontrolador e saídas PWM (PMIC, PCOM)

Após realizado o condicionamento do sinal, o conversor A/D irá gerar a tensão necessária para que a saída PWM de cada motor produza o incremento ou redução necessária no nível médio de tensão de acionamento, a fim de compensar o desvio ocorrido na trajetória do AGV.

Os circuitos necessários para as tarefas da *placa do microcontrolador* estão contidos no kit didático AES-51, que tem como base um microcontrolador Intel 80C32, e cujo diagrama em blocos simplificado e circuitos elétricos estão mostrados nas figuras A.1, A.2 e A.3 dos anexos. A figura 2.13 mostra a placa do kit utilizado, onde podem ser vistos alguns componentes, como o teclado para entrada de dados, o display e a saída de dados serial, entre outros.

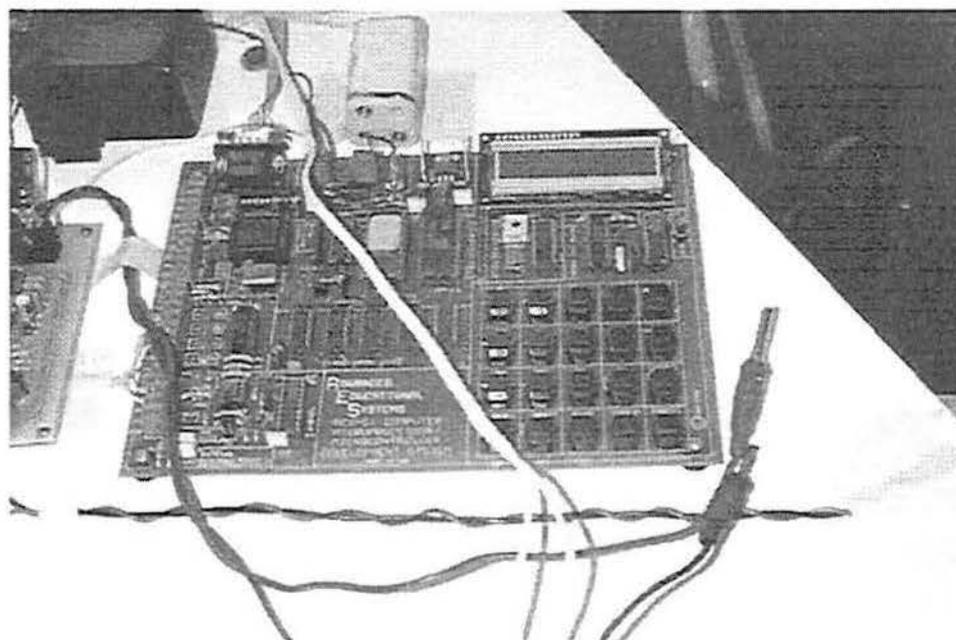


Figura 2.13 – Vista do kit didático AES-51.

A escolha desse kit didático deve-se ao fato do mesmo estar disponível nos laboratórios da UNISINOS, podendo suas funções serem realizadas por praticamente qualquer outro microcontrolador e circuitos associados. A figura 2.12 mostra, de forma bastante simplificada, o fluxo do sinal que será utilizado para controle dos motores, desde a conversão A/D até a saída PWM. Como há duas saídas em PWM, cada uma delas é aplicada a um dos motores através de um circuito de acionamento. A figura 2.14 mostra o circuito utilizado para esta finalidade.

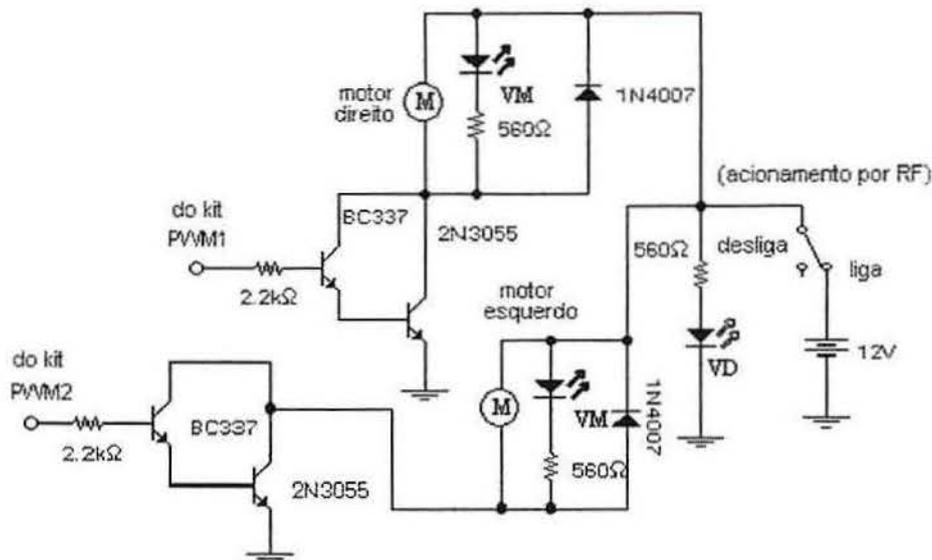


Figura 2.14 – Circuito de acionamento dos motores.

O acionamento é feito de modo direto, através de um par Darlington que recebe em sua base o sinal presente na saída PWM e tem o motor como carga de coletor. O LED vermelho indica alimentação presente em cada coletor, enquanto que o LED verde indica que os circuitos recebem alimentação da fonte de 12V através da chave acionada por radiofrequência.

Embora os circuitos utilizados possam operar com fonte de alimentação simples, verificou-se que o circuito de filtro apresentou um nível de tensão insuficiente para acionar o detetor de envoltória. Em função disto, utilizou-se o circuito mostrado na figura 2.15. Um circuito astável baseado no CI 555 forma um dobrador de tensão negativa, que fornece o valor de tensão negativa necessária, sob uma corrente muito baixa, típica de circuitos operacionais. Com a aplicação de tensão simétrica nesse ponto, o amplificador passou a fornecer um sinal de boa amplitude, facilitando o controle na saída PWM para os motores.

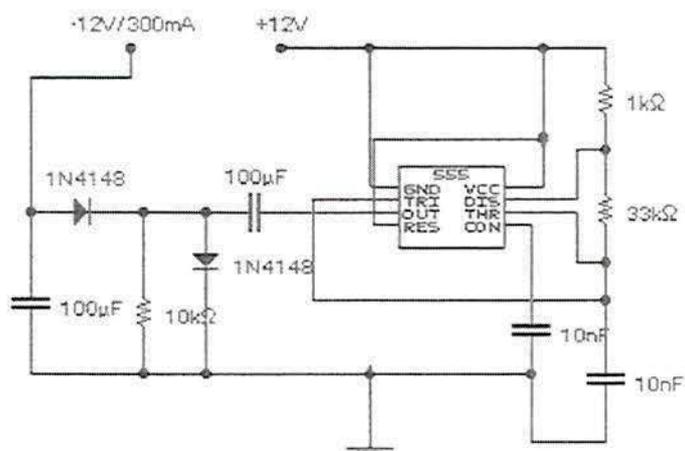


Figura 2.15 – Fonte simétrica.

Na figura 2.16 pode-se observar a placa de circuito impressa desenvolvida para alojar os componentes dos circuitos de condicionamento e acionamento dos motores, enquanto que na figura 2.17 é mostrada esta placa com seus componentes.

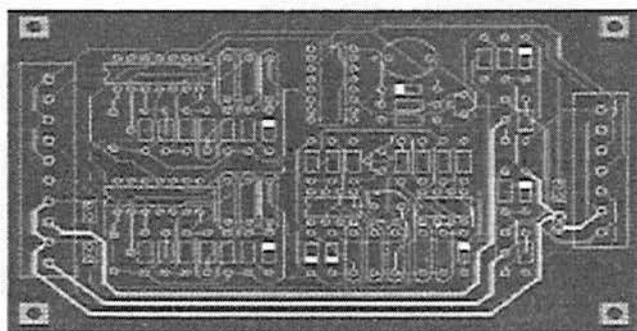


Figura 2.16 – PCI onde foram alojados os circuitos do condicionador de sinais e acionador dos motores.

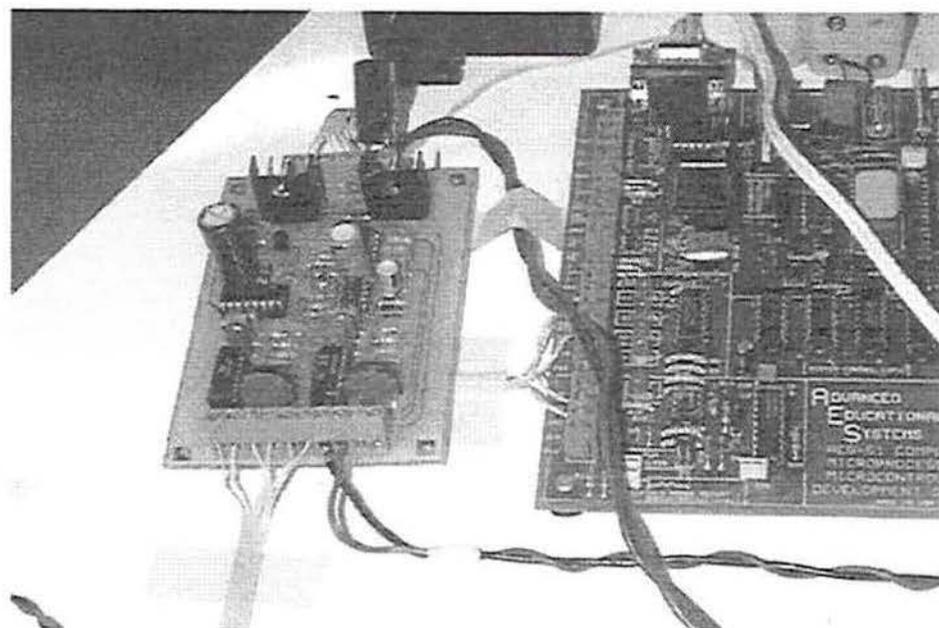


Figura 2.17 – Vista completa da placa do condicionador, e parcial da placa do microcontrolador e circuitos associados.

#### 2.4 PISTA UTILIZADA PARA OS ENSAIOS

Na figura 2.18 pode ser visto um ângulo da pista contínua utilizada para os ensaios do AGV. Esta pista foi desenvolvida no Laboratório de Máquinas Elétricas, do curso de Engenharia Elétrica da UNISINOS. A figura 2.19 mostra as dimensões e o formato aproximados da pista utilizada. As figuras 2.20 e 2.21 mostram a forma da pista utilizada para ensaios em curvas.



Figura 2.18 – Pista utilizada nos ensaios do AGV.

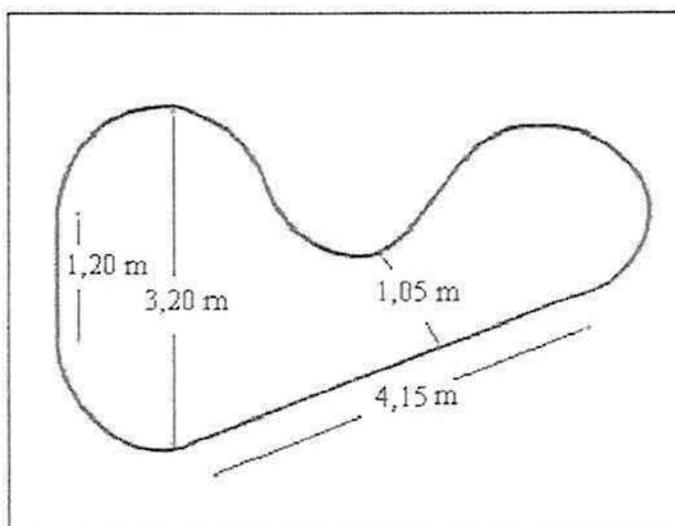


Figura 2.19 – Dimensões e forma aproximada da pista utilizada nos ensaios.

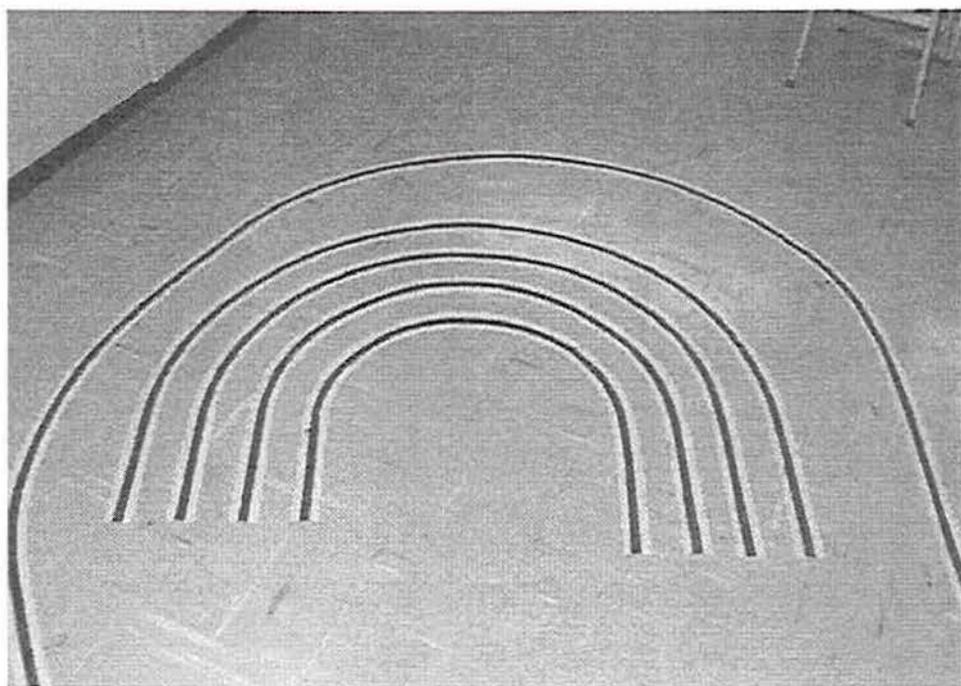


Fig 2.20 - Pista utilizada para ensaios em curvatura.

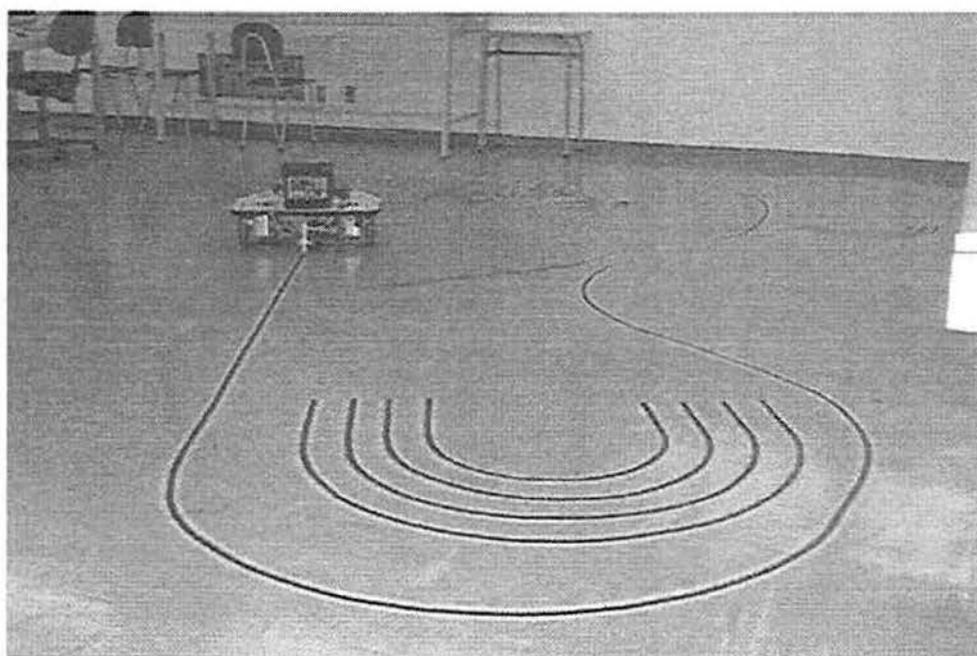


Figura 2.21 - Vista do veiculo e das pistas utilizadas nos ensaios.

### 3. TÉCNICAS DE CONTROLE

Neste capítulo serão definidas algumas técnicas de controle utilizadas para a correção de trajetória do AGV. O hardware utilizado é o mesmo em cada caso, havendo modificações no software a fim de que se possa avaliar o comportamento do veículo sob determinado tipo de controle.

A bibliografia existente na área de controle é bastante extensa e atual. No entanto, para este trabalho, adotou-se a terminologia e definições apresentadas em [14].

Um sistema de controle é basicamente um sistema de entrada e saída [14] [21], conforme ilustrado na figura 3.1. O sistema a ser controlado é geralmente chamado de processo ou planta. O processo é um sistema dinâmico, isto é, seu comportamento pode ser descrito matematicamente na forma de um conjunto de equações diferenciais. Como exemplos de sistemas dinâmicos, podemos citar os elétricos, mecânicos, químicos, biológicos, econômicos, entre outros.

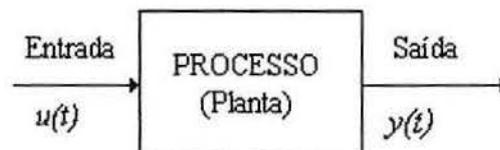


Figura 3.1 – Sistema de controle

A *variável de entrada* do processo, geralmente designada por  $u(t)$ , é chamada *variável de controle*, enquanto que a *variável de saída* do processo é chamada de *variável*

*controlada*. A idéia básica de aplicação de um controle é fazer com que a variável de saída atenda a certas especificações, a partir de sinais adequados aplicados na entrada.

No caso do AGV, os sinais captados pelos fotodiodos é que são responsáveis pela correção da trajetória do veículo. Assim, após convenientemente tratados, estes sinais são aplicados à entrada do sistema a fim de realizar as correções necessárias para que o veículo acompanhe a trajetória desejada.

### 3.1 CONTROLE EM MALHA ABERTA E MALHA FECHADA

#### 3.1.1 Controle em malha aberta

O controle em malha aberta consiste em aplicar um sinal de controle pré-determinado, esperando-se que ao final de um certo espaço de tempo a variável controlada atinja um determinado valor ou apresente um determinado comportamento. Assim, neste sistema não se utilizam informações sobre a evolução do processo a fim de se aplicar um sinal de controle. Dito de outra forma, o sinal de controle não é aplicado a partir de uma medição do sinal de saída.

A figura 3.2 ilustra o controle em malha aberta. Em geral, estes sistemas são mais simples e baratos, pois não envolvem equipamentos mais sofisticados para medição. Por outro lado, não se adaptam a perturbações externas e geralmente dependem da interferência humana.

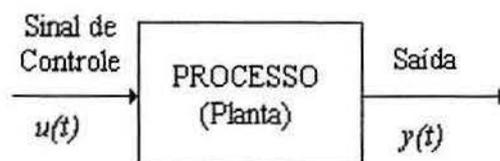


Figura 3.2 – Controle em malha aberta

### 3.1.2 Controle em malha fechada

No controle em malha fechada existe um caminho de realimentação da informação entre a entrada e a saída, de tal forma que é possível saber como a saída está evoluindo, e a partir desta informação, determinar o sinal de controle adequado a ser aplicado ao processo.

Em geral, a fim de tornar o controle mais efetivo e permitir que o sistema reaja a perturbações externas, sempre procurando manter a saída fiel a um comportamento desejado, o sinal de saída é comparado com um sinal de referência, denominado *set-point*, e o desvio produzido entre a medida destes dois sinais, ou seja, o *erro*, é utilizado para definir o sinal de controle que efetivamente deve ser aplicado ao processo. A figura 3.3 mostra o diagrama de um controle em malha fechada.

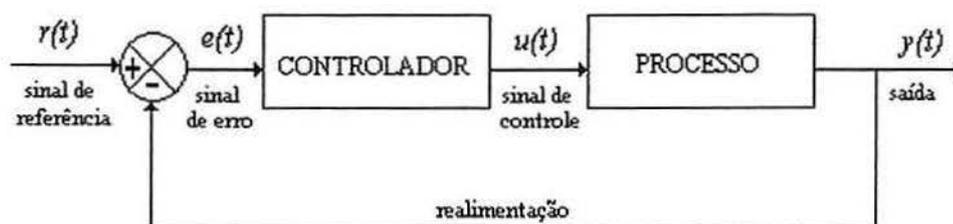


Figura 3.3 – Controle em malha fechada

O dispositivo que utiliza o sinal de *erro* para determinar o sinal de controle a ser aplicado à planta é chamado de *controlador* ou *compensador*. Este procedimento permite, entre outras ações, melhorar a resposta dinâmica do sistema e reduzir a sensibilidade do mesmo às variações dos parâmetros do processo, tornando-o mais *robusto*.

## 3.2 CONTROLADORES ANALÓGICOS E DIGITAIS

Dependendo do tipo de sinal processado pelo controlador, este pode ser *analógico* ou *digital*.

### 3.2.1 Controladores analógicos

Os controladores analógicos trabalham com sinais contínuos no tempo. A variável de processo é medida através de um sensor que converte a grandeza física em um sinal geralmente elétrico, pneumático ou mecânico, sendo este sinal comparado com uma referência de mesma grandeza. A diferença resultante destes dois sinais é então aplicada a um controlador, que nada mais é do que um sistema elétrico, pneumático ou mecânico que irá gerar um sinal contínuo a ser aplicado na entrada da planta a ser controlada.

Um controlador analógico pode ser visto também como um circuito analógico. Sua implementação pode ser realizada a partir de uma função de transferência, sendo posteriormente implementado na forma de um circuito eletrônico, constituído de amplificadores, somadores, filtros, etc.

### 3.2.2 Controladores digitais

Um controlador digital trabalha com sinais digitais. Este tipo de controlador é implementado na forma de uma rotina ou programa a ser executado por um microprocessador ou microcontrolador.

O controle digital envolve um processo de *amostragem*. O sinal de saída (ou de *erro*) é amostrado periodicamente, em intervalos de período  $T$ . O sinal amostrado (analógico) passa então por um conversor analógico/digital (A/D), onde é quantizado e transformado em um valor numérico (palavra de  $n$  bits). Este valor digital é *lido* por um microprocessador (ou microcontrolador) que vai então realizar operações numéricas e gerar uma outra palavra de  $n$  bits correspondente a ação de controle que deverá ser aplicada sobre a planta no próximo instante de amostragem, se necessário. Este valor numérico é então convertido novamente em um sinal analógico por um conversor digital/analógico (D/A), que disponibilizará para a planta um sinal de tensão ou corrente elétrica. Desta

forma, entre dois instantes de amostragem, o sinal efetivamente aplicado à planta, na maioria das vezes, é um sinal contínuo, de amplitude fixa.

Assim, podemos resumir a operação de um controle digital nas seguintes etapas:

1. amostragem;
2. conversão analógico/digital;
3. cálculo do controle através de um programa;
4. conversão digital/analógica;
5. aplicação do sinal de controle calculado até o próximo instante de amostragem.

### 3.3 AÇÕES BÁSICAS DE CONTROLE

O controlador pode ser entendido como um dispositivo que realiza determinadas operações matemáticas sobre o sinal de erro  $e(t)$  a fim de produzir um sinal  $u(t)$  a ser aplicado à planta para satisfazer um determinado objetivo. Estas operações matemáticas constituem o que se chama de *ações de controle*. Assim, podemos identificar quatro ações básicas de controle:

1. ação liga-desliga (on-off);
2. ação proporcional;
3. ação integral;
4. ação derivativa.

A seguir serão detalhadas estas quatro formas de controle.

#### 3.3.1 Ação liga-desliga (on-off)

Neste tipo de ação o controlador é modelado por um relé, conforme mostrado na figura 3.4.

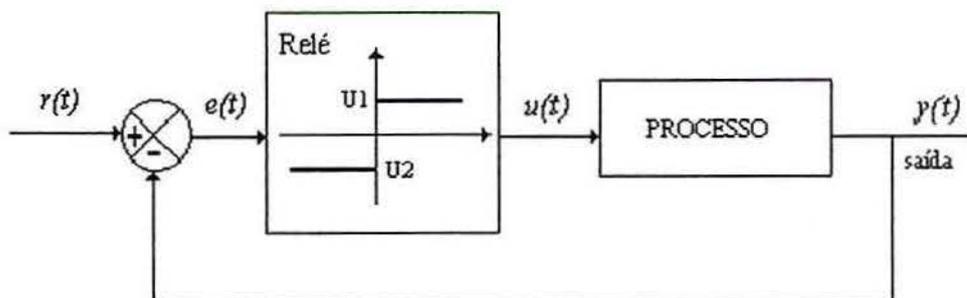


Figura 3.4 – Controle on-off

O sinal de controle  $u(t)$  pode assumir apenas dois valores, conforme o erro seja positivo ou negativo. Em outras palavras, tem-se:

$$u(t) = U1 \quad \text{se} \quad e(t) > 0 \quad , \text{ e}$$

$$u(t) = U2 \quad \text{se} \quad e(t) < 0$$

Este tipo de função pode ser implementada com um simples comparador ou mesmo com um relé físico. Note-se que neste caso haveria uma inconsistência em zero e, na presença de ruídos, teríamos chaveamentos espúrios quando o sinal  $e(t)$  estivesse próximo de zero.

Para evitar a ocorrência de tais problemas, utiliza-se na prática o chamado *controlador liga-desliga com histerese*, conforme mostrado na figura 3.5.

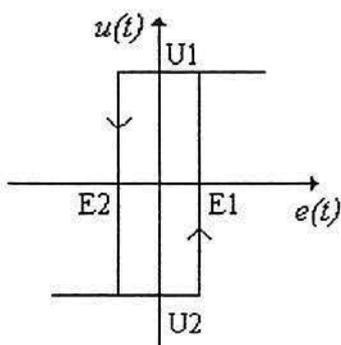


Figura 3.5 – Histerese.

Com este tipo de controlador temos o seguinte comportamento:

a) se  $u(t) = U_1$ , é necessário que o valor de  $e(t)$  seja reduzido abaixo de  $E_2$  para que ocorra o chaveamento para  $U_2$ .

b) se  $u(t) = U_2$ , é necessário que o valor de  $e(t)$  ultrapasse o valor de  $E_1$  para que ocorra o chaveamento para  $U_1$ .

O gráfico da figura 3.6 mostra a curva de resposta em malha fechada e o respectivo sinal de controle para um sistema com controlador liga-desliga com histerese. Nota-se que, em regime permanente, a saída do sistema apresenta uma oscilação em torno do valor de referência. Embora a resposta dependa também da planta, este comportamento é típico deste tipo de controlador. A amplitude e a frequência de oscilação são funções do intervalo  $[E_1, E_2]$ . A determinação deste intervalo deve ser feita levando-se em conta a aproximação desejada para  $y(t)$ , os níveis de ruído e a vida útil dos componentes.

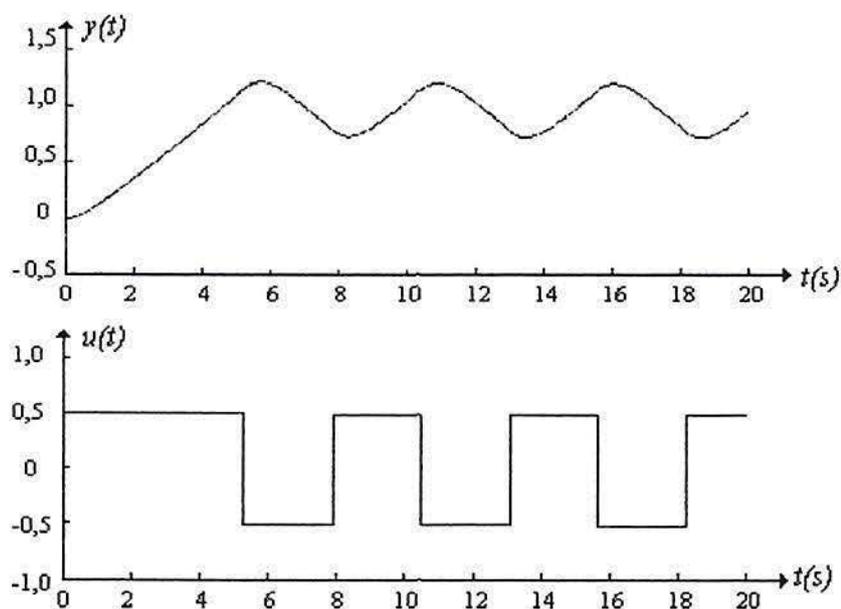


Figura 3.6 – Controle liga-desliga.

Desse modo, a ação de controle liga-desliga pode ser considerada como uma ação mais simples e mais econômica. Sua aplicação restringe-se a sistemas onde não é necessário grande precisão no valor de regime alcançado pela resposta.

### 3.3.2 Ação proporcional

Neste tipo de ação, o sinal de controle aplicado a cada instante à planta é proporcional à amplitude do valor do sinal de erro:

$$u(t) = K_p e(t) \quad [\text{eq. 3.1}]$$

Assim, se em um dado instante o valor da saída do processo é maior que o valor da referência, ou seja,  $e(t) > 0$ , o controle a ser aplicado será positivo, e proporcional ao módulo de  $e(t)$ . Se for menor, o controle será negativo e proporcional ao módulo de  $e(t)$ .

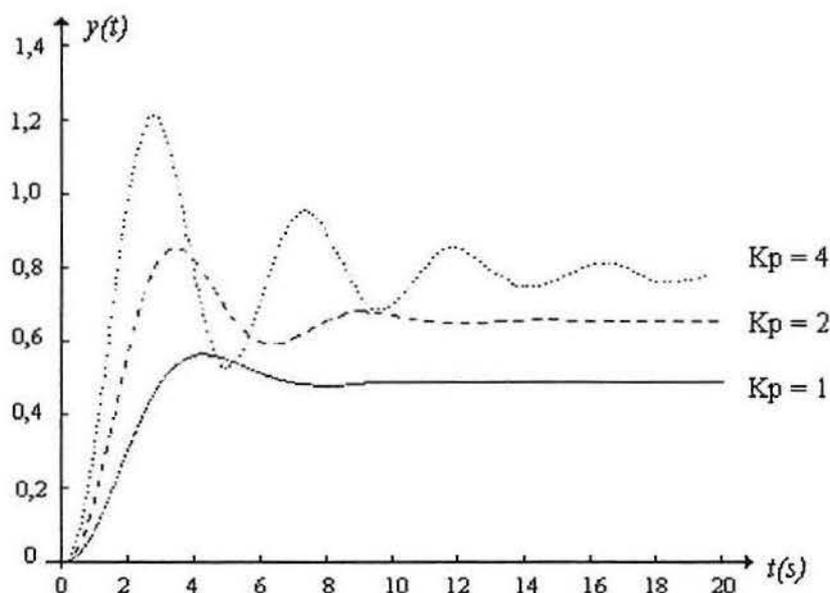


Figura 3.7 – Ação proporcional

A figura 3.7 mostra a resposta de um sistema de ordem 0 (isto é, sem elemento armazenador de energia) considerando-se a aplicação de uma ação proporcional. Observa-se que quanto maior o ganho  $K_p$ , menor a diferença entre o valor desejado e o que realmente é alcançado depois de um certo tempo (erro em regime permanente), o que indica uma melhor precisão em malha fechada.

Para sistemas de ordem 0, este erro pode ser diminuído com o aumento do ganho, porém nunca conseguiremos anulá-lo completamente. Por outro lado, ganhos elevados fazem com que o comportamento transitório do sistema em malha fechada se torne mais oscilatório. Assim, um aumento excessivo do ganho proporcional tende a levar o sistema a instabilidade.

### 3.3.3 Ação integral

A ação de controle integral consiste em aplicar um sinal de controle  $u(t)$  proporcional à integral do sinal  $e(t)$ :

$$u(t) = \frac{1}{T_i} \int e(t) dt \quad [\text{eq. 3.2}]$$

onde  $T_i$  é chamado de *tempo integral* ou *reset-time*.

Supondo que  $e(t)$  fosse constante,  $u(t)$  seria um valor proporcional ao tempo. Isto significa que a ação de controle estaria permanentemente tentando minimizar  $e(t)$ .

Verifica-se que  $T_i$  tem a função de minimizar o efeito da ação de controle nos instantes iniciais, mas na medida que o tempo passa, esta começa a ficar cada vez mais significativa.

No sistema de malha fechada, dependendo da referência e do sistema, este fato permite obter-se o seguimento de uma referência com erro nulo em regime permanente, pois a ação integral garantirá a aplicação ao processo de um sinal de controle constante de forma a ter-se  $r(t) = y(t)$ , ou seja,  $e(t) = 0$ .

No domínio da frequência, a função de transferência de um controlador com ação integral é dada por:

$$G_C(s) = \frac{u(s)}{e(s)} = \frac{1}{sT_i} \quad [\text{eq. 3.3}]$$

Deste ponto de vista, a ação integral corresponde a introduzir um pólo a mais na origem. Embora a ação integral esteja diretamente ligada à melhoria da precisão do sistema, esta ação de controle, em geral, não é aplicada de forma isolada, pois a introdução de um pólo na origem na função de transferência de malha aberta tende a piorar a estabilidade relativa do sistema em malha fechada.

#### 3.3.4 Ação derivativa

Esta ação corresponde à aplicação de um sinal de controle proporcional à derivada do sinal de erro:

$$u(t) = Td \frac{de(t)}{dt} \quad [ \text{eq. 3.4} ]$$

Verifica-se que esta ação de controle tende a agir sempre que  $e(t)$  variar no tempo. Assim, se  $e(t)$  for crescente no tempo,  $u(t)$ , que corresponde à derivada de  $e(t)$  será positivo. Se  $e(t)$  for decrescente no tempo,  $u(t)$  será negativo. Logo, esta ação de controle procura minimizar o sinal de erro, mas só produzirá efeito quando houver variação em  $e(t)$ .

A derivada de uma função está relacionada intuitivamente com a tendência de variação desta função em um determinado instante de tempo. Assim, aplicar como controle um sinal proporcional à derivada do sinal de erro é equivalente a aplicar uma ação baseada na tendência de evolução do erro. A ação derivativa é então dita *antecipatória* ou *preditiva*, e tende a fazer com que o sistema reaja mais rapidamente. Assim, a ação derivativa é utilizada para obtenção de respostas transitórias mais rápidas, ou seja, para a melhora do comportamento dinâmico do sistema em malha fechada. Se o sinal de erro permanecer constante, a ação derivativa será igual a zero, o que mostra sua ação apenas durante a resposta transitória.

A função de transferência desta ação é dada por:

$$G_c(s) = \frac{u(t)}{e(t)} = Td \cdot s \quad [ \text{eq. 3.5} ]$$

Tal função de transferência, apresenta um ganho que cresce com o aumento da frequência, fato que deixaria este sistema extremamente sensível a ruídos de alta frequência. Em função disso, esta forma de ação não é utilizada isoladamente. Quando este bloco é implementado eletronicamente, introduz-se um pólo em alta frequência que tem a finalidade de limitar o ganho nesta faixa. Assim, a função de transferência torna-se:

$$G_c(s) = \frac{u(t)}{e(t)} = Td \frac{sp}{s+p} \quad [\text{eq. 3.6}]$$

Os gráficos da figura 3.8 ilustram as curvas de resposta em frequência de um derivador puro e o efeito da introdução do pólo em alta frequência.

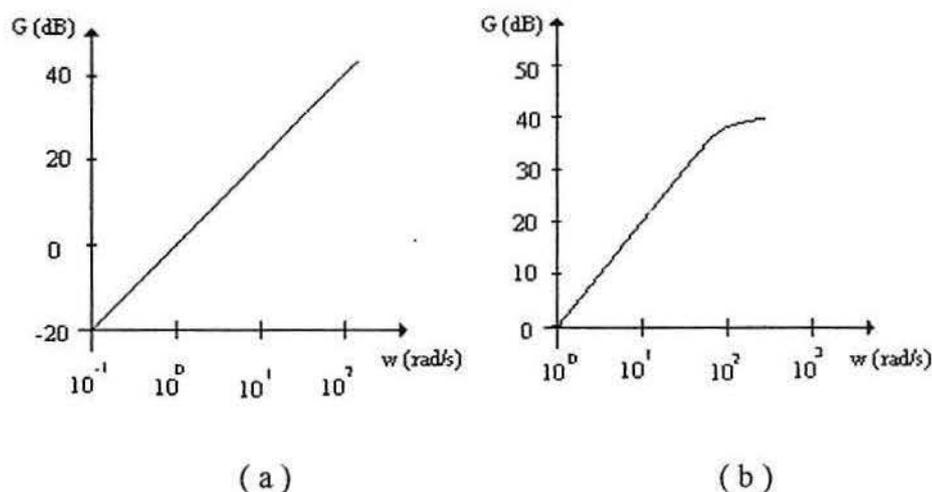


Figura 3.8 – Limitação do ganho em alta frequência. a) diferenciador puro ; b) diferenciador com pólo.

### 3.4 O CONTROLADOR PID

A combinação das ações proporcional, integral e derivativa para gerar um só sinal de controle, dá origem ao que chamamos de *controlador proporcional-integral-derivativo*, ou simplesmente PID. O objetivo é aproveitar as características particulares de cada uma destas ações a fim de se obter uma sensível melhora do sistema a ser controlado.

Genericamente, o sinal de controle gerado por um PID pode ser expresso como:

$$u(t) = K(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt}) \quad [\text{eq. 3.7}]$$

Assim, para ajustar a ação deste controlador dispõe-se de três parâmetros: o ganho proporcional (K), o tempo integral (Ti) e o tempo derivativo (Td).

Ainda, esta estrutura PID permite quatro configurações possíveis de controladores:

1. proporcional (P);
2. proporcional-integral (PI);
3. proporcional-derivativo (PD);
4. proporcional-integral-derivativo (PID).

Embora sejam possíveis diversas ações de controle, para o caso do AGV, que pode ser representado por uma planta tipo 1 (ou seja, com um pólo na origem), não foi utilizada a ação integral, já que o objetivo do controle é seguir, com erro nulo, um sinal de referência que varia em função da trajetória. No caso específico do AGV, cuja planta apresenta características de integrador, o controle integral não se mostra adequado. Assim, utilizou-se o controle proporcional (P) e o controle proporcional-derivativo (PD).

#### 3.4.1 A banda proporcional

Na prática, por restrições de ordem física ou de segurança, não é possível a aplicação de sinais de controle de amplitudes ilimitadas. Tem-se, assim, um limite máximo  $u_{m\acute{a}x}$  e um limite mínimo,  $u_{m\acute{i}n}$  para a variável de controle.

Desse modo, o sinal de controle dado pela equação 3.7 pode ser expresso de forma genérica como:

$$u(t) = K f(e(t)) = K \sigma(t) \quad [ \text{eq. 3.8} ]$$

Considerando-se os limites do controle, tem-se que o sinal que será efetivamente aplicado é descrito conforme o intervalo onde se encontra, como pode ser visto na figura 3.9. Assim, para  $\sigma(t) > u_{m\acute{a}x}$ ,  $u(t) = u_{m\acute{a}x}$ ; para  $\sigma(t)$  entre  $u_{m\acute{a}x}$  e  $u_{m\acute{i}n}$ ,  $u(t) = K \sigma(t)$ ; e para  $\sigma(t) < u_{m\acute{i}n}$ , temos  $u(t) = u_{m\acute{i}n}$ .

Desse modo, se o sinal de controle  $u(t)$  for maior que  $u_{máx}$  ou menor que  $u_{mín}$ , diz-se que há *saturação de controle*. Nesta condição, o comportamento do controle torna-se *não-linear*. Para que o comportamento do controlador PID seja dado exatamente pela equação 3.7, ou seja, linear, o sinal  $\sigma(t)$  deve pertencer ao intervalo  $[\sigma_1, \sigma_2]$ , onde  $\sigma_1 = u_{mín} / K$  e  $\sigma_2 = u_{máx} / K$ . A largura do intervalo entre  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  é chamado de *banda proporcional*,  $P_b$ :

$$P_b = \sigma_2 - \sigma_1 \quad [\text{eq. 3.9}]$$

A partir desta definição, podemos escrever que:

$$u_{máx} - u_{mín} = K P_b \quad [\text{eq. 3.10}]$$

Então, quanto maior a banda proporcional, maior será a região de comportamento linear para o controlador PID. A figura 3.9 ilustra graficamente o que foi dito sobre a banda proporcional.

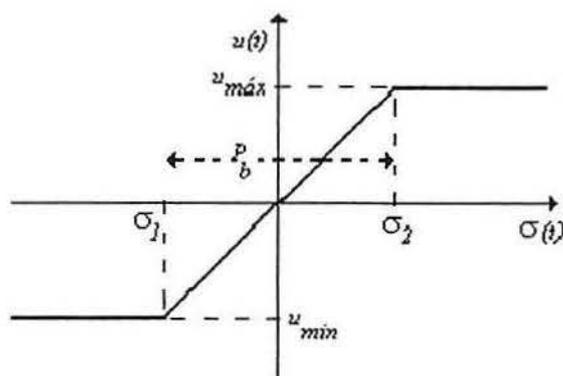


Figura 3.9 – Banda proporcional.

### 3.4.2 O controlador proporcional (P)

Conforme já visto, a ação proporcional pode ser aplicada com sucesso em sistemas mais simples, sendo a ação de controle representada por:

$$u(t) = K ( e(t) ) \quad [ \text{eq. 3.11} ]$$

Em muitos controladores PID industriais, ao invés de especificarmos diretamente valor de  $K$ , especifica-se o valor da banda proporcional em valor percentual. Considerando-se  $u_{\max} - u_{\min} = 100\%$ , tem-se:

$$K = 100 / P_b \quad [ \text{eq. 3.12} ]$$

Como se vê, quanto maior o valor de  $K$ , menor é a banda proporcional. Como já visto no estudo da ação proporcional, para um sistema do tipo 0, quanto maior o ganho  $K$ , menor será o valor do erro em regime permanente, mas este erro nunca será completamente anulado.

### 3.4.3 O controlador PI

A principal função da ação integral é fazer com que processos do tipo 0 sigam, com erro nulo, um sinal de referência do tipo salto. Entretanto, a ação integral, se aplicada isoladamente, tende a piorar a estabilidade relativa do sistema. Por esta razão, geralmente é utilizada em conjunto com a ação proporcional, dando origem ao controlador PI, cujo sinal de controle é dado por:

$$u(t) = K ( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt ) \quad [ \text{eq. 3.13} ]$$

O gráfico da figura 3.10 ilustra a aplicação da ação integral em conjunto com a ação proporcional.

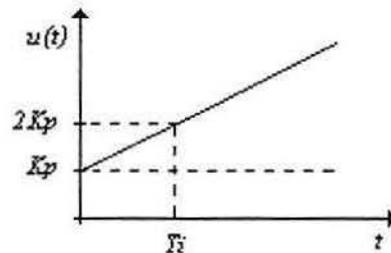


Figura 3.10 – Efeito da ação integral

A partir deste gráfico, podemos dar uma interpretação para  $T_i$ . O tempo integral corresponde ao tempo em que a parcela relativa à parte proporcional da ação de controle é duplicada. Geralmente, especifica-se  $T_i$  em *minutos*.

Aplicando-se a transformada de Laplace para o controlador PI, chegamos a seguinte função de transferência:

$$G_{pi}(s) = \frac{u(s)}{r(s)} = \frac{K(s + \frac{1}{T_i})}{s} \quad [ \text{eq. 3.14} ]$$

Note-se que tem-se um zero em  $-1/T_i$ , que tende a compensar o efeito desestabilizador do pólo na origem.

#### 3.4.4 O controlador PD

A saída de um processo apresenta, intuitivamente, uma certa “inércia” com relação as modificações na variável de entrada. Esta “inércia” explica-se pela dinâmica do processo que faz com que uma mudança na variável de controle provoque uma mudança

considerável na saída da planta somente após um certo tempo. Uma outra interpretação é que, dependendo da dinâmica do processo, o sinal de controle estará em “atraso” para corrigir este erro. Este fato é responsável por transitórios com grande amplitude e períodos de oscilação, podendo, em casos extremos, gerar respostas instáveis.

A ação derivativa quando combinada com a ação proporcional tem justamente a função de “antecipar” a ação de controle a fim de que o processo reaja mais rápido. Neste caso, o sinal de controle a ser aplicado é proporcional a uma *predição* de saída do processo.

A estrutura básica de um controlador PD é dada por:

$$u(t) = K(e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt}) \quad [\text{eq. 3.15}]$$

Considerando-se que, a partir de uma expansão em série de Taylor,  $e(t + T_d)$  pode ser aproximado por

$$e(t + T_d) \approx e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \quad [\text{eq. 3.16}]$$

tem-se que  $u(t) \approx K e(t + T_d)$ , ou seja, o sinal de controle é proporcional a estimativa do erro de controle  $T_d$  unidades de tempo à frente. Em outras palavras, a predição é feita extrapolando o valor do erro pela reta tangente à curva do erro no instante  $t$ , conforme indicado na figura 3.11.

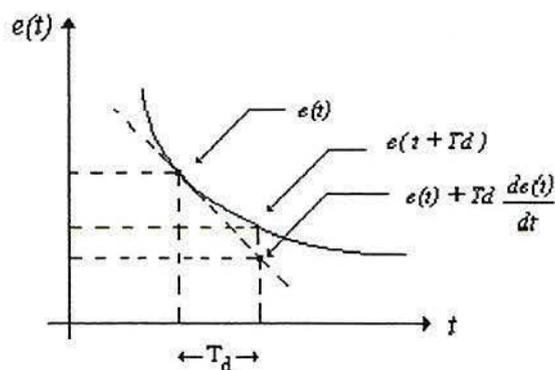


Figura 3.11 – Interpretação da ação proporcional-derivativa

Esta ação preditiva tende a aumentar a estabilidade relativa do sistema e a tornar sua resposta mais rápida.

Como na prática deve-se limitar o ganho da parte derivativa da resposta em altas frequências do controlador PD através do acréscimo de um pólo, sua função de transferência pode ser expressa por:

$$G_{pd} = \frac{u(s)}{r(s)} = K \left( 1 + \frac{spT_d}{s+p} \right) = \frac{K(1+T_dp) \left( s + \frac{p}{1+pT_d} \right)}{(s+p)} \quad [ \text{eq.3.17} ]$$

Observa-se que o zero do controlador PD está sempre à direita do pólo. Esta configuração é equivalente à de um compensador de avanço de fase. Nota-se, também, que um aumento em  $T_d$  faz com que o zero do controlador tenda à origem, indicando a predominância da ação derivativa.

### 3.5 DIAGRAMA BÁSICO DO CONTROLE DO AGV

A figura 3.12 mostra o diagrama básico do sistema AGV utilizado.



Fig. 3.12 – Diagrama básico do AGV.

O que se busca controlar é a posição do veículo em relação a uma referência de posição previamente conhecida. Assim, a retroação produzida com as informações sobre a posição atual do veículo geram uma variável de *erro*, que por sua vez é aplicada no controlador que passa a atuar com a variável  $u$  de controle, a fim de fazer com que a correção de trajetória seja implementada. Na realidade, como são dois motores, a variável de controle foi desdobrada em  $u_1(t)$  e  $u_2(t)$ .

Como foram utilizados dois sensores para a leitura de posição, são gerados dois sinais de tensão, um para o lado esquerdo da faixa, denominado de  $v_e$ , e outro para o lado direito, denominado  $v_d$ . Na figura 3.12 estes elementos constituem o bloco denominado *sensores do desvio*. A geração do sinal de desvio a partir da realimentação das informações dos sensores ocorre conforme já descrito no capítulo 2, sendo representada nesta figura pelo bloco *conformação do sinal de desvio*.

O sinal realimentado, após passar pelo processo de conformação, será comparado com a referência de posição, que é função do local da pista em que se encontra o veículo. O resultado desta comparação dará origem ao sinal de *erro*,  $e(t)$ . Este sinal é aplicado à entrada do bloco controlador a fim de produzir um novo sinal de controle,  $u(t)$ , que atuará sobre cada um dos motores, produzindo a correção na trajetória.

A forma de realimentação e tratamento do sinal de erro está mostrada na figura 3.13, levando-se em conta que a velocidade média de cada motor é função do nível médio de tensão aplicada. Nesta figura vemos que o sinal de *erro*  $e(t)$  é aplicado ao *controlador* de forma a produzir um sinal de controle  $u(t)$  que irá afetar as variáveis indicadas por  $U_1$  e  $U_2$ . Estas variáveis representam valores de tensão, que produzirão variação na velocidade média de cada um dos motores, sendo obtidas a partir do software de controle. Para efetuar a conversão digital-analógica dos sinais de controle dos motores, utilizaram-se dois circuitos PWM (Pulse Width Modulation).

Estes níveis de tensão recebem um incremento e um decremento de  $u(t)$  a partir do nível de tensão  $U_m$ , anteriormente aplicado. Os valores  $U_1$  e  $U_2$  serão utilizadas como

“referência” para o aumento ou redução de velocidade em cada motor. Para o cálculo de  $U_m$ , nível médio de tensão do PWM, em função da velocidade pretendida, utiliza-se a seguinte expressão:

$$U_m = \left( \frac{Vel_{m\u00e9dia}}{0,4918} \right)^{\frac{1}{1,206}} \quad [ \text{eq. 3.18} ]$$

Esta função, determinada de forma experimental, foi obtida a partir da observação do comportamento do veículo para diversos valores de  $U_m$ , expresso em Volts, e seus correspondentes valores de velocidade, em mm/s, dentro de um trecho linear da pista, cuja distância era perfeitamente conhecida, sendo válida somente para aquelas condições. Isto foi necessário, porque em determinado instante das medidas, percebeu-se que um incremento de, digamos, 30% no valor médio da tensão dos motores não correspondia a um incremento de 30% na velocidade do veículo. Como os motores giram sempre no mesmo sentido, o cálculo de  $U_m$  é feito apenas para o primeiro quadrante.

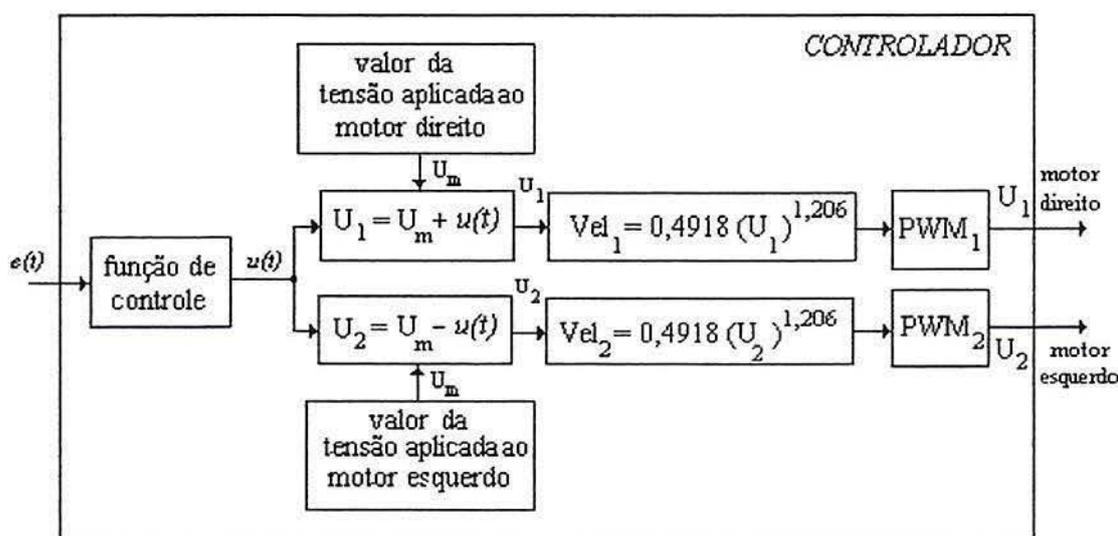


Figura 3.13 – Tratamento do sinal de erro e correção da resposta dos motores.

Para agilizar os ensaios realizados, permitindo uma rápida substituição de dados do software de controle, utilizou-se um PC que recebe os dados fornecidos pela *placa de*

*processamento* de forma serial. Como só há uma entrada A/D na placa de processamento, foi utilizada uma chave eletrônica para comutar o sinal do sensor direto e esquerdo de forma constante. Como são utilizados 8 bits, podemos ter até 256 níveis para o sinal dos sensores.

Para a correção dos motores, são enviados, do PC para o microcontrolador, dois bytes com informações de tensão para o motor esquerdo e direito. Estas informações são enviadas na forma de 100 níveis para cada motor, dos 256 níveis possíveis em cada byte. Considerando que os 15 primeiros níveis são utilizados pelo protocolo de transmissão de dados do microcontrolador para funções próprias, criou-se, a partir deste último nível, uma faixa de valores para o motor direito, compreendida entre os níveis 15 e 115, e outra para o motor esquerdo, entre os níveis 143 e 243, conforme mostra a figura 3.14.

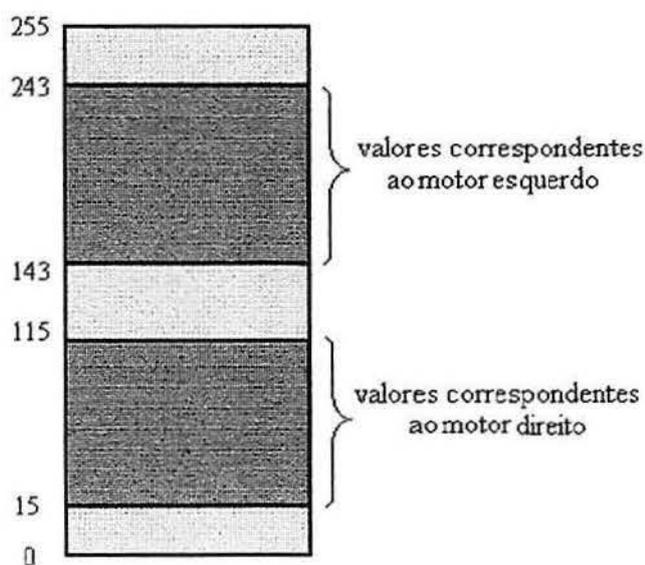


Figura 3.14 – Forma de identificação do sensor que está sendo lido.

Dessa forma, ficaram perfeitamente identificado os valores referentes a cada motor, pois se estiverem na faixa entre 15 e 115, certamente são do motor direito, enquanto que os valores na faixa de 143 a 243 pertencem ao motor esquerdo.

Após obtido o sinal de erro  $e(t)$ , o software realiza a geração do sinal de controle  $u(t)$ , necessário à correção da trajetória do veículo. Este sinal de controle é enviado à placa de processamento de forma serial, modificando o valor médio de tensão das saídas PWM, que atuam diretamente sobre os motores do AGV, produzindo a correção desejada. A figura 3.5.4 ilustra a forma de comunicação entre o microcontrolador e o PC.

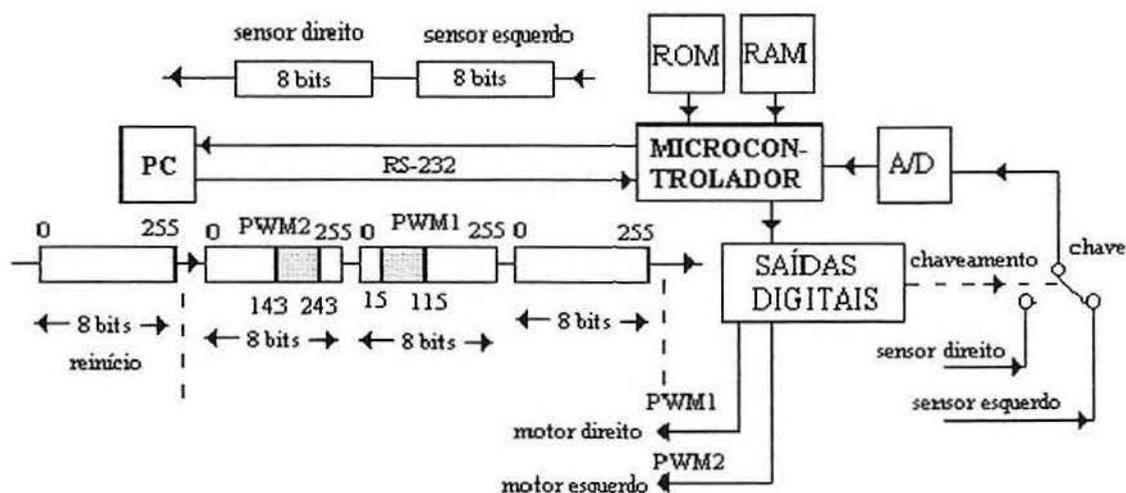


Figura 3.15 – Forma de comunicação entre o microcontrolador e o PC.

Considere que foi ajustada a velocidade  $tmp = 60$ . Isto significa que será aplicado em cada motor 60% do seu valor nominal (12 V), ou seja, 7,2V. Podemos chamar este valor de *set point* (sp). Assim,  $sp = 60$ .

Para início do programa, o PC manda para o microcontrolador uma palavra de 8 bits com o valor 255. Ao receber esta informação, o microcontrolador envia para o PC dois bytes com as leituras de tensão dos sensores direito e esquerdo, nessa ordem. O sinal de saída dos sensores varia entre 0 e 5V, quantizado em 8 bits, o que permite gerar 256 valores diferentes. Com estes dados, é feita a conformação do sinal de desvio para a geração do sinal de erro, conforme indicado no diagrama da figura 3.12. O carro inicia seu percurso.

Após a geração do sinal de erro  $e(t)$ , o software de controle (no PC) gera um sinal de controle  $u(t)$ . Este sinal de controle é enviado para o microcontrolador na forma de 2 bytes, sendo que um deles contém as informações para o motor direito entre os níveis 15 e 115, e o outro para o motor esquerdo, entre os níveis 143 e 243.

Digamos que o software produziu um sinal  $u(t) = 20$ . Isto significa que um motor terá sua velocidade aumentada em 20% do valor nominal (2,4 V), e o outro terá sua velocidade reduzida na mesma proporção. Então temos:

$$U_1 = sp + 20 = 60 + 20 = 80 \quad \text{e}$$

$$U_2 = sp - 20 = 60 - 20 = 40$$

Estas tensões  $U_1$  e  $U_2$  irão gerar os valores PWM1 e PWM2, que representam os níveis de tensão média aplicada aos motores, como indicado na figura 3.13.

A figura 3.16 mostra a situação das saídas PWM de cada motor se o veículo estiver ajusta para uma velocidade  $tmp = 60$ , que equivale a 60% do nível médio de tensão do PWM, e localizado exatamente no centro da pista. Nesta situação, o erro gerado é zero, e  $u(t) = 0$ . Então, cada motor estará recebendo um nível médio de tensão igual a 60 % do valor nominal de operação.

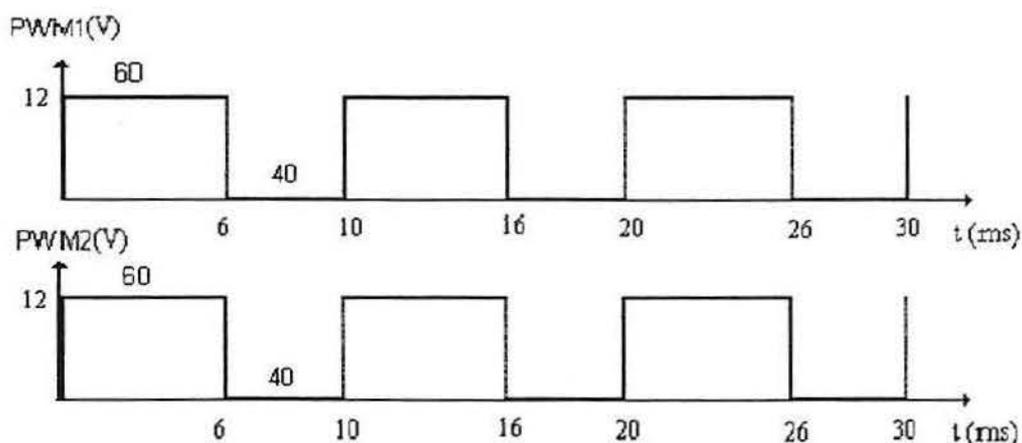


Figura 3.16 – Nível médio de tensão das saídas PWM quando  $u(t) = 0$ .

Considere agora que houve um desvio do centro da pista, que resultou num sinal de controle  $u(t) = 20$ . Então um dos motores receberá um acréscimo de 20% na sua velocidade e o outro uma redução de 20%. A figura 3.17 mostra como estariam as saídas PWM nesta situação.

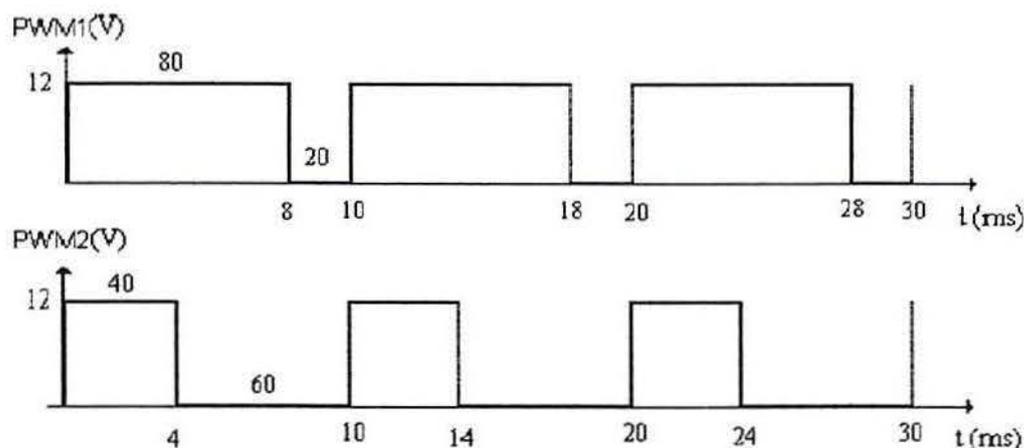


Figura 3.17 – Saídas PWM para  $u(t) = 20$ .

É importante notar que a média das tensões dos motores deve resultar no valor do *set point*. Neste caso, temos  $(80 + 40) / 2 = 120 / 2 = 60$ . Se  $u(t) = 0$ , então  $(60 + 60) / 2 = 120 / 2 = 60$ .

Se a soma do *set point* com o valor de controle exceder 100, então será atribuído o valor 100 para esta soma, pois não há como aplicar tensão superior a 12V nos motores.

Considere que  $u(t) = 50$ , para  $tmp = 60$ . Então, temos:

$$U_1 = sp + 50 = 60 + 50 = 110 \quad e$$

$$U_2 = sp - 50 = 60 - 50 = 10$$

Nesta situação, um motor receberá uma tensão de 100% (12 V), e o outro de 10% (1,2 V). Neste caso, a média é menor que o *set point*, o erro está muito elevado, e a ação de controle será deficiente.

## 4. EXPERIMENTOS REALIZADOS

### 4.1 DESCRIÇÃO DA TOMADA DE MEDIDAS

Foram realizadas várias medidas de desempenho, porém três medidas comparativas serão descritas e apresentadas em gráfico.

Para cada tipo de sistema, foram desenvolvidas as curvas do erro produzido e do controle aplicado.

O procedimento adotado foi o seguinte: numa pista de 15,40m foram realizadas marcas a cada 40 cm, e registrados os valores dos níveis de cada sensor e o nível médio de tensão em cada motor, à medida que o AGV passava por um destes pontos. Para tornar mais fiel os resultados alcançados, foram repetidas três vezes as mesmas medidas para diferentes valores de velocidade, sendo ao final utilizado a média aritmética simples. Idêntico procedimento foi utilizado para avaliação de desempenho em curvas.

Foram avaliados três tipos de sistemas de controle: liga-desliga, proporcional, proporcional-derivativo. A velocidade em que se obteve uma melhor comparação entre os três sistemas corresponde a  $t_{mp} = 40$ , o que equivale a 40% do nível médio de tensão do PWM fornecida ao motor.

Os resultados obtidos estão registrados nas tabelas a seguir e permitem visualizar que, em função da velocidade, o sistema que apresentou o melhor

desempenho foi o PD. Isto se deve as características da correção adotada, onde os motores respondem à derivada do erro, permitindo correções mais imediatas. Explorando estas características do controle PD, chegou-se a um máximo de velocidade correspondente a  $t_{mp} = 80$  (40,86 mm/s) enquanto que a menor velocidade experimentada foi  $t_{mp} = 40$  (21,66 mm/s) e encontrou melhor desempenho para ganho proporcional = 0,5 e derivativo = 5,0, para qualquer valor de  $t_{mp}$  entre 20 e 100.

## 4.2 DESCRIÇÃO INDIVIDUAL DOS SISTEMAS

### 4.2.1 Liga-desliga (on-off)

Este sistema apresenta somente duas condições para o sistema: ou o motor está energizado, ou está desenergizado, o que equivale a condição lógica Hi-Lo, respectivamente.

É um sistema de implementação mais simples, onde a leitura sobre a faixa indica se o deslocamento se dá na direção correta (nível baixo nos motores - não há necessidade de correção), ou se houve desvio para algum dos lados da faixa (o sensor correspondente indica nível alto e aciona o controle para a correção). Este sistema é implementado via software comparando o valor do *erro*. Se este for maior que zero, indica que o valor de  $v_d$  é maior que o valor de  $v_e$ . Logo, o veículo está se deslocando para a direita. Então é aplicada uma ação de controle no motor direito para retornar a trajetória original. Se o *erro* produzido for menor que zero, então o valor  $v_e$  é maior que o valor  $v_d$ , o que mostra que o veículo se desloca para a esquerda. Logo a ação de controle é aplicada sobre o motor esquerdo. Esta ação de controle é feita aplicando um valor de correção calculado por software. A correção pode ser modulada por um ganho selecionado pelo usuário, no programa de controle. Em nossos testes, foram utilizados ganhos que geram correções entre 30% e 60% do ciclo ativo do PWM. As velocidades utilizadas nos testes foram

entre  $t_{mp}=30$  e  $t_{mp}=60$ . O melhor desempenho ocorreu para  $t_{mp}=40$  e ganhos entre 30 e 50.

Por suas características de corte e saturação, este sistema apresenta um comportamento brusco de correção, tornando o deslocamento do AGV bastante deslegante. Em contrapartida, reagiu de forma satisfatória com valores de velocidade até  $t_{mp}=60$ . Para velocidades acima deste valor, já não se consegue seguir a trajetória.

#### 4.2.2 Proporcional

Como uma evolução natural do sistema liga-desliga, foi implementado o sistema proporcional. Neste sistema, a correção é proporcional ao erro produzido, de modo que se há um desvio para a direita da faixa, haverá um nível de correção aplicado ao motor proporcional ao desvio produzido da faixa.

Após implementado, este sistema apresentou um desempenho semelhante ao On-Off, embora de forma mais suave, produzindo desvios imediatos, porém não tão abruptos quanto os do sistema anterior. A expressão que define o controle é  $P=K_p \times \text{erro}$ , onde  $K_p$  define os valores de ganho utilizados. Foram utilizados valores entre 0,1 e 0,9. Para a velocidade, foram utilizados valores entre  $t_{mp}=30$  e  $t_{mp}=100$ . Os melhores resultados foram encontrados para velocidades de 30 e 40. Acima desses valores de  $t_{mp}$ , o veículo realizou desvios muito grandes em torno da faixa e não mais recuperou a trajetória.

#### 4.2.3 Proporcional-derivativo

Foi o que apresentou melhor desempenho em várias situações de velocidade, produzindo as correções necessárias de forma suave e constante, sem movimentos abruptos

como nos anteriores. A expressão que define o controle é  $c = K_p \times erro + K_d \times (erro - e_{ant})$ , onde  $K_d$  representa o ganho derivativo aplicado, e  $e_{ant}$  representa o último valor de erro acumulado. Para esta situação, foram utilizados valores de  $K_p$  entre 0,1 e 0,7 para valores de  $K_d$  entre 1,0 e 9,0. Os melhores resultados alcançados foram para  $K_p$  elevados, e  $K_d$  mais baixos.

### 4.3 RESULTADOS OBTIDOS

A seguir são apresentados os resultados obtidos da análise dos sistemas estudados. Foram elaboradas tabelas para deslocamento linear, em cada sistema, e para realização de curvaturas, para o sistema proporcional-derivativo. Não foram testados outros sistemas em curvas, uma vez que o interesse era conhecer a capacidade do veículo em realizar curvas de pequeno raio, e o sistema PD apresentou um bom desempenho em várias situações.

#### 4.3.1 Deslocamento linear

##### 4.3.1.1 – Sistema liga-desliga (on-off)

A tabela 4.1 reúne os dados referentes ao mais simples dos controles aplicados, que é o controle on-off.

Tabela 4.1

		t m p		
		30	40	60
g a n h o "K"	30	O	O	X
	40	O	O	X
	50	O	O	X
	60	O	X	∇X

Legenda:

- O - realizou a trajetória
- X - perdeu a trajetória
- ∇X - não consegue orientação

Foram realizadas, pelo menos, três voltas completas na pista, com diversos valores de ganho e velocidade. O resultado representa a média simples dos valores medidos.

Como mostrado na tabela 4.1, o limite máximo de controle ocorreu para uma velocidade  $t m p = 40$  e ganho  $K = 50$ . Acima desses valores, a trajetória não foi mais

recuperada. Com  $t_{mp} = 60$  e  $K = 60$ , o veículo não conseguiu iniciar orientação de trajetória. Isto se deve ao fato de que, com ganhos elevados, ele rapidamente se afasta do centro da pista e não consegue mais retornar por não conseguir ler o ponto onde o sensor apresenta redução de nível.

#### 4.3.1.2 – Sistema proporcional

A tabela 4.2 reúne os valores coletados para este tipo de controle. Também aqui foram realizadas, pelo menos, três voltas para cada valor de velocidade e ganho tabelados.

O melhor desempenho ocorreu para valores de velocidade  $t_{mp} = 30$ , que realizou as correções para qualquer valor de ganho entre 0,1 e 0,9. Para  $t_{mp} = 40$ , o veículo tornou-se “mais agressivo” na forma de corrigir a trajetória para ganhos acima de 0,5, mas ainda conseguiu realizar toda a volta na pista. A medida que a velocidade aumentou para  $t_{mp} = 60$ , já não foi mais possível corrigir a trajetória. Isto porque à medida que o ganho aumenta, os desvios em torno do centro da pista se tornam cada vez maiores, dificultando o retorno. Este fato se agrava com velocidades mais elevadas.

Já com velocidades mais baixas, como  $t_{mp} = 25$ , o veículo se tornou muito lento, quase parando nas curvas, independente do valor do ganho aplicado.

Tabela 4.2

		t m p				
		30	40	60	80	100
p r o p o r c i o n a l	.1	O	O	X	*X	*X
	.3	O	O	X	*X	*X
	.5	O	*O	*X	*X	*X
	.7	O	*O	*X	*X	*X
	.9	O	*O	*X	*X	*X

Legenda:

- O – realizou a trajetória
- \*O - ficou mais “agressivo”, mas realizou a trajetória
- X - perdeu a trajetória
- \*X - realizou desvios muito grandes do centro da faixa e perdeu a trajetória

### 4.3.1.3 – Sistema proporcional-derivativo.

As tabelas 4.3, 4.4 e 4.5 apresentam os dados coletados para o controle PD, com velocidades  $t_{mp} = 40, 60$  e  $80$ , respectivamente.

Novamente foram realizadas, pelo menos, três medidas para cada situação de velocidade, com ganhos variáveis  $K_p$  entre  $0,1$  e  $0,7$ , e  $K_d$  entre  $1,0$  e  $9,0$ . O resultado corresponde a média simples das medidas realizadas.

Tabela 4.3

(  $t_{mp} = 40$  )

		d e r i v a t i v o				
		1	3	5	7	9
p r o p o r c i o n a l	.1	O	O	X	X	X
	.3	O	O	O	O	X
	.5	O	O	O	O	O
	.7	O♦	O	O	O	O

Tabela 4.4

(tmp = 60)

		derivativo				
		1	3	5	7	9
p r o p o r c i o n a l	.1	X	X	X	X	X
	.3	O	O	O	O	X
	.5	O♦	O	O	O	O
	.7	O♦	O	O	O	O

Tabela 4.5

(tmp = 80)

		D e r i v a t i v o				
		1	3	5	7	9
P r o p o r c i o n a l	.1	X	X	X	X	X
	.3	O♦	O	O♦	X	X
	.5	O♦	O	O	O	O
	.7	O♦	O	O	O	O

Legenda para as três tabelas de ganho PD:

X - Perdeu a trajetória

O - Realizou a trajetória

O♦ - Perdeu a trajetória mas conseguiu recuperar.

É interessante notar que para velocidades baixas, pode-se utilizar ganhos derivativos também baixos. A medida que a velocidade aumenta, baixos ganhos derivativos não são capazes de corrigir a trajetória do veículo. A melhor situação de controle foi com ganho  $K_d$  e  $K_p$  médios. Assim, para  $K_d = 5,0$  e  $K_p = 0,5$  o deslocamento do veículo foi elegante e eficiente nas correções exigidas.

Para velocidades altas, os ganhos  $K_d$  e  $K_p$  devem ser também altos. Em velocidades baixas, os ganhos  $K_d$  e  $K_p$  deve ser reduzidos, pois há uma tendência do veículo perder a trajetória.

#### 4.3.2 DESEMPENHO EM CURVATURAS

Para avaliar a capacidade de realizar pequenas curvas e manter a trajetória, foram realizadas quatro pistas com raios de 30, 40, 50 e 60 cm. O sistema de controle utilizado foi o proporcional-derivativo, com  $K_p$  variando entre 0,1 e 0,5, e  $K_d$  entre 1,0 e 9,0. Para estas variações de ganho, a velocidade do veículo foi ajustada para  $t_{mp} = 40$ ,  $t_{mp} = 60$  e  $t_{mp} = 80$ . Os resultados são apresentados nas tabelas 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9.

Tabela 4.6

(Raio = 30 cm)

		D E R I V A T I V O					Tm (%)
		1	3	5	7	9	
P R O P	.1	X	X	X	X	X	40
	.3	O	O	O	X	X	
	.5	O	O	O	O	X	
	.7	O	O	O	O	O	
O R C I O	.1	X	X	X	X	X	60
	.3	O	O	X	X	X	
	.5	O	O	O*	O	X	
	.7	O	O	O	O	O	
O N A L	.1	X	X	X	X	X	80
	.3	X	X	X	X	X	
	.5	O	O	O	X	X	
	.7	O	O	O	O	O*	

Legenda:

X - Perdeu a trajetória

O - Realizou a trajetória

O\* - Realizou e perdeu a trajetória o mesmo número de vezes.

Tabela 4.7

( Raio = 40 cm )

		D E R I V A T I V O					Tm (%)
		1	3	5	7	9	
P R O P	.1	O	X	X	X	X	40
	.3	O	O	O	O	X	
	.5	O	O	O	O	O	
	.7	O	O	O	O	O	
O R C I	.1	X	X	X	X	X	60
	.3	O	O	O	X	X	
	.5	O	O	O	O	X	
	.7	O	O	O	O	O	
O N A L	.1	X	X	X	X	X	80
	.3	X	X	X	X	X	
	.5	O	O	O	O*	X	
	.7	O	O	O	O	O*	

Legenda:

X - Perdeu a trajetória

O - Realizou a trajetória

O\* - Realizou e perdeu a trajetória o mesmo número de vezes.

Tabela 4.8

( Raio = 50 cm )

		D E R I V A T I V O					Tm (%)
		1	3	5	7	9	
P R O P O R C I O N A L	.1	O	O	X	X	X	40
	.3	O	O	O	O	O	
	.5	O	O	O	O	O	
	.7	O	O	O	O	O	
	.1	X	X	X	X	X	60
	.3	O	O	O	O	X	
	.5	O	O	O	O	O	
	.7	O	O	O	O	O	
	.1	X	X	X	X	X	80
	.3	O	O*	X	X	X	
.5	O	O	O	O	O		
.7	O	O	O	O	O		

Legenda:

X - Perdeu a trajetória

O - Realizou a trajetória

O\* - Realizou e perdeu a trajetória o mesmo número de vezes.

Tabela 4.9

Raio = 60 cm

	D E R I V A T I V O					Tmp (%)	
		1	3	5	7		9
P R O P	.1	O	O	X	X	X	40
	.3	O	O	O	O	O	
	.5	O	O	O	O	O	
	.7	O	O	O	O	O	
O R C I O	.1	X	X	X	X	X	60
	.3	O	O	O	O	O*	
	.5	O	O	O	O	O	
	.7	O	O	O	O	O	
N A L	.1	X	X	X	X	X	80
	.3	O	O	O	O	X	
	.5	O	O	O	O	O	
	.7	O	O	O	O	O	

Legenda:

X - Perdeu a trajetória

O - Realizou a trajetória

O\* - Realizou e perdeu a trajetória o mesmo número de vezes.

Considerando as dimensões do veículo, 50 x 50 cm, a primeira impressão que surge é que seu raio mínimo está limitado à distância entre rodas. Então, o menor raio possível seria de 50 cm, situação em que uma roda estaria travada e a outra girando para completar a circunferência. No entanto, é a posição do sensor até as rodas que define a curvatura mínima. Como o sensor está colocado no centro geométrico do veículo, o raio mínimo teórico seria 25 cm, e não 50 cm.

Conforme se vê nas tabelas apresentadas, para raios menores, o ganho  $K_d$  deve ser baixo, independentemente da velocidade. Para o mesmo raio e velocidades maiores, o ganho  $K_p$  precisa ser mais elevado.

Para raios maiores, só se verificou limitação para  $K_p = 0,1$ . Assim, praticamente qualquer relação de ganho permite um controle adequado do veículo.

O melhor desempenho ocorreu para as condições  $K_p = 0,5$  e  $K_d = 5,0$ , que atende praticamente qualquer velocidade, em qualquer raio. Em particular, a situação crítica dessas condições ocorreu para raio = 30 cm e  $t_{mp} = 60$ . Nesse caso, estamos na fronteira do ganho proporcional, pois um pouco abaixo de 0,5 perde-se a trajetória, e um pouco acima ela já é recuperada.

#### 4.4 TESTE DE OPERAÇÃO AUTÔNOMA

Como a utilização real de AGV realiza-se de maneira autônoma, isto é, o controlador dos movimentos deve residir no processador do veículo, realizou-se, também um experimento nestas condições.

##### 4.4.1 Transferência do programa de controle

O software original que rodava no PC estava escrito em BASIC. Para utilizá-lo no 8051, o software foi re-escrito em "C" usando um compilador "C" específico para 8051, que gerou os arquivos binários necessários para a execução do programa no kit.

Quando o kit está no modo monitor, a RAM externa do kit funciona como a memória externa de dados do 8051. Porém, quando passamos a executar um programa, o kit tem um recurso em seu hardware, que passa a tratar a memória externa de dados como sua memória externa de programa. Isto torna possível a execução dos programas contidos naquela memória.

#### 4.4.2 Parâmetros utilizados no teste autônomo

Foi utilizado o controlador PD, com ganho proporcional 0,5 e ganho derivativo 5, e velocidade tmp de 40 e 60, que apresentaram o melhor desempenho e atendem diversas atividades.

## 5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados dados de comparação entre os sistemas estudados, salientando-se as principais características de cada caso. Também alguns gráficos serão apresentados, considerando-se o valor do sinal de *erro* e do sinal de *controle*, utilizando-se valores médios, instantâneos e eficazes, conforme as equações 5.1 e 5.2, expressos em relação ao tempo necessário para se completar uma volta e meia a três voltas ao redor da pista. Inicialmente utilizou-se apenas uma volta. Porém, os resultados indicavam comportamento transitório com valores muito elevados de *erro* e *controle*. Como haviam indicativos de que esses valores tenderiam a se estabilizar após algumas voltas, optou-se por percorrer três voltas, o que confirmou a tendência dos valores inicialmente coletados.

A variável erro e a variável controle foram expressas por seus valores eficazes, calculados a partir da própria definição de valor eficaz. Considere a curva mostrada na figura 5.1.

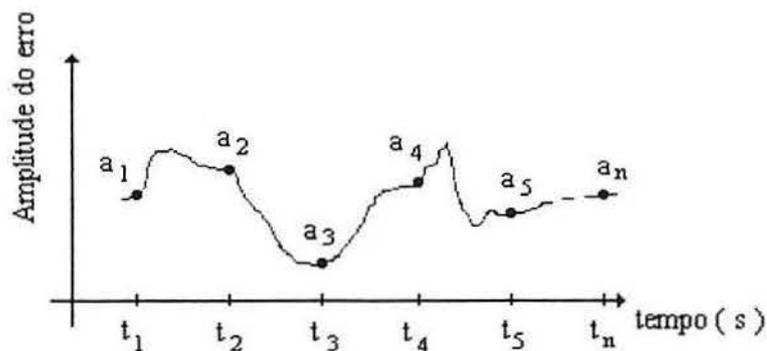


Figura 5.1 - Erro instantâneo

Os pontos  $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ , representam valores instantâneos do erro produzido, amostrados em intervalos de tempo constantes, indicados por  $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$ , que em nosso caso foram de 500 ms. Assim, o erro eficaz é determinado a partir da expressão:

$$\text{erro}_{ef} = \sqrt{\frac{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 + \dots + a_n^2}{n}} \quad [\text{eq. 5.1}]$$

onde  $n$  representa o número de amostragens consideradas.

A partir dessa expressão, percebe-se que o *erro* está sendo integrado a cada medida, e conforme a atuação de cada controle, seu valor tende a se reduzir e estabilizar em torno de uma média para valores de  $n$  suficientemente elevados, que correspondam a deslocamentos maiores que apenas uma volta ao redor da pista. O mesmo procedimento foi adotado para o cálculo do valor eficaz do sinal de *controle*.

O valor médio do erro foi calculado como a média dos valores entre duas amostragens consecutivas, conforme a equação 5.2.

$$\text{erro}_{med} = \frac{a_{n-1} + a_n}{2} \quad [\text{eq. 5.2}]$$

onde  $n$  representa o valor instantâneo da amostra considerada, conforme mostrado na figura 5.1.

A seguir, passaremos a apresentar alguns resultados do estudo de cada sistema.

## 5.1 SISTEMA LIGA-DESLIGA (ON-OFF)

A figura 5.2 mostra, na forma de gráfico, a composição dos dados obtidos a partir do sistema de controle on-off. No eixo das abscissas estão representados os valores de tempo, em segundos, necessário para que se percorresse três voltas completas na pista. No eixo das ordenadas, representam-se os valores de *erro produzido*, indicado como *amplitude do erro*, e expressos em dezenas de milivolts. Estes valores representam um nível de tensão diferencial entre os sensores esquerdo e direito, e são válidos para todos os gráficos que apresentam a variável *erro*.

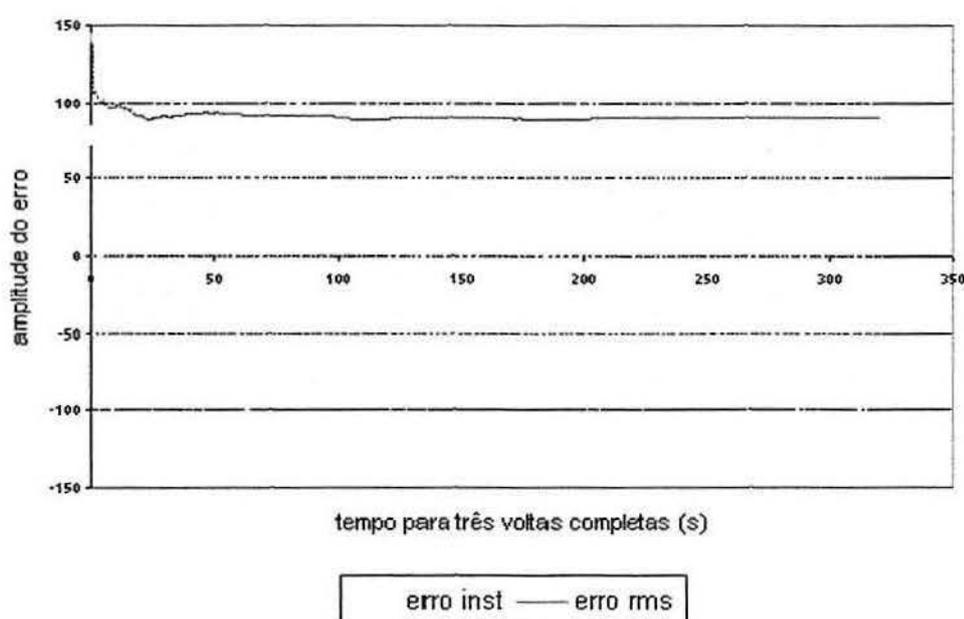


Figura 5.2 – Erro instantâneo e eficaz ( $t_{mp}=40$ ;  $K=30$ ).

Foi fixado um valor de ganho  $K = 30$ , para a atuação do *controle*, que representa um percentual do ciclo ativo do PWM aplicado aos motores. Como foi utilizado  $t_{mp} = 40$ , teremos  $(t_{mp} + K)$  aplicado em um motor, isto é, 70% do ciclo ativo do PWM, enquanto que o outro motor receberá  $(t_{mp} - K)$ . Com este valor de ganho, o comportamento do veículo foi *moderadamente* oscilatório, evitando-se, assim, movimentos muito bruscos no corte a na saturação dos motores. A velocidade escolhida foi  $t_{mp} = 40$ , em todos os testes,

uma vez que este valor mostrou-se adequado para fins de comparação entre os vários sistemas.

Na figura 5.3 temos a representação do erro médio e do erro rms produzidos.

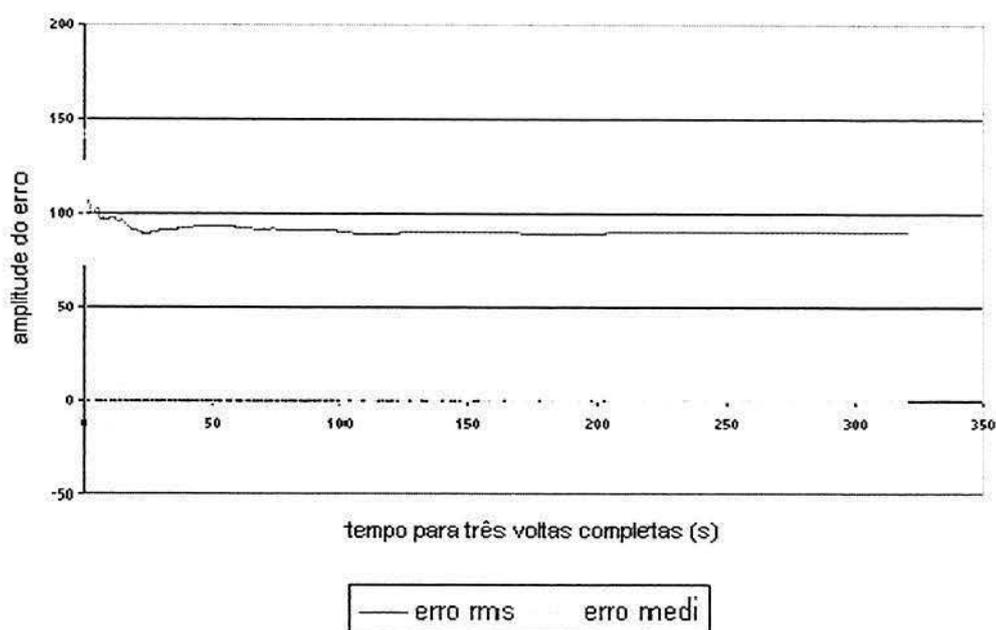


Figura 5.3 – Erro médio e erro eficaz ( $t_{mp}=40;K=30$ ).

É interessante observar que após as três voltas já se tem um indicativo do comportamento do erro. Neste caso, vê-se que o erro médio tende a zero, e o erro rms tende a se manter num valor constante.

A figura 5.4 mostra o comportamento do controle aplicado, onde o eixo das ordenadas indica unidades percentuais do ciclo ativo do PWM, aplicando-se esta unidade para todos os gráficos de controle apresentados. Neste gráfico observa-se os valores instantâneo, médio e rms, necessário para a correção do erro gerado, conforme mostrado na figura 5.3. Observa-se pelo gráfico que o valor do controle rms se mantém constante, o que indica que o valor da energia aplicada aos motores para garantir a trajetória tende a se

manter constante ao longo das três voltas na pista. O valor de ganho  $K=30$ , limita o ponto onde haverá a correção, fazendo com que seja mais ou menos brusca.

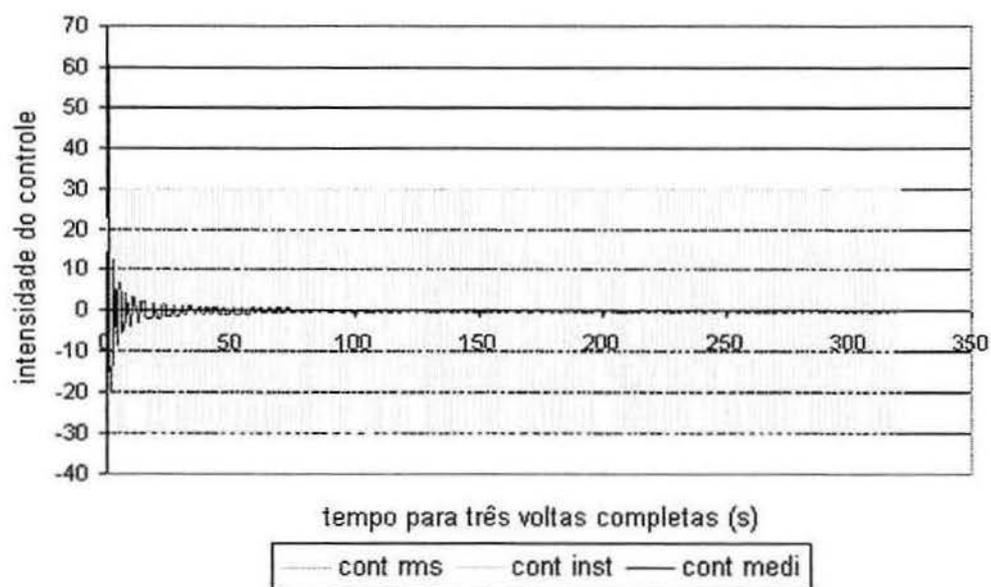


Figura 5.4 – Controle aplicado em três voltas completas ( $t_{mp}=40$ ;  $K=30$ ).

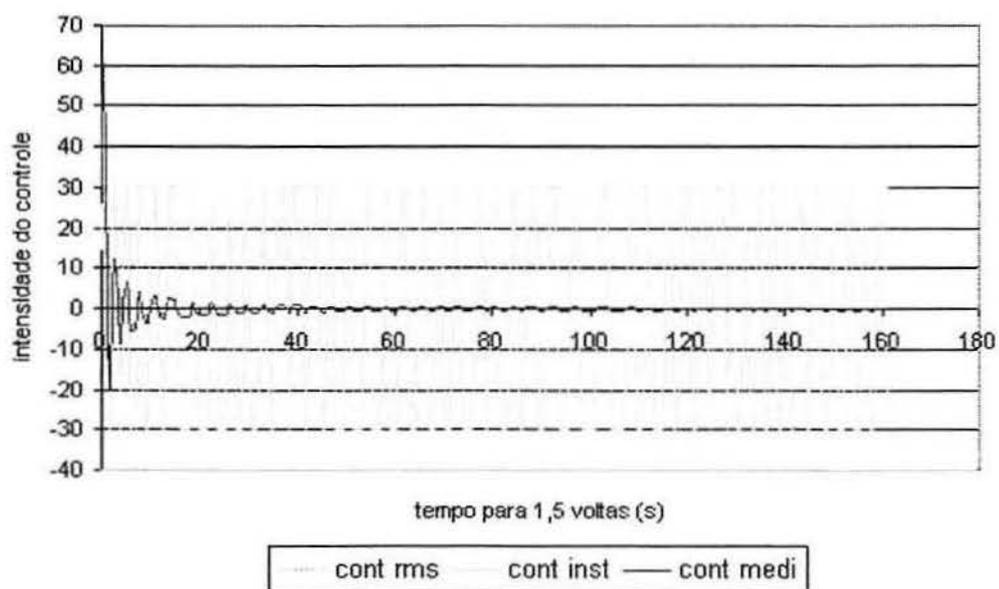


Figura 5.5 – Controle aplicado em uma volta e meia ( $t_{mp}=40$ ;  $K=30$ ).

A figura 5.5 mostra detalhes do gráfico anterior, onde são tomados os valores referentes a uma volta e meia na pista. Esta expansão produzida no gráfico reflete de forma mais clara o comportamento deste tipo de controle, onde o controle médio, indicado por *cont medi* mostra que após várias solicitações de correção o veículo passa a ter um comportamento regular, deslocando-se de maneira equidistante do centro da pista.

Embora apresente características de economia e simplicidade no controle do veículo, este sistema tende a se tornar mais oscilatório devido a “operação excessiva do mecanismo de comutação” [ 14 ], conforme se trabalhe com ganhos mais elevados. Para ganhos e velocidades baixos, pode apresentar soluções desejáveis em várias situações.

## 5.2 SISTEMA PROPORCIONAL

O sistema proporcional apresenta uma evolução natural do sistema on-off. Seu comportamento está indicado no gráfico da figura 5.6. Nesta figura vemos o comportamen-

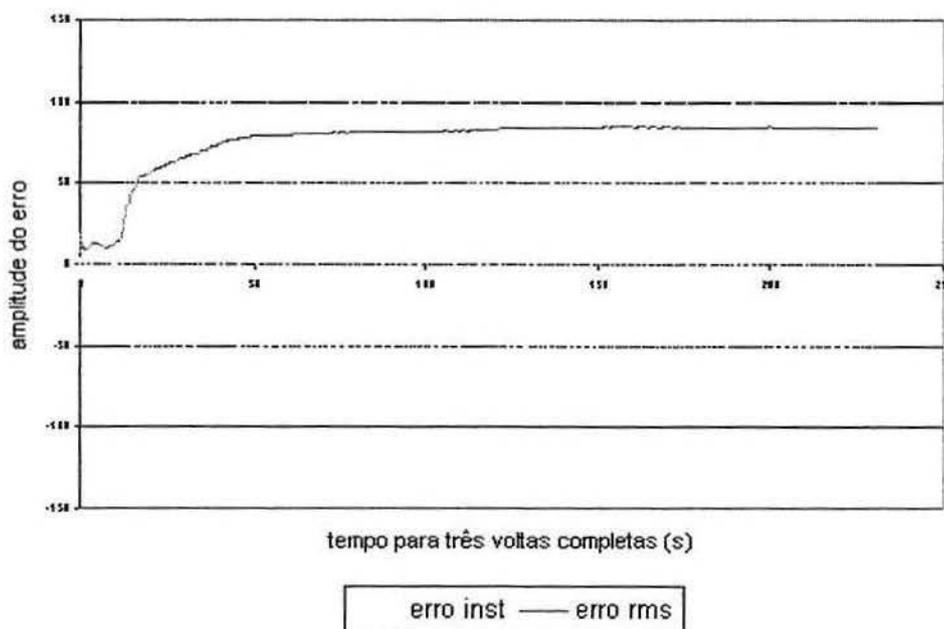


Figura 5.6 – Erro instantâneo e eficaz (tmp=40; P=0,5).

mento do erro instantâneo e do erro eficaz .

Comparando com a curva mostrada na figura 5.2, vemos que o comportamento do sistema proporcional é bem mais suave, evitando a ocorrência dos movimentos bruscos citados. A figura 5.7 compara os valores médio e eficaz do erro produzido.

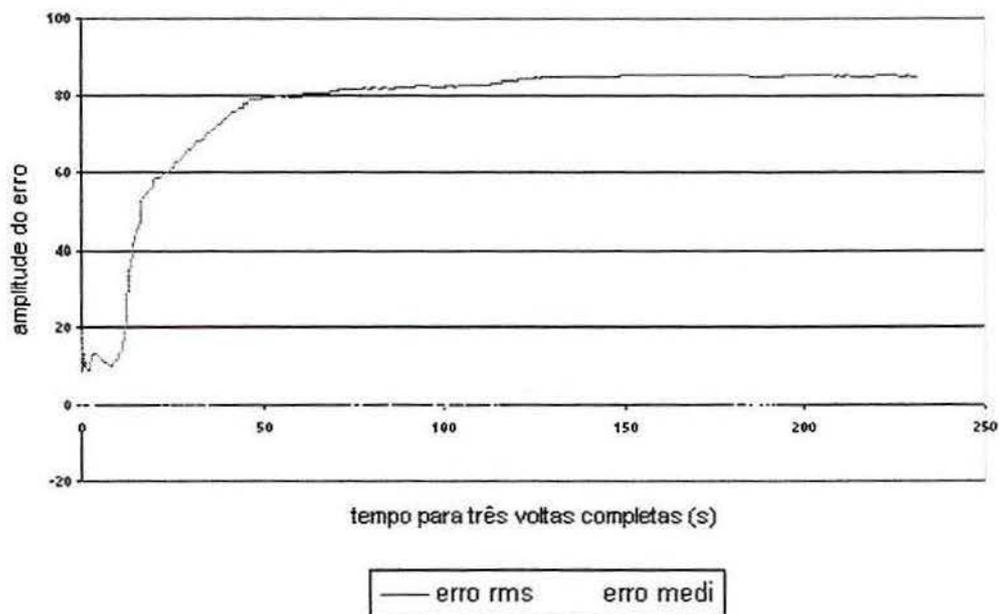


Figura 5.7 – Erro médio e eficaz ( $t_{mp}=40; P=0,5$ ).

A figura 5.8 apresenta o gráfico do controle aplicado.

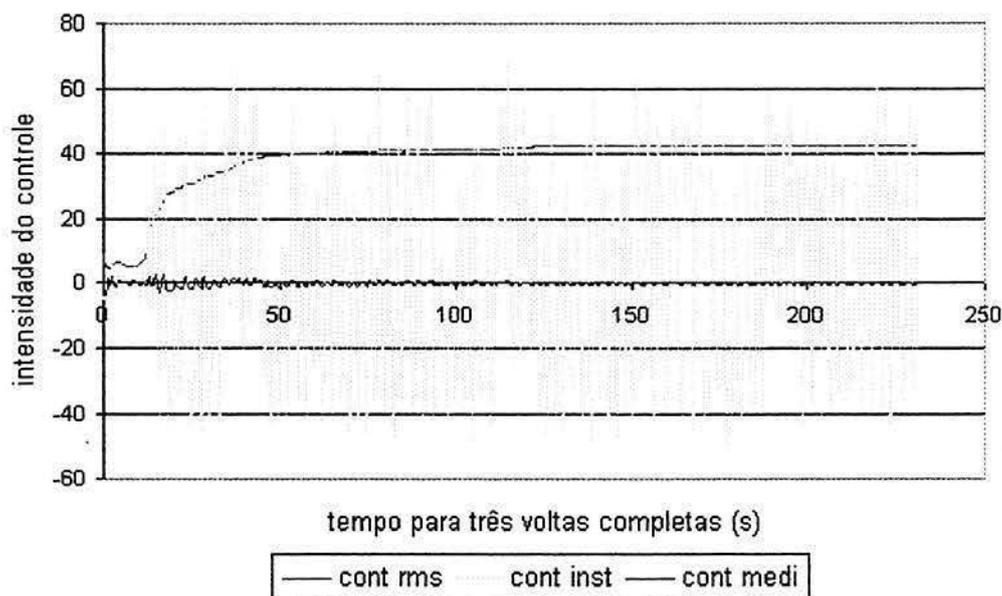


Figura 5.8 - Controle aplicado em três voltas completas ( $t_{mp}=40; P=0,5$ ).

Este sistema tende a manter os desvios mais constantes em torno do centro da pista com menos dispêndio de energia que no caso anterior. Isto se traduz num comportamento mais *suave* no deslocamento do veículo, com menores afastamentos para um ou outro lado da pista. A partir de determinado ponto, o valor eficaz mostra um comportamento praticamente constante, o que se deve a variações de erro cada vez menores.

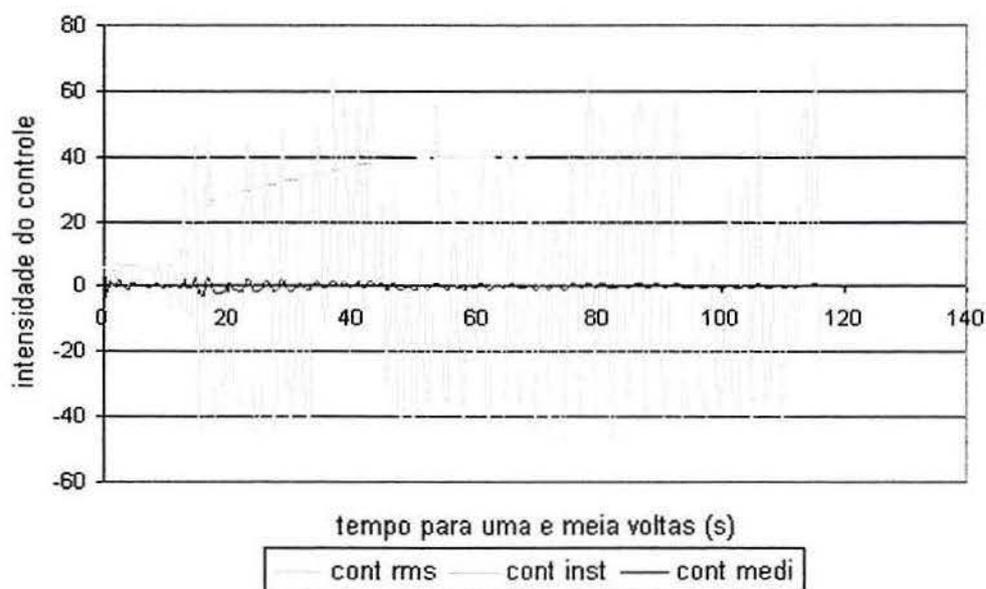


Figura 5.9 – Controle aplicado em uma e meia voltas ( $t_{mp}=40; P=0,5$ ).

Na figura 5.9 salientam-se alguns detalhes da curva anterior. Observa-se que há menos oscilações na curva de controle médio ao longo do trajeto que no caso do sistema on-off, fazendo com que se reduza o dispêndio de energia para a manutenção da trajetória do veículo.

Este sistema, embora apresente uma sensível melhora com relação ao sistema on-off, ainda deixa bastante a desejar à medida que necessitamos valores mais elevados de velocidade. Observa-se que o veículo, ao receber uma atuação de controle proporcional ao valor do erro produzido, desloca-se de forma mais *suave*, não ficando tão sujeito a correções *bruscas*. Porém, na medida que aumenta-se a velocidade, os desvios em torno da pista passam a aumentar, produzindo erros cada vez maiores. Assim, este sistema passa a ser recomendado como uma forma relativamente simples de controle onde não sejam exigidas velocidades elevadas.

### 5.3 SISTEMA PROPORCIONAL-DERIVATIVO

Este sistema atendeu de forma satisfatória o compromisso de controlar o veículo em velocidades mais elevadas, e ainda produzir deslocamento elegante. A figura 5.10 apresenta o gráfico obtido com valores de erro rms e instantâneo, referentes a esta forma de controle.

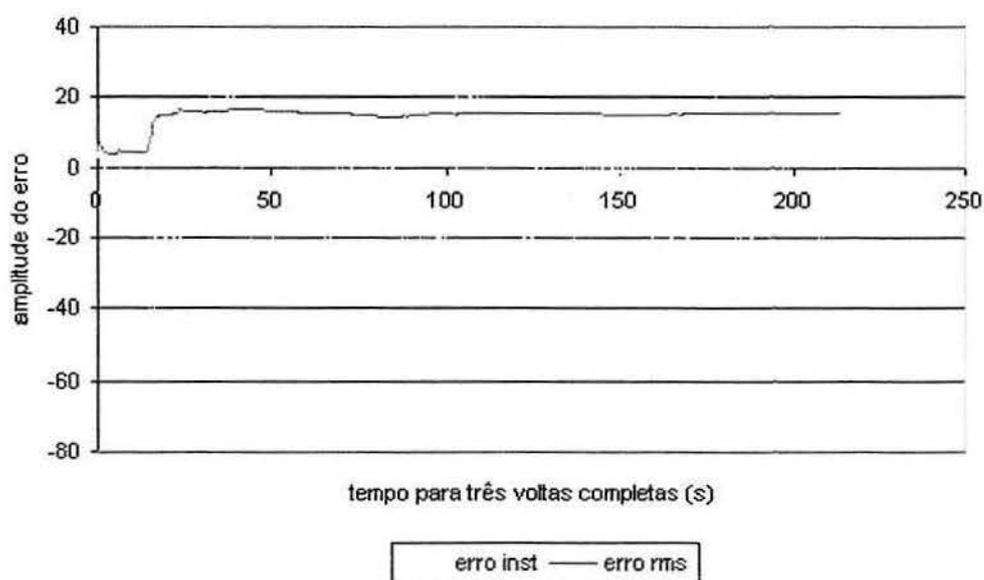


Figura 5.10 – Erro no sistema proporcional-derivativo ( $t_{mp}=40$ ;  $P=0,5$ ;  $D=5$ )

De forma análoga as anteriores, a figura 5.11 apresenta o erro médio e o erro rms, enquanto que a figura 5.12 apresenta o comportamento do controle necessário para este sistema.

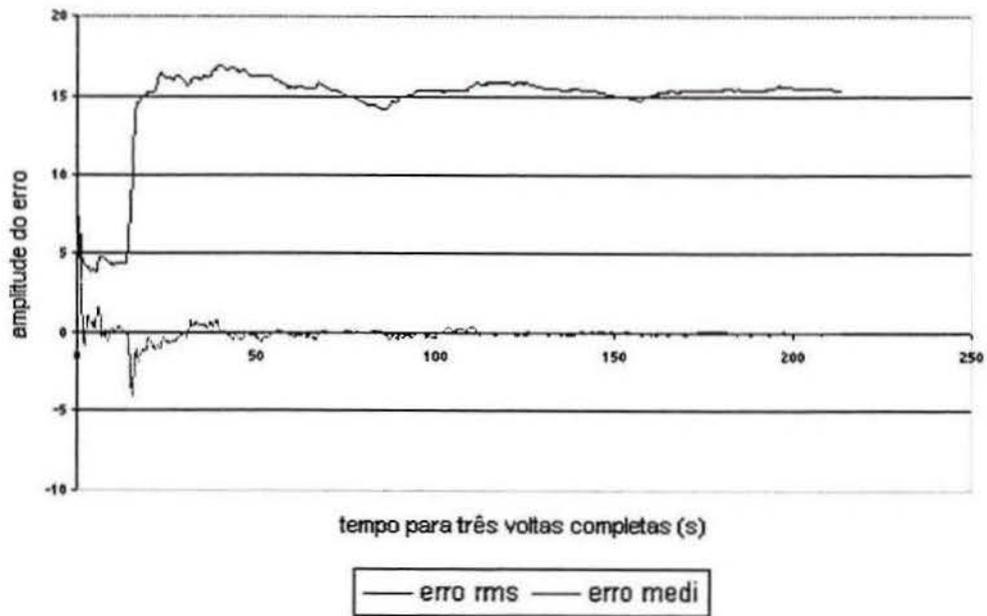


Figura 5.11 – Erro médio e rms ( $t_{mp}=40$ ;  $P=0,5$ ;  $D=5$ )

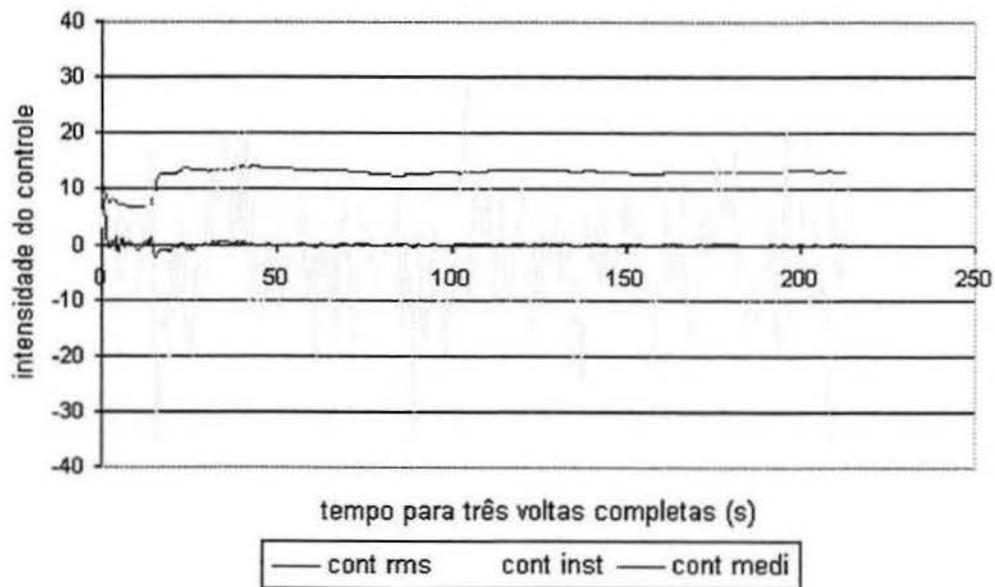


Figura 5.12 – Controle aplicado em três voltas completas ( $t_{mp}=40$ ;  $P=0,5$ ;  $D=5$ )

As curvas da figura 5.12 evidenciam o melhor rendimento apresentado por este sistema de controle, uma vez que a correção se dá continuamente e de modo *suave*, pois estamos agora trabalhando não com o erro instantâneo, ou com um valor proporcional dele, mas com um valor proporcional a sua derivada, o que resulta em atuações mais justas em torno do centro da pista.

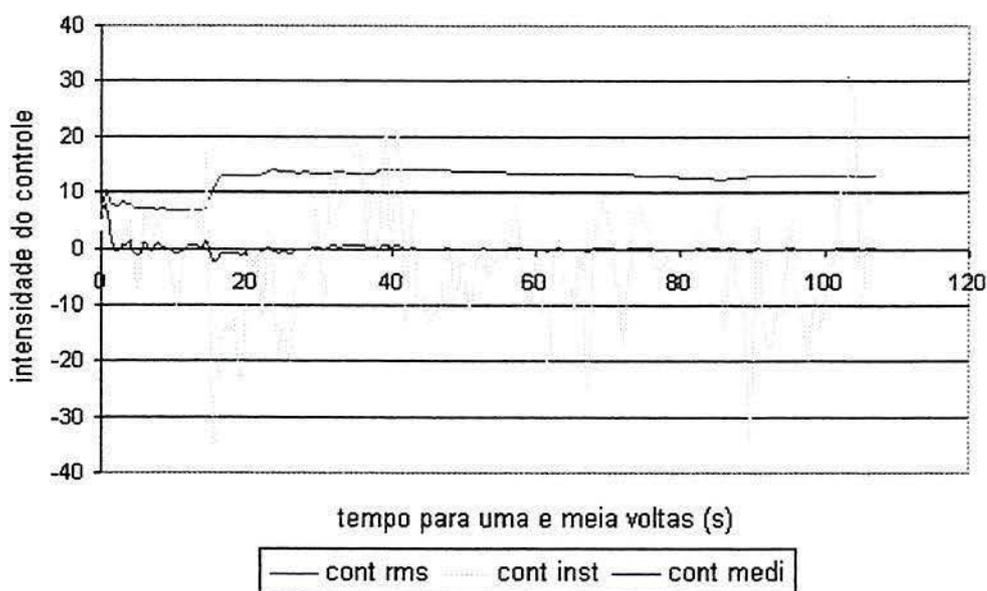


Figura 5.13 – Controle aplicado em uma e meia voltas ( $t_{mp}=40$ ;  $P=0,5$ ;  $D=5$ )

A figura 5.13 mostra mais detalhes da curva de controle anterior para uma volta e meia na pista. Observa-se uma razoável simetria com menores afastamentos do centro da pista, associado a uma redução do consumo de energia dos motores para a correção de trajetória.

#### 5.4 COMPARAÇÃO ENTRE DIVERSAS CONDIÇÕES

Na figura 5.14 mostra-se o resultado da comparação entre condições de velocidades diferentes para o mesmo valor de ganho, no sistema proporcional-derivativo.

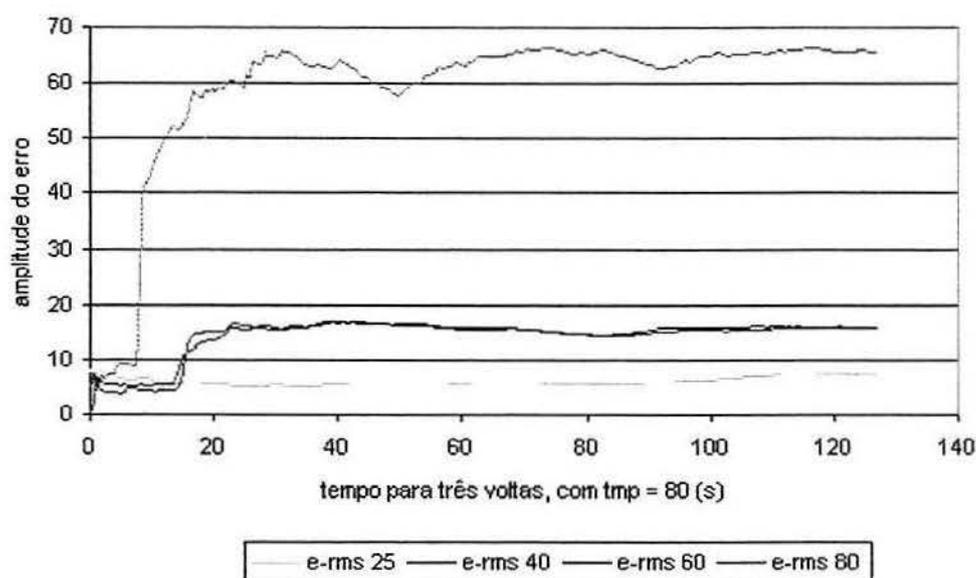


Figura 5.14 – Erro gerado em diferentes condições de velocidade (tmp=25, 40, 60 e 80)

Nesta figura foram registrados os valores rms do erro produzido num espaço de tempo equivalente a três voltas completas na pista, utilizando velocidade tmp=80, pois esta gera o menor tempo necessário para completar o percurso. Como se percebe, o maior erro é gerado a partir do maior valor de velocidade, sendo necessário uma maior atuação do controle, conforme pode ser visto na figura 5.15. No caso de uma escolha para dada aplicação, em velocidades baixas temos uma pequena atuação do controle. Em velocidades entre 40% e 60% do ciclo ativo do PWM temos um desempenho praticamente igual em relação ao erro gerado e o controle necessário. Para o extremo superior de velocidade, as condições de erro e controle já se tornam bastante expressivas, devido à inércia da planta. Em velocidades de 40 e 60 a inércia é pouco significativa.

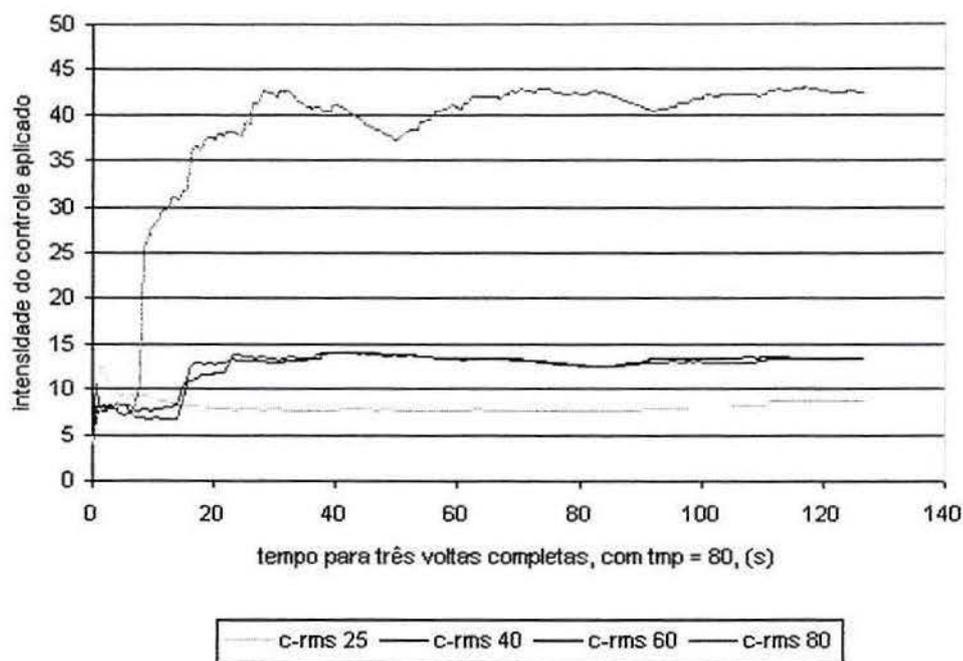


Figura 5.15 – Controle aplicado em diferentes velocidades (tmp=25, 40, 60 e 80)

A figura 5.16 mostra uma comparação do erro eficaz produzido em cada um dos três sistemas, considerando-se uma velocidade de tmp=40 e três voltas completas em torno da pista. Como se percebe, o menor erro é produzido com o sistema proporcional-derivativo (e-pd 40), seguido do proporcional (e-prop 40). O maior erro foi alcançado pelo sistema on-off (e-of 40).

De forma análoga, a figura 5.17 mostra a atuação do controle necessário em cada um dos três sistemas, nas condições do erro gerado da figura 5.16.

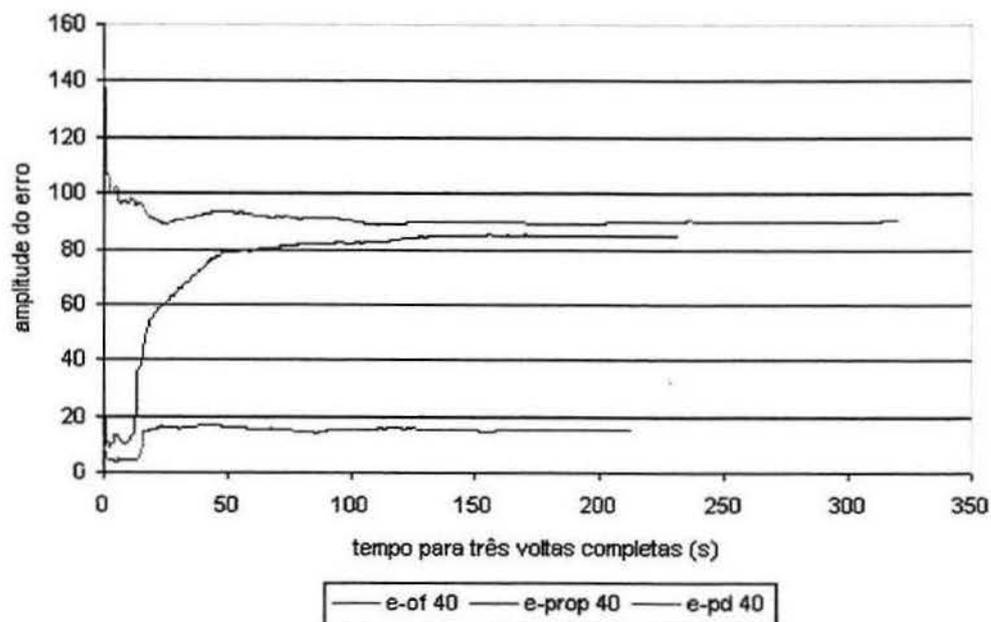


Figura 5.16 – Erro produzido entre os três sistemas.

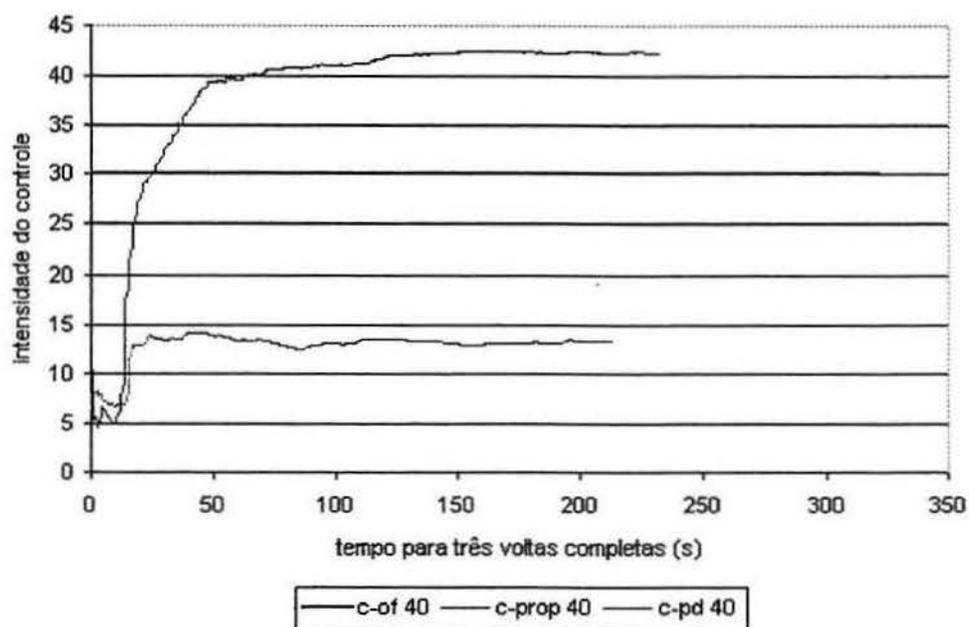


Figura 5.17 – Atuação do controle nos três sistemas.

Embora o erro produzido seja maior para o sistema on-off, a figura 5.17 mostra que o sistema que exige mais energia na atuação do controle é o proporcional. Isto se deve aos maiores desvios que este sistema apresenta em torno do centro da pista. Também observa-se que para um controle constante no sistema on-off é necessário um maior tempo para percorrer-se todas as três voltas. O sistema PD é o que apresenta a menor condição de erro com a menor atuação do controle, apresentando um desempenho mais satisfatório devido a sua atuação preditiva de controle, conforme já abordado no item 3.4.4.

## 5.5 ANÁLISE DE OPERAÇÃO AUTÔNOMA DO AGV

Considerando as condições apresentadas no item 4.4, fez-se a observação visual do desempenho do AGV. Não foi realizada a coleta de dados como anteriormente pois a conexão com o PC foi desfeita.

Observou-se que o desempenho do veículo foi satisfatório para atender condições de estudo e mesmo de aplicação em atividades industriais, mantendo a trajetória sob controle em qualquer situação.

Contrariando as expectativas, não houve redução do tempo de resposta com a retirada da conexão serial com o PC. O tempo inclusive aumentou. Quando o PC fazia o controle, eram realizadas em torno de 270 correções de trajetória por segundo, o que já estava muito acima da limitação eletrônica do circuito. Quando o controle foi implementado no 8051, todos os cálculos matemáticos que antes eram feitos no PC, passaram a ser feitos no próprio 8051. Assim, o tempo de resposta ganho com a retirada da conexão serial, foi substituído pelo tempo necessário para realizar os cálculos matemáticos. Fazendo alguns testes mais apurados, foi possível verificar que os cálculos matemáticos demoram mais para serem executados do que o tempo da transmissão serial. A versão autônoma realiza em torno de 150 correções de trajetória por segundo. Assim, ambos os sistemas trabalham de forma equivalente em termos de tempo, já que eletronicamente são realizadas no máximo 100 "correções de potência" por segundo.

Apesar de simples, os cálculos matemáticos tornaram-se demorados devido ao fato de utilizarem “ponto flutuante” (números com vírgula). Como o 8051 é um processador de 8 bits e não possui instruções de “ponto flutuante” implementadas em hardware, o compilador é obrigado a gerar enormes códigos que simulam as operações, decompondo-as em uma sequência (as vezes longa) de operações mais simples.

Também a limitação de resposta do PWM (100 Hz) e a própria inércia do sistema mecânico impossibilitam a obtenção de um controle mais imediato. Some-se a isto o fato de que o PWM só poderá atuar ao final de um período completo (10 ms), independente do número de amostras obtidas neste intervalo de tempo.

## 6. DIFICULDADES ENCONTRADAS

Neste capítulo serão abordados os diversos problemas e dificuldades encontrados ao longo do trabalho realizado com o AGV, desde sua fase inicial até a fase final de coleta de dados e comparação dos diversos sistemas de controle utilizados.

Considerando o porte do veículo, a primeira dificuldade foi o espaço físico necessário para elaboração de uma pista de teste adequada que permitisse a realização dos testes propostos. A pista utilizada possui aproximadamente 15,2 m de comprimento com largura em torno de 3,0 m, o que já dá uma idéia da área necessária. Além disso, deve possuir espaço suficiente para uma rápida mudança de layout, uma das características que deve ser explorada nesse sistema. Como o sistema proposto possui caráter didático, foi utilizado um espaço no Laboratório de Máquinas Elétricas do curso de Engenharia Elétrica da UNISINOS.

Também foram constatados problemas de acoplamento mecânico entre os eixos dos motores de tração e as rodas. O sistema de trava utilizado nas rodas, por meio de parafusos, possuía uma área de apoio muito pequena, criando uma folga na roda que aumentava a medida que o veículo se deslocava, dificultando a correção da trajetória. Após detalhado estudo dessa parte mecânica, foi construído um sistema de fixação que atravessou os eixos da roda e do motor, criando uma condição mais rígida de fixação.

Na parte de acionamento, havia o problema de como fazer o veículo se deslocar até o ponto de teste e pará-lo em seguida, para depois novamente fazê-lo se deslocar sem que para isto fosse necessário estar próximo do veículo, acionando alguma chave liga-desliga,

até porque na maioria das vezes era necessário estar longe do veículo realizando algum tipo de monitoramento. A solução encontrada foi um sistema de chaveamento via radiofrequência, onde um pequeno transmissor na faixa de 300 MHz emite um sinal para o receptor instalado no veículo, que por sua vez aciona a alimentação dos motores e dos circuitos de controle.

Com relação aos sensores, houve problema de diferenças de ganho, o que ocasionava níveis de leituras bastante diferenciados para posições simétricas em relação a faixa central da pista. Inicialmente foi adotada a correção via hardware, realizando ajustes de ganho nos canais de sensoriamento esquerdo e direito, até que fosse obtido o equilíbrio das leituras. Posteriormente foi adotada a correção via software, onde um determinado valor para a correção de offset foi acrescentado para um dos canais, fazendo com que fosse mantido a simetria das leituras em relação ao centro da pista.

Após a satisfação de ver resolvida esta etapa, onde a maioria dos testes eram realizados durante à noite, foi deixado para o dia seguinte uma verificação dos resultados obtidos. O dia seguinte apresentava uma bela irradiação solar e o teste foi um desastre, pois os sensores não mais conseguiam acompanhar a trajetória da pista. Constatamos, então, que havia saturação do sinal recebido pelo circuito de IR, que era sensibilizado não apenas pelos sinais desse comprimento de onda, mas por uma ampla gama vindos do sol. Passamos, então, a trabalhar num filtro mecânico que permitisse apenas a leitura dos sinais emitidos na faixa de frequência desejada, e que portanto pudessem ser controlados.

Outra situação surgiu quanto a transferência dos dados do programa do micro para o kit. Inicialmente havia somente um cabo que transferia os dados via RS232 do micro para o kit, e que depois era desligado. Assim o veículo possuía autonomia de controle para seu deslocamento, baseado no programa carregado no kit. Como havia interesse em testar diversos sistemas de controle, foi feita uma conexão via porta serial entre o micro e o kit, de modo que qualquer método de controle pudesse ser alterado no micro e transferido rapidamente para o kit. Porém, sempre que necessário, pode-se desligar a conexão, deixando o kit com um programa específico de controle.

Outro aspecto importante é a linearidade da resposta do motor, abordada no capítulo 3 (equação 3.18). No capítulo 3 é explicada a solução encontrada para que o motor tivesse uma resposta mais linear, de modo que uma variação de duas vezes na variável de controle da velocidade, representasse realmente um aumento linear de duas vezes na velocidade dos motores.

Foi tentada a implementação do controle extremal, que é um tipo de controle adaptativo, ou seja, capaz de se adaptar às condições do ambiente em que estiver realizando o controle. O procedimento utilizado é aparentemente simples: um valor da posição atual é armazenado enquanto o veículo está em movimento. A seguir, aplica-se um “passo de teste”, que consiste num acréscimo à variável controlada, e volta-se a medir o valor da nova posição atual. Este novo valor é comparado com o valor anteriormente armazenado. O resultado dessa comparação é utilizado para imprimir (ou não) uma correção ao sistema.

No caso do AGV, se o resultado da comparação for zero, o sistema não requer correção. Se for maior que zero, indica que está havendo desvio para um dos lados, enquanto que se for menor que zero, o desvio está ocorrendo para o lado oposto. O passo de teste deve ser realizado de modo permanente e periódico a fim de produzir a reação de controle necessária, e da forma mais imediata possível.

Embora aparentemente simples, a implementação desse sistema no AGV apresentou algumas dificuldades. Em condições de velocidade bem baixa (próxima do limite inferior de velocidade) e pista plana, foi possível aplicar uma condição adaptativa, porém sua aplicação ficou limitada pelo desempenho semelhante ou melhor dos outros sistemas estudados. Em velocidades mais elevadas, o controle adaptativo mostrou-se incapaz de corrigir os desvios na trajetória do veículo, uma vez que a inércia do veículo é muito grande frente ao tempo de aplicação do passo de teste. Assim, ao ser constatado a necessidade de correção, a inércia própria do veículo produz uma reação muito lenta no controle. Quando novos passos de teste estão sendo aplicados, o controle de correção anterior ainda não surtiu efeito.

Além disso, em pontos da pista onde existe curva, a situação é ainda mais grave. Se a curva for, digamos, para a esquerda, a tendência do veículo é sair para a direita, tangente à curva. Aplica-se, então, o passo de teste e compara-se com a posição anterior. Como o veículo está saindo para a direita, o sistema deve corrigir para a esquerda. Como o tempo de reação é grande demais em relação ao passo de teste, o veículo afasta-se cada vez mais para a direita, e não consegue mais retornar à pista. Devido a estas limitações, não foi dada sequência a implementação desse sistema.

## 7. CONCLUSÕES, SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados alcançados fornecem uma boa referência para definições em termos de escolha do tipo de controle mais adequado para uma dada aplicação em AGV's. O registro dos estudos desenvolvidos pode levar a indicação de novas variáveis que permitam um melhor aproveitamento dos sistemas dentro de uma aplicação mais ampla, onde cada parte dessa atividade possa ser implementada de forma mais otimizada.

No início do trabalho, houve uma certa dificuldade para se definir quais as condições de teste mais adequadas e mais significativas em termos de velocidade do veículo, formato de pista, tipo de controle a ser implementado, entre outras. Após os resultados obtidos, vemos que as condições de *erro* e *controle* observadas são bastante satisfatórias para indicar a utilização de um ou de outro sistema de controle, servindo, efetivamente, como referência para definições futuras.

Desse modo, uma avaliação do gráfico da figura 5.14, onde vê-se o *erro* eficaz produzido em diferentes velocidades, indica que um *erro* elevado necessita uma intensa ação de *controle*, como pode ser visto na figura 5.15. Como consequência imediata, temos um maior consumo e energia para o sistema, o que se reflete numa redução da vida útil da bateria que aciona o AGV.

Também, para as estas mesmas condições de *erro* e *controle*, as partes mecânicas do veículo são mais exigidas e expostas a condições de ação mais severas, produzindo desgastes prematuros, folgas, fadiga do material, etc. .

Embora após algum tempo, com erros eficazes elevados, o veículo tenda a manter a trajetória para qualquer das ações de controle estudadas, como indicado na figura 5.16, é importante salientar que isto é obtido a custa de uma grande exigência de energia dos motores, como pode ser observado pelo gráfico da figura 5.17. Também, conforme o tipo de ação escolhida, necessita-se de um maior ou menor tempo para a realização do número de voltas indicado nesta figura, pois os desvios produzidos em torno da linha de referência podem ser maiores ou menores, em função da ação pretendida.

Algumas limitações, como o tempo de resposta dos motores, que retardam a reação do sistema ao erro, podem ser melhoradas com a escolha mais específica e seletiva dos componentes utilizados.

Uma melhor linearização da resposta dos motores pode ser alcançada aplicando-se uma realimentação individual a cada um, o que aumentaria a capacidade final de reação do sistema ao *erro*.

Na operação autônoma seria importante considerar a capacidade do processador e também a otimização do software para permitir um melhor desempenho do AGV.

Ainda neste tipo de operação sugere-se que haja sempre a possibilidade de acompanhar, via comunicação serial com um PC, o sinal de erro. Pelo menos seria recomendável esta prática na fase de ajuste dos parâmetros de controle que serão fixos para cada robô.

Outros sistemas podem ser implementados a partir dos resultados aqui contidos, levando-se em conta que este AGV apresenta apenas deslocamentos horizontais, sendo mais adequado às tarefas que não requeiram velocidades elevadas.

Algumas sugestões sobre a aplicação final podem ser observadas. A geração de um link de comunicação entre o AGV e uma unidade controlada por operador (ou mesmo automatizada), permitiria a realização de tarefas bastante específicas. Assim, poderiam ser

criados diversos pontos (ou postos) ao longo da trajetória a ser percorrida, identificados por meio de codificação óptica, que fizessem parte de uma etapa qualquer da linha de produção de determinado produto. Por exemplo, cada vez que o AGV identificasse determinado setor via código de barras impresso no chão, a uma certa distância do ponto de identificação do setor considerado, enviaria uma mensagem a um controle central e estacionaria naquele setor, aguardando novas instruções. Esta forma de operação facilitaria o gerenciamento de AGVS, onde vários veículos podem estar operando, de forma simultânea e racionalizada, em vários pontos de uma linha de produção.

Também algumas outras formas de sensoriamento e sinalização podem ser implementadas, como sensores de obstáculos por ultra-som ou IR, câmeras de vídeo que gerem imagens das condições do ambiente, alertas sonoros de proximidade (de pessoas, obstáculos ou outros AGV's), pontos de recarga para o sistema de baterias, além de outros. Desse modo, seria possível realizar operações de pesquisa e coleta de dados em ambientes insalubres com um grau de segurança adequado à necessidade. Um controle de reversão dos motores pode ser bastante útil em diversas situações.

É importante, ainda, observar o aspecto didático do veículo, que já tem sido utilizado em disciplinas de Controle para o curso de graduação em Engenharia Elétrica da UNISINOS. Nessas aulas, os alunos podem entrar em contato direto com objeto do estudo, verificando as diversas formas de aplicação de controle e de imediato observar as reações produzidas. Além disso, os alunos se sentem estimulados a desenvolver novas formas de estudo para controlar as reações do veículo, uma vez que os cálculos envolvidos não se tornam abstrações, podendo de imediato ser comprovada a eficácia de cada novo método proposto.

É também oportuno salientar a possibilidade de se fazer um *controle adaptativo* (controle moderno), a partir da variação dos parâmetros de ganho ( $K_P$ ,  $K_I$ , etc.), de forma dinâmica. Desse modo, pode-se implantar outras formas de veículos que se adaptem a diferentes tipos de atividades.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AES-51 COMPUTER EMBEDDED CONTROLLER, User's Manual. Advanced Educational Systems. 1996. USA.
- [2] BARTHOLDI, J.J.; PLATZMAN, L.K., 1989. Decentralized Control of Automated Guided Vehicles on a Simple Loop. IIE Transactions, vol. 21, no. 1, pp. 76-81.
- [3] CO, C.G.; TANCHOCO, J.M.A., 1991. A Review of Research on AGVS Vehicle Management. Engineering Costs and Production Economics, vol. 21, pp. 35-42
- [4] D'AZZO, John J.; HOUPIS, Constantine H.. Linear Control System Analysis and Design – Conventional and Modern. McGraw-Hill. 1995. USA.
- [5] DISTEFANO, Joseph J.; STUBBERUD, Allen R.; WILLIAMS, Ivan J.. Sistemas de Retroação e Controle. McGraw-Hill. 1981. São Paulo.
- [6] DOEBELIN, Ernest O. Measurement System. Application and Design.. McGraw-Hill. International Edition. 1990. Singapore.
- [7] EGBELU, P.J.; TANCHOCO, J.M.A., 1984. Characterization of Automatic Guided Vehicle Dispatching Rules. International Journal of Production Research, vol. 22, no.3, pp. 359-374.
- [8] FRANCO, Sergio. Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits. McGraw-Hill. 1988. USA.
- [9] GASKINS, R.J.; TANCHOCO, J.M.A., 1987. Flow Path Design for Automated Guided Vehicle Systems. International Journal of Production Research, vol. 25, no.5, pp. 667-676.
- [10] JOSHI, S. B.; WYSK, R.A.; JONES, A., 1990. A Scaleable Architecture for CIM Shop Floor Control. Proceedings of CIMCON '90, A. Jones Ed., National Institute of standards and Technology, May, pp. 21-33.

- [11] MALVINO, Albert Paul. Microcomputadores e Microprocessadores. McGraw-Hill. 1985. São Paulo.
- [12] MAXWELL, W.L.; MUCKSTADT, J.A., 1982. Design of Automatic Guided Vehicle Systems. IIE Transactions, vol. 14, no. 2, pp. 114-124.
- [13] NATIONAL SEMICONDUCTORS, National Operational Amplifier Databook. 1995. USA.
- [14] OGATA, Katsuhiko. Engenharia de Controle Moderno. Prentice Hall do Brasil. 1997. Rio de Janeiro.
- [15] OZDEN, M., 1988. A Simulation Study of Multiple-Load-Carrying Automated Guided Vehicles in a Flexible Manufacturing System. International Journal of Production Research, vol. 26, no. 8, pp. 1353-1366.
- [16] PERTENCE, Antonio Jr. Amplificadores Operacionais e Filtros Ativos. Makron Books. 5ª Edição. 1996. São Paulo.
- [17] PETERS, Brett A.; SMITH, Jeffrey S.; VENKATESH, S.. A Control Classification of Automated Guided Vehicle Systems. Department of Industrial Engineering – Texas A&M University. 1998. USA.
- [18] RS, 1998 Catalogue. RS Group Companies. 1998. United Kingdom.
- [19] RUSSELL, R.S.; TANCHOCO, J.M.A., 1984. An Evaluation of Vehicle Dispatching Rules and Their Effect on Shop Performance. Material Flow, vol. 1, pp. 271-280.
- [20] SEDRA, Adel S.; SMITH, Kenneth C.. Microelectronics circuits. Oxford University Press. 1997. USA.
- [21] SILVA JÚNIOR, João Manuel Gomes da; BAZANELLA, Alexandre Sanfelice. Ajuste de controladores PID. Curso de Extensão. Departamento de Engenharia Elétrica. UFRGS.
- [22] SILVA JÚNIOR, Vidal Pereira da. Aplicações práticas do microcontrolador 8051. Editora Érica Ltda. 1999. São Paulo.
- [23] SINRIECH, D.; TANCHOCO, J.M.A., 1991. Intersection Graph Method for AGV Flow Path Design. International Journal of Production Research, vol. 29, no. 9, pp. 1725-1732.
- [24] SINRIECH, D.; TANCHOCO, J.M.A., 1992. An Economic Model for Determining AGV Fleet Size. International Journal of Production Research, vol. 30, no. 6, pp. 1255-1268.

- [25] SMITH, J. S.; HOBerecht, W.; JOSHI, S.B., 1992. A Shop Floor Control Architecture for Computer Integrated Manufacturing. IMSE Working Paper Series, Pennsylvania State University.
- [26] TEXAS INSTRUMENTS, Linear Circuits – Operational Amplifiers. Databook Vol.1. 1992. USA.
- [27] TOBEY, G. E.; GRAEME, J. G.; HUELSMAN, L. P. Operational Amplifiers – Design and Applications. MacGraw-Hill. 1989. Singapore.

## ANEXOS

Em anexo são apresentados os diagramas em blocos do kit utilizado, AES-51. Foram destacadas as partes realmente utilizadas. Segue uma descrição dos blocos, salientando a sua utilização no presente trabalho.

Ao final são apresentados os programas de controle utilizados, com alguns comentários, tanto no modo com o PC conectado, quanto no modo autônomo. Também foram acrescentados alguns gráficos detalhando o comportamento dos sinais dos sensores que irão compor o sinal de erro  $e(t)$

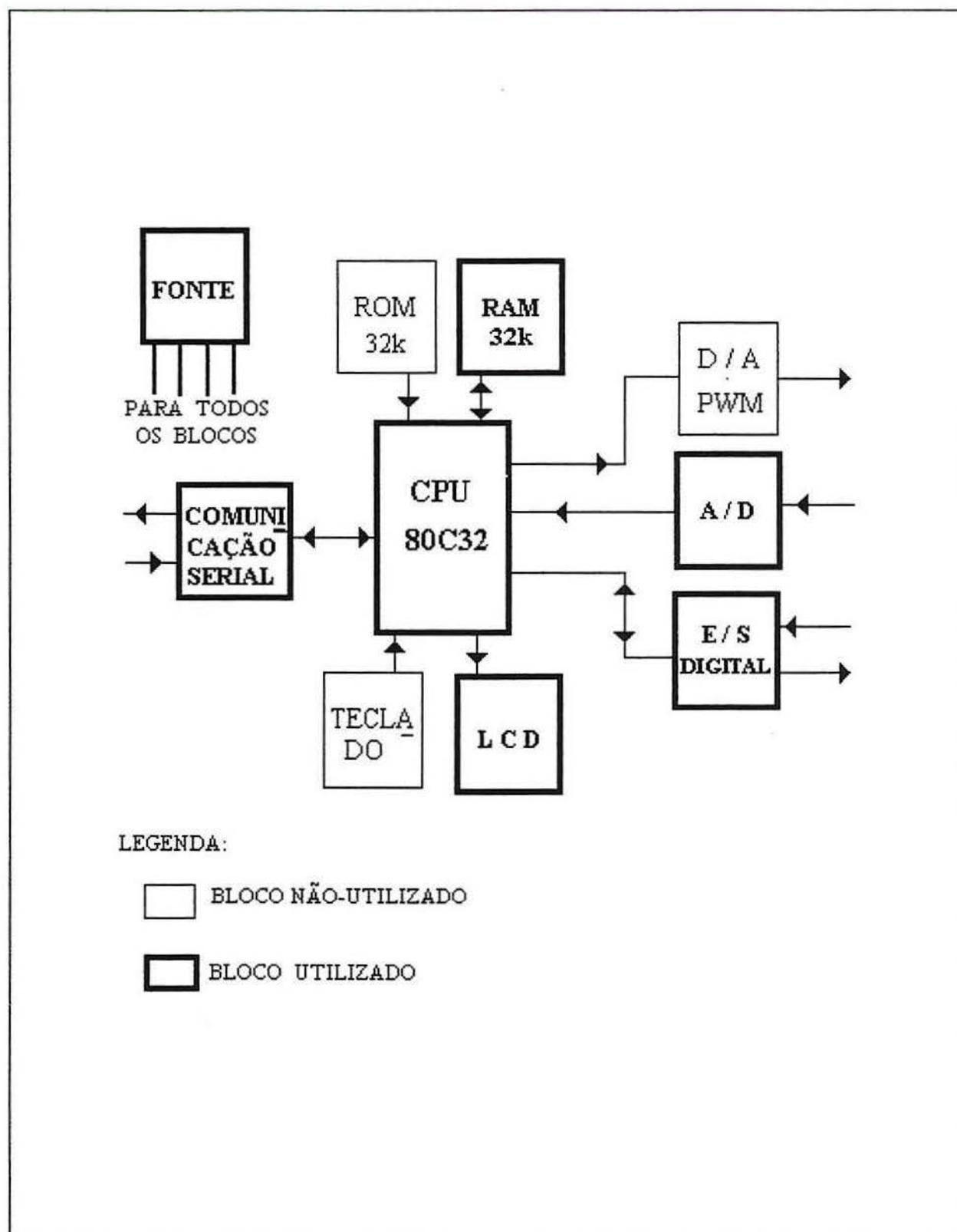


Figura A.1 – Diagrama de blocos do kit AES-51

## DESCRIÇÃO DOS BLOCOS FUNCIONAIS DO KIT AES-51

### 1. FONTE:

É composta de um regulador de tensão e um circuito a bateria, que mantém a RAM de 32 Kbytes energizada mesmo quando o kit não está alimentado.

*Utilização no projeto:*

Mantém o kit funcionando durante os testes.

Mantém o software de controle na memória do kit, mesmo com o circuito desligado.

### 2. ROM 32K:

É uma memória não volátil que contém todo firmware do kit, rotinas de teclado, controle do LCD, AD e DA, monitor assembler, etc.

*Utilização no projeto:*

Foi utilizado apenas a rotina de STARTUP do kit, que configura todo hardware, e o monitor assembler (para poder executar o software de controle do AGV a partir da RAM de 32k).

### 3. RAM 32K:

É uma memória volátil, que mantém em seu interior os softwares do usuário, que serão executados no kit. No modo monitor assembler, ela é apenas a RAM de dados do 80C32 (como em qualquer arquitetura padrão 8051), porém quando passamos do modo monitor para o modo execução, a mesma passa a se comportar como um SHADOW ROM (ROM Mascarada).

*Utilização no projeto:*

Foi usada para armazenar e executar todo o programa de controle do AGV - não é utilizada como memória de dados, apenas como memória de programa.

#### **4. CONVERSOR ANALÓGICO-DIGITAL (A/D):**

É um bloco composto de um ADC0804, que é um conversor A/D de saída paralela de 8bits, com tempo de conversão de 100 us e 1 canal . O conversor esta mapeado como I/O em endereço de memória.

##### *Utilização no projeto:*

Converte os dados provenientes dos sensores infravermelhos (analógicos) em uma informação capaz de ser manipulada pelo 80C32 (dado digital de 8bits - byte).

Como o conversor A/D possui apenas 1 canal, e existem 2 sensores que precisam ser lidos, foi utilizado um multiplexador analógico na entrada do conversor A/D. O estado do multiplexador é controlado pelo microcontrolador.

#### **5. CONVERSOR DIGITAL-ANALÓGICO PWM (D/A).**

O kit possui um conversor D/A PWM, com a saída ligada a um filtro passa-baixa, de modo a se obter uma tensão contínua proporcional ao ciclo-ativo do PWM.

##### *Utilização no projeto:*

Não foi utilizado devido a varias limitações técnicas:

- Possui apenas 1 canal;
- Quando ativado, utiliza recursos do microcontrolador que devem estar disponíveis ao software de controle do AGV para o mesmo poder operar.

Com base nisso, decidiu-se implementar um PWM próprio, mais versátil, 2 canais, que não utilize recursos que conflitam com o software de controle do AGV (já que o PWM é parte integrante do mesmo)

#### **6. ENTRADAS/SAIDAS DIGITAIS:**

São no total 10 bits, que podem ser acionados independentemente pelo microcontrolador. Todos os bits podem funcionar como entrada ou saída.

##### *Utilização no projeto:*

No projeto, foram utilizados apenas 3 bits, todos funcionando como saídas.

2 BITs foram utilizados como saídas dos PWMs que controlam a velocidade dos motores de corrente contínua. Existem 2 PWM (1 por motor).

1 BIT foi utilizado para controlador o multiplexador:

Quando a saída está em nível lógico 0 (0V), o multiplexador conecta o A/D ao canal direito.

Quando a saída esta em nível lógico 1 (5V), o multiplexador conecta o A/D ao canal esquerdo.

## **7. DISPLAY DE CRISTAL LIQUIDO:**

É um display alfanumérico, de 32 colunas e 2 linhas. É todo controlado pelo microcontrolador.

*Utilização no projeto:*

Foi utilizado para mostrar o valor instantâneo do PWM direito, do PWM esquerdo, do dado lido no sensor direito e do dado lido no sensor esquerdo. Também foi colocado indicador de software em execução, que consiste na letra "R" piscando no canto superior esquerdo.

Não é um componente de vital importância no funcionamento do AGV, podendo ser removido sem causar alteração alguma no funcionamento do software de controle do AGV.

## **8. PORTA SERIAL:**

É uma porta padrão RS232C, com velocidade (BAUD RATE) ajustável via software. A velocidade pode ser ajustada entre 110 bps a 9600 bps. Não possui controle de fluxo por hardware (CTS/RTS) e o controle de fluxo por software (XON/XOFF) não foi implementado.

*Utilização no projeto:*

É utilizada para transmitir a os dados lidos pelo kit para o microcomputador.

É utilizado para transmitir o valor dos PWMs para o kit. O valor dos PWMs são determinados pelo software de controle, baseado na informação enviada pelo kit referente ao sensores.

Setup da porta serial no projeto:

BAUDRATE: 9600

BITs de dados: 8

BITs de parada: 1

**9. TECLADO:**

É composto de uma matriz de 4x5 (20 teclas). A matriz pode ser lida pelo kit a qualquer momento.

*Utilização no projeto:*

Não foi utilizado pelo software de controle do AGV.

É utilizado apenas quando o kit esta em modo monitor para iniciar a execução do software de controle do AGV.

## **PROGRAMAS UTILIZADOS**

## LISTAGEM COMENTADA DO PROGRAMA DE CONTROLE DO AGV

DECLARE FUNCTION onoff! (erro!): *Esta função realiza o controle do AGV no modo ON-OFF*

DECLARE SUB atuador (controle!): *Esta função recebe como parâmetro a variável controle. A seguir, calcula o PWM1 e o PWM2, e os envia para o microcontrolador, que aciona os motores*

DECLARE FUNCTION sensor! (): *Esta função envia para o microcontrolador o comando para o mesmo enviar o resultado da conversão AD dos sensores direito e esquerdo. A seguir executa a conformação do sinal (corrige as "deformações" na função de transferência dos mesmos -ÓCULOS)*

DECLARE FUNCTION inicgraf! (p1 AS STRING, p2 AS STRING, p3 AS STRING, p4 AS STRING): *Esta função é responsável pela inicialização do modo gráfico e o desenho dos eixos cartesianos (X,Y)*

DECLARE FUNCTION graf! (x!, c1!, c2!, c3!, c4!): *Esta função desenha os pontos nos gráficos delimitados pelo eixos cartesianos, que foram desenhados pela função "inicgraf!"*

DECLARE FUNCTION controlador! (erro!): *Esta função implementa o controle proporcional-integral-derivativo. Ela recebe como parâmetro o valor da variável erro!*

METRO = 0 : *Inicializa a variável que contém a distância percorrida pelo AGV*

tmp = 40 : *Valor absoluto da velocidade média (0-100%)*

VelMedia = (tmp / .4918) ^ (1 / 1.206): *Valor linearizado da velocidade média (fonte tmp)*

OPEN "COM2:9600,N,8,1,BIN,CD0,CS0,DS0,OP1,RS,TB512,RB512" FOR RANDOM AS #1:

*Inicializa a porta serial do PC: Configura a mesma da seguinte forma: 9600 Bits por segundo, 8 bits de dados, 1 bit de parada, sem controle de fluxo (apenas 3 fios necessarios para comunicação (transmissão, recepção, terra). Buffer de recepção e de transmissão setados em 512 bytes.*

delta = 0: *Inicializa a variável delta*

a = inicgraf("erro", "controle", "vd-ve", "vd+ve"): *Manda para a função que inicializa o modo gráfico e desenha os eixos cartesianos. O nome do gráfico é passado como parâmetro para a função.*

INI:

FOR x = 6 TO 635 *Loop Principal*

a\$ = INKEY\$ *Lê o teclado*

IF a\$ <> "" THEN *Se nenhuma tecla for pressionada("") segue para LABEL01*

IF a\$ = "a" THEN tmp = tmp + 5: VelMedia = (tmp / .4918) ^ (1 / 1.206):

*Se a tecla a for pressionada aumenta a velocidade média absoluta em cinco unidades e em seguida lineariza a mesma*

IF a\$ = "d" THEN tmp = tmp - 5: VelMedia = (tmp / .4918) ^ (1 / 1.206):

*Se a tecla d for pressionada diminui a velocidade media absoluta em cinco unidades e em seguida lineariza a mesma*

IF a\$ = "x" THEN END : *Se a tecla x for pressionada, termina a execução do programa*

```

END IF
LABEL01:
  IF tmp < 0 THEN tmp = 0:           Impede que a variável tmp assuma valores negativos: -
> SE tmp<0 ENTÃO tmp=0
  erro = sensor :                   Faz com que o erro seja igual a soma da variável
sensor
  a = graf(x, erro, controle, vd - ve, vd + ve): Desenha os pontos na tela da seguinte forma:
  COLUNA = x
  primeiro gráfico = ERRO           Segundo gráfico = CONTROLE
  Terceiro gráfico =VD - VE         Quarto Gráfico = VD+VE

  OBS: Somente uma das 3 linhas a seguir pode estar sem comentário!
  controle = controlador(erro)      :Se esta linha não estiver comentada no início usa o controle
PID
  ' controle = onoff(erro)           :Se esta linha não estiver comentada no início usa o controle
on off
  ' controle = .5 * erro             :Se esta linha não estiver comentada no início usa o controle
proporcional
  atuador (controle)                :Chama a rotina atuador(calcula os PWMs e envia os valores
calculados para a CPU
  NEXT x                             :Volta para linha comentada como LOOP principal ate que x atinja o
valor de 635
GOTO INI                             :Pula para a linha com o nome INI

SUB atuador (controle)
Esta função recebe como parâmetro a variável controle. A seguir, calcula o PWM1 e o PWM2, e
os envia para o microcontrolador, que aciona os motores
SHARED VelMedia, pwm1, pwm2
p1 = .4918 * (VelMedia + controle) ^ 1.206 : Lineariza o valor de velmedia+controle e poe o
resultado em p1
p2 = .4918 * (VelMedia - controle) ^ 1.206: Lineariza o valor de velmedia-controle e poe o
resultado em p2
PWM1 = INT(15 + p1): Adiciona 15 (OFFSET do motor direito) a p1 e pega a parte
inteira do resultado e guarda em PWM1
PWM2 = INT(143 - 4 + p2) : Adiciona 143(OFFSET do motor esquerdo) a p2 e pega a
parte inteira do resultado e guarda em PWM2
LIMITA O PWM1 EM UM VALOR ENTRE 15 E 115
IF pwm1 < 15 THEN pwm1 = 15 : Se pwm1 < 15 entao pwm1=15
IF pwm1 > 115 THEN pwm1 = 115 : Se pwm1 > 115 entao pwm1=115
LIMITA O PWM2 EM UM VALOR ENTRE 143 E 243
IF pwm2 < 143 THEN pwm2 = 143 : Se pwm2 < 143 então pwm1=143
IF pwm2 > 243 THEN pwm2 = 243 : Se pwm2 > 243 então pwm1=243

PRINT #1, CHR$(INT(pwm1)) : Envia para o microcontrolador o valor de pwm1
PRINT #1, CHR$(INT(pwm2)) : Envia para o microcontrolador o valor de pwm2
END SUB : fim da função

```

FUNCTION controlador (erro) *Esta função implementa o controle proporcional-integral-derivativo. Ela recebe como parâmetro o valor da variável erro.*

STATIC iant, eant

GanhoP = .2 : Carrega a variável GanhoP =.2  
 GanhoD = 3 : Carrega a variável GanhoD =.3  
 GanhoI = 0 : Carrega a variável GanhoI = 0  
 p = GanhoP \* erro : Multiplica o erro pelo ganho proporcional  
 d = GanhoD \* (erro - eant) : Multiplica o ganho derivativo pela taxa de variação do erro  
 (derivada do erro)  
 i = GanhoI \* (erro + eant) + iant : Implementa o valor do ganho integral  
 IF i > 100 THEN i = 100: iant = 0 : Se o i > 100 então faz com que i=100 e iant=0  
 IF i < -100 THEN i = -100: iant = 0 : Se o i < -100 então faz com que i=-100 e iant=0

c = p + i + d : Soma os resultados dos sistemas proporcional, integral  
 e derivativo e guarda o resultado em c

eant = erro: iant = i : Faz com que erro anterior seja igual ao erro atual  
 (eant=erro):  
 controlador = c : Copia o conteúdo da variável c para variável  
 controlador  
 END FUNCTION : Fim da função

FUNCTION graf (x, c1, c2, c3, c4)

*Esta função desenha os pontos nos gráficos delimitados pelo eixos cartesianos, que foram desenhados pela função "inicgraf!"*

SHARED I1 AS STRING, I2 AS STRING, I3 AS STRING, I4 AS STRING : define variáveis a serem exportadas

SHARED g1ant, g2ant, g3ant, g4ant, delta, erro, controle, METRO, saving, tisave, Temposave, asterisco\$

STATIC esum, csum, num, erms, crms

SHARED ect1, vd, ve, pwm1, pwm2, tmp

LOCATE 1, 1: PRINT I1; " = "; INT(c1); " " : Imprime o valor do ponto desenhado no topo  
 do eixo Y do gráfico 1

LOCATE 8, 1: PRINT I2; " = "; INT(c2); " " : Imprime o valor do ponto desenhado no topo  
 do eixo Y do gráfico 2

LOCATE 15, 1: PRINT I3; " = "; INT(c3); " " : Imprime o valor do ponto desenhado no topo  
 do eixo Y do gráfico 3

LOCATE 22, 1: PRINT I4; " = "; INT(c4); " " : Imprime o valor do ponto desenhado no topo  
 do eixo Y do gráfico 4

'--- refaz eixos antigo

LINE (x, 62 - delta \* 95 / 500)-(x - 1, 62 - delta \* 95 / 500), 13 : Redesenha os eixos que foram  
 apagados na leitura anterior

LINE (x, 172)-(x - 1, 172), 13

LINE (x, 280)-(x - 1, 280), 13  
 LINE (x, 440)-(x - 1, 440), 13

LINE (x, 10)-(x, 450), 0, BF : *apaga a coluna atual*  
 LOCATE 1, 55: PRINT "vm = "; USING "##"; tmp : *Imprime a velocidade média na tela.*

'----- Graficos

g1 = 62 - (c1) \* (95 / 500) : *Põe o valor na escala do gráfico, desenha o mesmo no primeiro gráfico*

LINE (x - 1, g1ant)-(x, g1)

g1ant = g1

g2 = 172 - (c2) \* (95 / 500) : *Põe o valor na escala do gráfico, desenha o mesmo no primeiro gráfico*

LINE (x - 1, g2ant)-(x, g2)

g2ant = g2

g3 = 280 - (c3) \* (95 / 300) : *Põe o valor na escala do gráfico, desenha o mesmo no primeiro gráfico*

LINE (x - 1, g3ant)-(x, g3)

g3ant = g3

g4 = 440 - (c4) \* (90 / 512) : *Põe o valor na escala do gráfico, desenha o mesmo no primeiro gráfico*

LINE (x - 1, g4ant)-(x, g4)

g4ant = g4

END FUNCTION : *Fim da função graf*

FUNCTION inicgraf (p1 AS STRING, p2 AS STRING, p3 AS STRING, p4 AS STRING)

*Esta função é responsável pela inicialização do modo gráfico e o desenho dos eixos cartesianos (X,Y)*

SHARED I1 AS STRING, I2 AS STRING, I3 AS STRING, I4 AS STRING :

*Define variáveis exportadas*

SHARED g1ant, g2ant, g3ant, g4ant

I1 = p1: I2 = p2: I3 = p3: I4 = p4 : *Inicializa Variáveis*

g1ant = 62: g2ant = 172: g3ant = 280: g4ant = 440 : *Inicializa Variáveis*

SCREEN 12 : *Inicializa modo Gráfico*

LINE (5, 15)-(5, 110), 13: LINE (0, 62)-(635, 62), 13 : *Desenha primeiro eixo cartesiano (superior)*

LINE (5, 125)-(5, 220), 13: LINE (0, 172)-(635, 172), 13 : *Desenha segundo eixo cartesiano*

LINE (5, 235)-(5, 330), 13: LINE (0, 280)-(635, 280), 13 : *Desenha terceiro eixo cartesiano*

LINE (5, 350)-(5, 445), 13: LINE (0, 440)-(635, 440), 13 :*Desenha quarto eixo cartesiano (inferior)*

END FUNCTION :*Fim da função inicgraf*

FUNCTION onoff (erro) :*Esta função realiza o controle do AGV no modo ON-OFF*  
 IF erro > 0 THEN :*Se o erro for maior que 0 então controle=35, se menor que 0, então controle=-35*  
 controle = -35  
 onoff = 35  
 ELSE  
 onoff = -35  
 END IF  
 END FUNCTION :*Fim da função onoff*

FUNCTION sensor : *Esta função envia para o microcontrolador o comando para o mesmo*  
 :*enviar o resultado da conversão AD dos sensores direito e esquerdo, a seguir executa a conformação do sinal (corrige as "deformações" na função de transferência dos mesmos (ÓCULOS))*  
 SHARED vd, ve :*Define variáveis exportadas*  
 STATIC diffant, locked  
 STATIC b AS INTEGER

smax = 100 : smax = 0 significa sem limite

maxsum = smax

absmaxsum = 310

delta = 0

'----- Leitura dos sensores

PRINT #1, CHR\$(255) :*Envia o caracter de código 255 para a porta serial, que é o comando para o microcontrolador enviar o resultado da conversão AD. O microcontrolador envia os dados da seguinte forma:*

: *1 byte(caracter) enviado -> Canal direito*

: *2 byte(caracter) enviado -> Canal esquerdo*

a\$ = INPUT\$(1, 1) :*Lê o primeiro caracter da porta serial*

vd = INT((vd + ASC(a\$)) / 2) :*Soma o valor recém lido do canal direito com o valor da leitura anterior e divide por dois, ou seja faz a média. O considera somente a parte inteira do resultado (INT)*

a\$ = INPUT\$(1, 1) :*Lê o segundo caracter da porta serial*

*o 2.2 é a compensação pelo desequilíbrio dos sensores*

ve = INT((ve + 2.2 \* ASC(a\$)) / 2) :*Soma o valor recém lido do canal esquerdo (multiplicado por 2.2) com o valor da leitura anterior e divide por dois, ou seja faz a média. O considera somente a parte inteira do resultado (INT)*

'----- Conformação do sinal de erro

diff = vd - ve

```
sum = vd + ve
IF maxsum > 0 AND sum > maxsum THEN
  IF locked = 0 AND sum > absmaxsum THEN
    locked = 1
  END IF
  IF locked = 1 AND sum < absmaxsum - delta THEN
    locked = 0
  END IF
  IF locked = 0 THEN
    erro = diffant + SGN(diffant) * (sum - maxsum)
  ELSE
    erro = diffant + SGN(diffant) * (absmaxsum - maxsum)
  END IF
ELSE
  erro = diff
  diffant = diff
END IF

sensor = erro

END FUNCTION : Fim da função sensor
```

## SOFTWARE EM ASSEMBLER COM AS ROTINAS DE FUNCIONAMENTO

Este programa escrito em assembler contém todas as rotinas de baixo nível necessárias ao funcionamento do AGV. Contém as rotinas dos PWM's, aquisição de dados dos sensores, impressão no display, controle do teclado e configuração do hardware do AES-51.

```
IP EQU 0b8h
IE EQU 0a8h
TCON EQU 088h
TMOD EQU 089h
TH1 EQU 08Dh
TL1 EQU 08Bh
SP EQU 081h
ACC EQU 0e0h
DPH EQU 083h
DPL EQU 082h
SCON EQU 098h
SBUF EQU 099h
TI EQU 099h
RI EQU 098h
T2CON EQU 0C8h
RCAP2H EQU 0CBh
RCAP2L EQU 0CAh
B EQU 0f0h
ORG 401Bh
JMP IntHL ; instala interrupção do PWM no end. 1Bh

ORG 6000h
```

```

IntHL: PUSH 02h
        PUSH ACC           ; início do primeiro PWM
        PUSH DPH          ; salva DPTR e ACC
        PUSH DPL
        PUSH 00h
        MOV R2,20h
        INC 18H
        MOV A,18h
        CJNE A,#101,notovf
        MOV 18h,#0
        MOV A,18h
        MOV 17h,0Fh
NotOVF: SUBB A,17h
        JC R1MA
        SETB 94h
        JMP IntHLp
R1MA:  CLR 94h
IntHLp: INC 19H           ; início do segundo PWM
        MOV A,19h
        CJNE A,#101,notov1
        MOV 19h,#0
        MOV 16h,0Eh
        INC R2            ; incrementa posição do cursor
        CJNE R2,#58h,FIMP
        MOV A,#0A9H      ; põe o cursor na segunda linha
        SETB 90h
        MOV DPTR,#0fff3h
        MOVX @DPTR,A
        CLR 91h
        SETB 91h
FIMP:  CJNE R2,#69h,IMPR ; se menor que 32-69h, continua

```

```

MOV R2,#47h
MOV A,#80H           ; põe o cursor na primeira linha
SETB 90h
MOV DPTR,#0fff3h
MOVX @DPTR,A
CLR 91h
SETB 91h
CPL 18h             ; a rotina abaixo apenas faz piscar um 'R'
JB 18h,Troca        ; no display para indicar que o display
MOV 48h,#' '        ; foi 'R'efrescado
JMP NotOV1
Troca: MOV 48h,#'R'
      JMP NotOV1
IMPR:  MOV R0,02h    ; manda o caracter apontado por R2
      MOV A,@R0
      clr 90h
      MOV DPTR,#0fff3h
      MOVX @DPTR,A
      CLR 91h
      SETB 91h
NotOV1: MOV A,19H
      SUBB A,16h
      JC R1MA1
      SETB 95h
      JMP IntEND
R1MA1: CLR 95h
Intend: MOV 20h,R2
      POP 00h
      POP DPL        ; recupera DPTR e acumulador
      POP DPH
      POP ACC

```

```

POP 02h
POP 0D0h
RETI

```

```

ORG 6500h
PUSH DPH
PUSH DPL
PUSH ACC

```

```

Keyb: MOV DPTR, #0fff4h ; inicio da interrupção do teclado

```

```

MOVX A,@DPTR
CJNE A,#4,Next0
SJMP Keyend

```

```

Next0: CJNE A,#5,Next1
SJMP Keyend

```

```

Next1: CJNE A,#8,Next2
SJMP Keyend

```

```

Next2: CJNE A,#9,Next3
SJMP Keyend

```

```

Next3: CJNE A,#12,Next4
SJMP Keyend

```

```

Next4: CJNE A,#13,Next5
SJMP Keyend

```

```

Next5: CJNE A,#16,Next6
SJMP Keyend

```

```

Next6: CJNE A,#17,Keyend

```

```

Keyend: POP ACC

```

```

POP DPL
POP DPH
POP 0D0H
RETI

```

```

    ORG 6600H           ; inicio do corpo do programa
Init: PUSH 00h
    PUSH 01h
    PUSH 07h
    PUSH ACC
    PUSH DPL
    PUSH DPH
;   CALL 4100h         ; inicializa e limpa o display
    MOV A,#0CH         ; Desabilita o cursor
    SETB 90h
    MOV DPTR,#0fff3h
    MOVX @DPTR,A
    MOV R0,#0
    DJNZ R0,$
    DJNZ R0,$
    CLR 91h
    SETB 91h
    MOV R1,#48h
    MOV R7,#33
LIMPA: MOV @R1,#' '    ; preenche toda tela com espaços em branco
    INC R1
    DJNZ R7,LIMPA
    MOV DPTR,#4003H    ; instala vetor para o handler de teclado
    MOV A,#02
    MOVX @DPTR,A
    INC DPTR
    MOV A,#65H
    MOVX @DPTR,A
    INC DPTR
    MOV A,#0

```

```

MOVX @DPTR,A
MOV IP,#00001000b ; seta prioridade alta para timer 1
ANL TCON,#10111111b ; desliga timer 1 se ele estiver rodando
ANL TMOD,#00001111b ;
ORL TMOD,#00100000b ; põe timer 1 no modo 2
MOV IE,#10001001b ; habilita interrupcao do timer 1
MOV TH1,#164
ORL TCON,#01000000b ; habilita timer 1

```

```

MOV RCAP2H,#0FFH ; reload porta serial
MOV RCAP2L,#0DCH ; reload porta serial
MOV SCON,#01010011B ; serial modo 1
MOV T2CON,#00110100B ; liga timer 2
POP DPH ;push r0
POP DPL ;push r1
POP ACC ;push r7
POP 07h ;push acc
POP 01h ;push dpl
POP 00h ;push dph
RET

```

```
org 6700h
```

LerSensores:

```

PUSH DPL
PUSH DPH
PUSH ACC
ANL IE,#11111110B ; desliga a INT0(teclado).
CLR 097h ; P17=0
CALL READADC
MOV 10h,A ; guarda resultado de SD em 10h
SETB 097h ; P17=1

```

```

CALL READADC
MOV 11h,A           ; guarda resultado de SE em 11h
ORL IE,#0000001B   ; re-liga a INT0(teclado).
POP ACC
POP DPH
POP DPL
RET

READADC:SETB 93h    ; limpa bit de final de conversão
MOV DPTR,#0fff7h
MOVX @DPTR,a
JB 93h,$           ; espera o final da conversão
MOVX A,@DPTR      ; retorna em ACC o valor lido
RET

        org 6800h
DISP3CA:PUSH ACC
PUSH 00h
PUSH B
MOV A,13h
MOV R0,12h
MOV 0F0H,#100     ; parâmetros: 13H -> número a ser convertido
DIV AB            ; 12H -> endereço inicial
ADD A,#48         ; rotina de display de números 3 dígitos(decimal)
MOV @R0,A
INC R0
MOV A,0F0h
MOV 0F0H,#10
DIV AB
ADD A,#48
MOV @R0,A
INC R0

```

```
MOV A,0F0h  
ADD A,#48  
MOV @R0,A  
POP B  
POP 0h  
POP ACC  
RET  
  
END
```

## SOFTWARE DE CONTROLE DO AGV EM LINGUAGEM C

Este programa contém o software de controle do AGV. Realiza os cálculos referentes ao controle, correção do sinal dos sensores, etc. Para isto, utiliza as rotinas em assembler do do arquivo kitROM para acessar o hardware do AGV.

```
#include <reg51.h> /* special function register declarations */
#include <math.h>
                /* for the intended 8051 derivative */

typedef void (*fct_ptr)(void);    // define o ponteiro de uma funcao!

#define maxsum 100
#define absmaxsum 310
#define VelMedia 40
// Define variaveis Globais
at 0x1c unsigned char AESMONITORFLAG;    // uso interno do KIT
at 0x11 unsigned char ve;                // sensor esquerdo
at 0x10 unsigned char vd;                // sensor direito
at 0x23 unsigned char BITSDECONTROLE;    //
at 0x16 unsigned char pwmvars[4];
at 0x0f unsigned char PWM1;              // valor do PWM direito
at 0x0e unsigned char PWM2;              // valor do PWM esquerdo
at 0x48 unsigned char VideoBuffer[34];   // máscara do display na RAM 0x48 - 0x69
at 0x20 unsigned char CURSOR;
at 0x12 unsigned char vpos;               // Posicao do cursor na rotina de diplay BCD
at 0x13 unsigned char val;               // dado a ser impresso no display
```

```
//variáveis do programa em C

signed int tmp1,tmp2,diff,sum,locked,diffant,erro,eant,sig;
signed int c,d,p;

void Inicializar(void)
{
    fct_ptr fcall;
    fcall= 0x6600;
    fcall();
}

void LerSensores(void)
{
    fct_ptr fcall;
    fcall= 0x6700;
    fcall();
}

void Disp3ca(void)
{
    fct_ptr fcall;
    fcall= 0x6800;
    fcall();
}

void Sensor(void)
{
    //----- Conformação do sinal de erro

    diff = vd - ve;
    sum = vd + ve;
    if (sum > maxsum)
```

```

{
  if ((locked == 0) && (sum > absmaxsum)) locked = 1;
  if ((locked == 1) && (sum < absmaxsum)) locked = 0;
      // emula a função sign(diffant) colocando o resultado em sig
  if (diffant > 0) sig = 1; else sig = -1;
  if (diffant == 0) sig = 0;
  if (locked == 0)
  {
    erro = diffant + sig * (sum - maxsum);
  }
  else
  {
    erro = diffant + sig * (absmaxsum - maxsum);
  }
}
else
{
  erro = diff;
  diffant = diff;
}
}
void Controlador(void)
{
  p = erro / 2;
  d = 5 * (erro - eant);
  /*
      // parte do controle que processa o erro integral
  i = 0 * (erro + eant) + iant;
  if (i > 100)
  {
    i = 100;
  }
}

```

```
    iant = 0;
}
if (i < -100)
{
    i = -100;
    iant = 0;
}
iant = i;
*/
c = p + d;
eant = erro;
}
void Atuador(void)
{
    tmp1 = VelMedia + c;
    if (c > VelMedia) tmp2 = 0; else tmp2 = VelMedia - c;

    if (tmp1 > 100) tmp1 = 100;
    if (tmp1 > 100) tmp2 = 100;
    if (tmp1 < 0) tmp1 = 0;
    if (tmp1 < 0) tmp2 = 0;

    PWM1=tmp1;
    PWM2=tmp2;
}

void main(void)
{
    Inicializar();
    while(1)
    {
```

```
LerSensores();  
ve=ve*2;  
Sensor();  
Controlador();  
Atuador();  
  
val=ve;  
vpos=0x4a;  
Disp3ca();  
val=vd;  
vpos=0x4e;  
Disp3ca();  
val=PWM1;  
vpos=0x5b;  
Disp3ca();  
val=PWM2;  
vpos=0x5f;  
Disp3ca();  
}  
}
```

## **VALORES GERADOS PELOS SENSORES**

TABELA A.1

tempo (s)	Vd (x10mV)	Ve (x10mV)	Vd+Ve (x10mV)	Vd-Ve (x10mV)
0.1	52	32	84	20
0.2	52	33	85	19
0.3	53	33	86	20
0.4	52	33	85	19
0.5	47	33	80	14
0.6	47	34	81	13
0.6	47	34	81	13
0.7	47	33	80	14
0.8	46	34	80	12
0.9	47	34	81	13
1.0	49	34	83	15
1.1	49	34	83	15
1.2	48	31	79	17
1.3	48	32	80	16
1.4	50	32	82	18
1.5	49	30	79	19
1.6	51	29	80	22
1.7	53	29	82	24
1.8	53	32	85	21
1.9	54	32	86	22
2.0	65	34	99	31
2.1	74	33	107	41
2.2	79	34	113	45
2.3	79	37	116	42
2.4	75	46	121	29
2.5	40	52	92	-12
2.6	18	52	70	-34
2.7	4	46	50	-42
2.8	4	36	40	-32
2.9	8	24	32	-16
3.0	17	14	31	3
3.1	36	6	42	30
3.2	61	2	63	59
3.3	77	2	79	75
3.4	83	14	97	69
3.5	83	29	112	54
3.6	78	47	125	31
3.7	70	52	122	18
3.8	58	51	109	7
3.9	59	45	104	14
4.0	59	39	98	20
4.1	58	38	96	20

tempo (s)	Vd (x10mV)	Ve (x10mV)	Vd+Ve (x10mV)	Vd-Ve (x10mV)
4.2	58	36	94	22
4.3	59	36	95	23
4.4	57	37	94	20
4.5	55	35	90	20
4.6	54	36	90	18
4.7	55	36	91	19
4.8	55	36	91	19
4.9	55	35	90	20
5.0	55	36	91	19
5.1	56	36	92	20
5.2	54	35	89	19
5.3	55	35	90	20
5.4	55	35	90	20
5.5	55	36	91	19

Esta tabela mostra os valores gerados pelos sensores direito (Vd) e esquerdo (Ve), e foi gerada deslocando o gabinete com os sensores de forma transversal à pista, sendo lidos primeiro os valores de Vd e depois os de Ve.

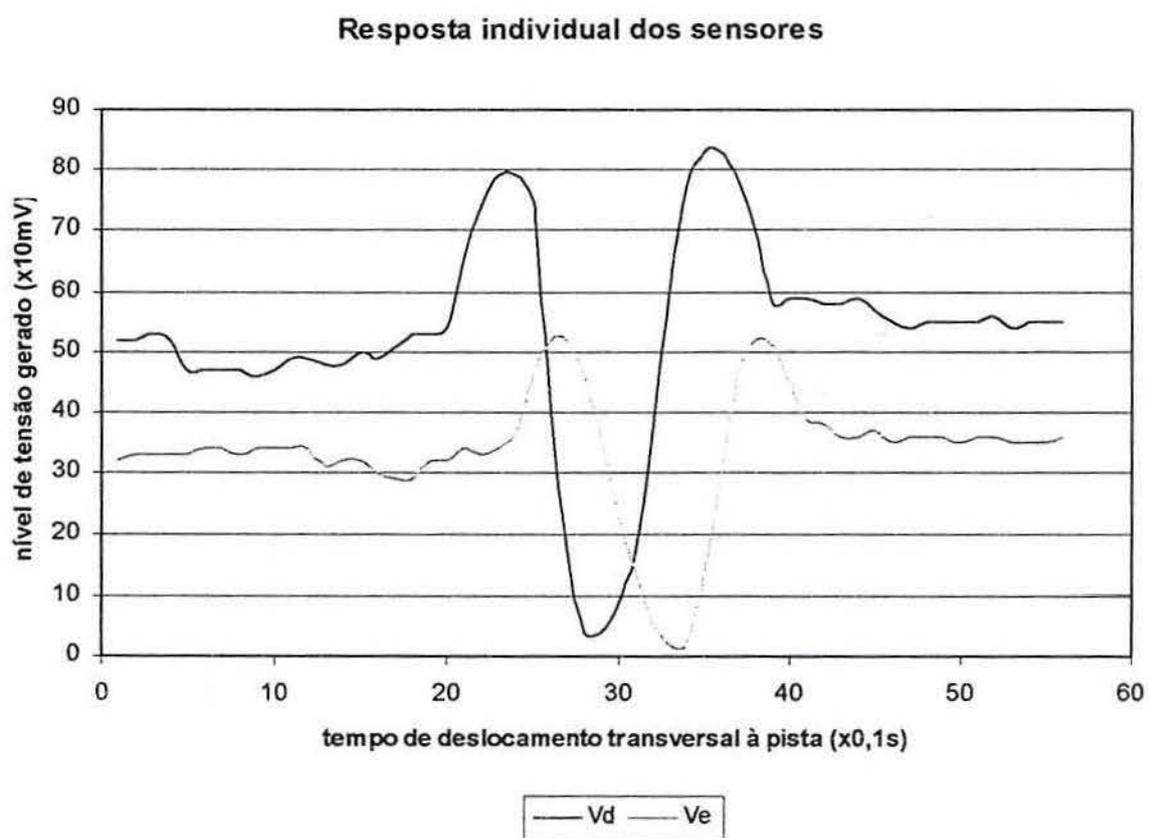


Figura A.2 – Níveis de tensão gerados pelos sensores direito (Vd) e esquerdo (Ve).

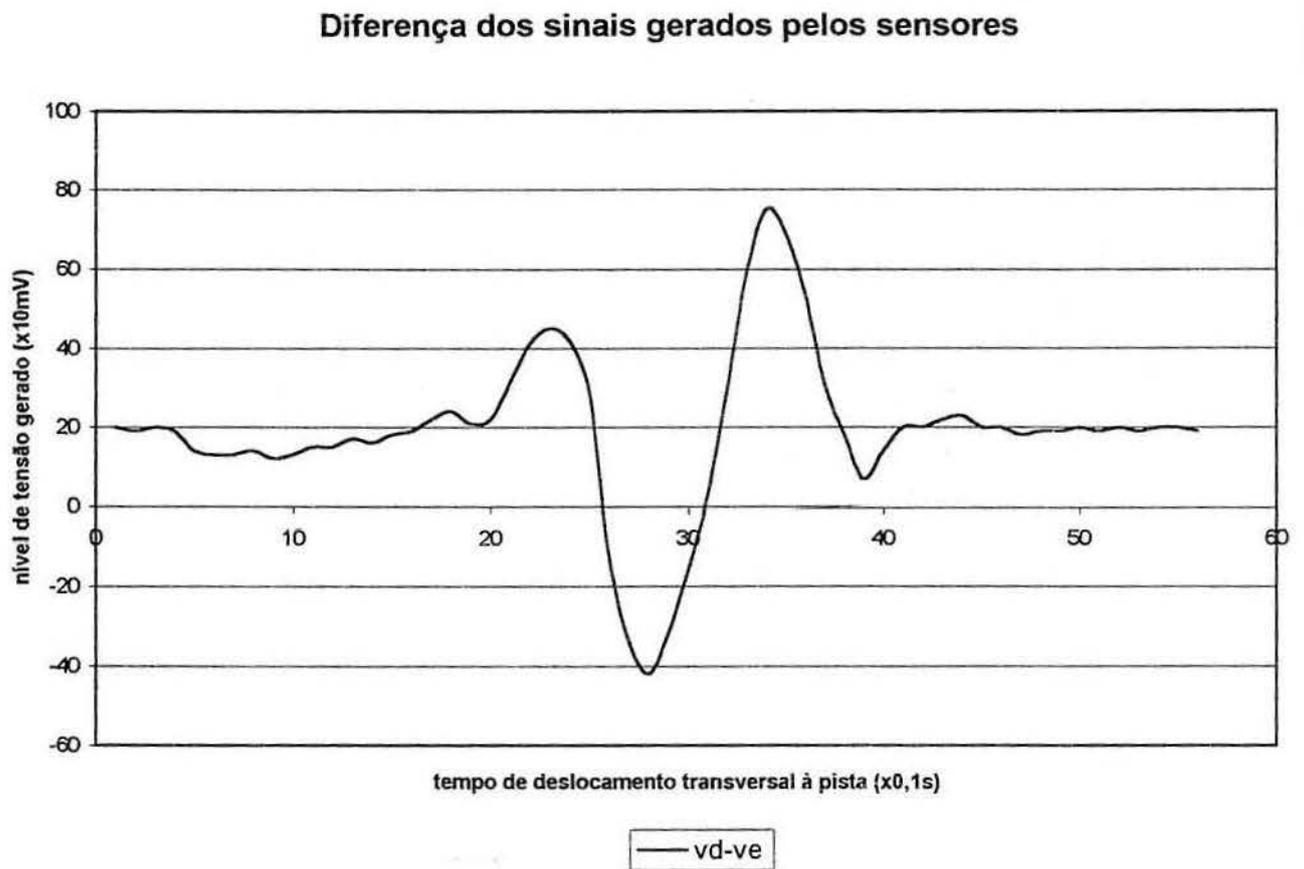


Figura A3 – Diferença entre os sinais gerados pelo sensor direito e esquerdo.

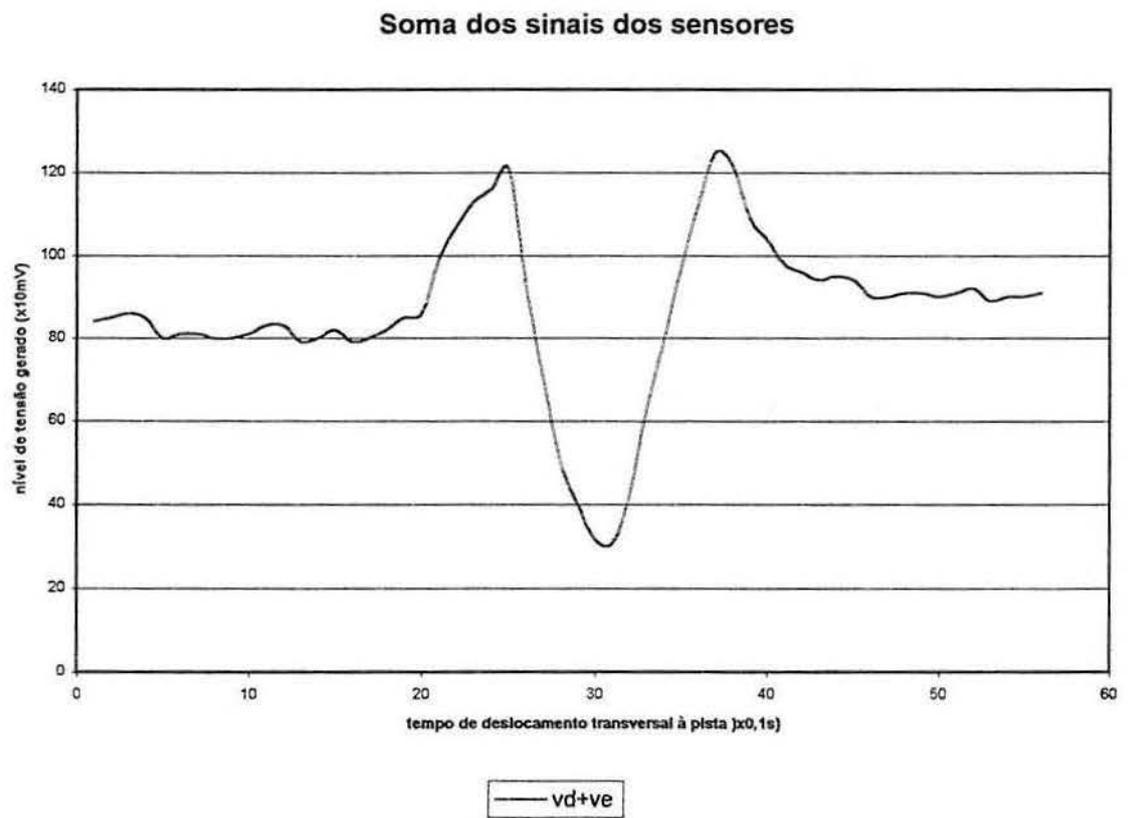


Figura A.4 – Soma dos sinais gerados pelos sensores direito e esquerdo.