

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO E AUTOMAÇÃO
INDUSTRIAL

ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA DE CONTROLE DE DIREÇÃO
PARA VEÍCULO AUTO-GUIADO

Este exemplar corresponde à defesa final da tese
defendida por Sérgio Eduardo
Gouvêa da Costa pela Comissão
Juizadora em 21.09.93.
Jaime Szajner / Rafael Santos Mendes
Orientador

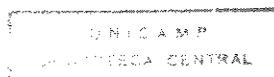
AUTOR: Sérgio Eduardo Gouvêa da Costa 823

ORIENTAÇÃO: Prof. Dr. Jaime/Szajner

CO-ORIENTAÇÃO: Prof. Dr. Rafael Santos/Mendes

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica
da UNICAMP como parte dos Requisitos para obtenção do Grau de
MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Campinas, setembro de 1993





A Carlos e Maria, que me deram a vida;

A Antonieta, Luciane, Carolina e Tiago,

que a tornaram mais bela.

AGRADECIMENTOS

- Ao Prof. Dr. Jaime Szajner, pela orientação segura e por todos os ensinamentos que me proporcionou, muito além dos domínios da ciência;
- Ao Prof. Dr. Rafael Santos Mendes pela co-orientação e sobretudo pela amizade;
- À AMEISE S/A, que patrocinou parte do projeto, assumindo o seu papel e a sua responsabilidade no desenvolvimento científico e tecnológico do país;
- Ao Prof. Dr. Edson Bim e Prof. José Raimundo, que sempre estiveram dispostos a prestar colaboração;
- Aos amigos Edson Pinheiro e Valfredo Pilla, pelas trocas de idéias, apoio e amizade;
- Aos colegas do Projeto AGV/LCA, Victor, Ivo e Wilson, pelo apoio no dia a dia;
- Aos colegas da FEE, Marcel, Hilgert, Humberto, Eli, Alexandre, Heron, Clidão e Gugu, pelos bons momentos que passamos juntos;
- Ao Busetti, que participou em todos os momentos: o primeiro a me incentivar, a companhia "eletrônica" na Alemanha e as sugestões no final;
- Ao CEFET/PR, em especial ao Departamento de Eletrotécnica, Núcleo de Pesquisas Tecnológicas e UNED-PB, que me proporcionaram a oportunidade de realizar o mestrado;
- À minha esposa e filhos, que me acompanharam neste desafio;
- Aos meus familiares, pelo apoio;
- A Deus, pela fé.

SUMÁRIO

Resumo	vii
Abstract	viii
1 - <u>INTRODUÇÃO</u>	1
2 - <u>VEÍCULOS AUTO-GUIADOS</u>	3
2.1 - <u>Conceituação</u>	3
2.2 - <u>Breve Histórico</u>	4
2.3 - <u>Sistema de Veículos Auto-Guiados (AGVS)</u>	7
2.3.1 - Veículos	8
2.3.2 - Rede de Transporte	11
2.3.3 - Transferência de Carga	11
2.3.4 - Sistema de Controle do Veículo	12
2.3.5 - Sistema de Controle de Tráfego	13
2.4 - <u>Sistemas de Orientação</u>	13
2.4.1 - Caminho Fixo (instalação contínua)	14
2.4.2 - Caminho Semi-Fixo (instalação descontínua)	17
2.4.3 - Caminho Indefinido (sem referências)	18

2.5 - <u>Outras Aplicações</u>	19
2.6 - <u>Perspectivas Futuras</u>	20
2.7 - <u>Referências Bibliográficas</u>	21
3 - <u>O PROJETO AGV/LCA</u>	24
3.1 - <u>Histórico</u>	24
3.2 - <u>Metodologia de Desenvolvimento do Projeto</u>	26
3.3 - <u>Descrição do Projeto</u>	27
3.4 - <u>Módulos de Hardware</u>	30
3.4.1 - Sensores	31
3.4.2 - Interface Controladora dos Inversores PWM	33
3.4.3 - Drive de Potência	35
3.5 - <u>Módulos de Software</u>	36
3.6 - <u>Referências Bibliográficas</u>	39
4 - <u>PROJETO DO CONTROLADOR E SIMULAÇÕES EM COMPUTADOR DIGITAL</u>	41
4.1 - <u>Descrição do Problema de Controle</u>	41
4.1.1 - Ciclo de Desenvolvimento	41
4.1.2 - Abordagem para a Modelagem do AGV/LCA	43
4.2 - <u>Modelagem do Sistema</u>	43
4.2.1 - Modelo Geométrico Não-Linear do AGV	44
4.2.2 - Modelo Geométrico Linear do AGV	47
4.2.3 - Cálculo do Ganho em Malha Aberta	49
4.3 - <u>Projeto do Controlador</u>	53
4.4 - <u>Simulações em Computador Digital</u>	57
4.5 - <u>Referências Bibliográficas</u>	96

5 - <u>IMPLEMENTAÇÃO</u>	97
5.1 - <u>O Programa de Controle das Operações do AGV</u>	97
5.1.1 - Módulo de Operação e Manutenção do Sistema - OMS	99
5.1.2 - Módulo Amostrador - AMT	100
5.1.3 - Módulo de Comunicação Homem-Máquina - CHM	100
5.1.4 - Módulo de Controle de Tração - CTT	104
5.1.5 - Módulo de Controle de Direção - CTD	111
5.1.6 - Estrutura de Dados	116
5.2 - <u>Perfil Suave de Variação de Velocidade</u>	117
5.3 - <u>Compensação de Tensão dos Motores Operando em Baixas Freqüências</u>	118
5.4 - <u>Relação entre o Valor Digital aplicado aos DACs e a Freqüência de Saída dos VCOs</u>	121
5.5 - <u>Tratamento dos Sinais Obtidos pelo Sensor de Posicionamento sobre a Faixa</u>	125
5.6 - <u>Módulo Controlador</u>	129
5.7 - <u>Referências Bibliográficas</u>	132
6 - <u>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</u>	133
7 - <u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	137

RESUMO

No Laboratório de Engenharia de Computação e Automação Industrial da Faculdade de Engenharia Elétrica da UNICAMP - LCA/FEE - vem sendo desenvolvido o projeto e a implementação de um Veículo Auto-Guiado - AGV.

O AGV/LCA foi projetado para aplicações no meio industrial, fazendo parte de um sistema de transporte flexível, servindo como meio de integração de matéria-prima e ferramentas.

O sistema de orientação utiliza fitas refletivas fixadas no piso e o veículo tem o seu controle através de um programa executado em um microcomputador compatível com um PC/AT - 386 SX, a bordo do AGV.

Os sistemas de tração e direção são baseados em motores de indução trifásicos do tipo gaiola de esquilo, alimentados por inversores do tipo fonte de tensão, configurados topologicamente em ponte trifásica.

Este trabalho tem como objetivo principal a integração entre os diversos subsistemas - aquisição de dados, controle de tração e controle de direção - através de um programa que faz o controle das operações do AGV. São mostradas as funções implementadas para garantir o bom desempenho do sistema, como a compensação de tensão dos motores operando em baixas frequências e o perfil suave de variação de velocidade do carro.

São feitas a modelagem do sistema e o projeto do controlador através da técnica de alocação de pólos e são mostrados resultados de simulações em computador digital com o sistema em malha fechada, de forma a validar as considerações feitas no projeto do sistema de controle e também para se obter referências para a implementação prática.

ABSTRACT

The Computer Engineering and Industrial Automation Laboratory of the UNICAMP's Electrical Engineering Faculty (LCA/FEE), has been developing the design and implementation of an Automated Guided Vehicle - AGV.

The AGV/LCA was designed to work in industrial environment, as a Flexible Transportation System, integrating raw material and tools.

The track is based on a reflective tape on the floor and the AGV's control is made by a microcomputer PC/AT - 386 SX, aboard the vehicle.

The traction and steering are based on three phase squirrel-cage induction motors, fed by voltage source inverters, topologically configured in a three phase bridge.

The main purpose of this work is to integrate the subsystems - data acquisition, track control and steering control - by a software that controls all operations. We show the implemented functions to guarantee the desired performance, such as the motors voltage compensation when operating in low frequencies and the vehicle's speed variation behavior.

The system modeling, and the control design by the pole placement method are made, and closed loop system's simulation in a digital computer are shown, in order to make valid the theoretical considerations and to obtain practical implementation references.

1 - INTRODUÇÃO

O presente trabalho se refere ao projeto de um Veículo Auto-Guiado (AGV) em desenvolvimento no Laboratório de Engenharia de Computação e Automação Industrial da Faculdade de Engenharia Elétrica da UNICAMP - LCA/FEE.

O AGV da UNICAMP é um veículo concebido para operação em ambiente industrial, como elemento integrador de ferramentas e matéria-prima e tem o seu sistema de orientação por fitas refletivas fixadas no piso.

O controle das operações do veículo é feito através de um programa executado em um microcomputador compatível com um PC/AT - 386 SX instalado a bordo do carro e os sistemas de tração e direção são baseados em motores de indução trifásicos, do tipo gaiola de esquilo, alimentados por inversores do tipo fonte de tensão, configurados topologicamente em ponte trifásica.

Este trabalho tem como objetivo principal a integração dos diversos subsistemas que compõe o projeto (aquisição de dados, controle de tração e controle de direção), de forma que o veículo possa operar nos modos manual e automático - com e sem a interferência de um operador, respectivamente.

No que se refere à operação automática, é feita a modelagem do sistema e o projeto do controlador, através da técnica de alocação de pólos. São feitas simulações em computador digital de forma a validar as hipóteses feitas para a modelagem e o projeto do controlador, bem como para obter referências para a implementação.

É mostrada a filosofia do programa responsável pelo controle das operações do AGV, com destaque para as funções que visam garantir o padrão de comportamento estabelecido.

Infelizmente, devido a impossibilidade de aquisição de componentes, que impediu que se tivesse o sistema operacional, não foi feita a implementação final com o veículo sob comando

automático, onde seriam testados todos os subsistemas operando conjuntamente. A operação sob modo manual foi testada com sucesso.

Entretanto, através da metodologia apresentada é possível fazer-se as eventuais modificações que sejam necessárias, determinadas através da implementação do modo automático de operação; as correções podem ser feitas dentro da sistemática apresentada, sucessivamente, até que sejam satisfeitas as condições de operação.

No capítulo 2 é feita uma breve apresentação sobre Veículos Auto-Guiados, enfocando suas partes principais e os sistemas de orientação mais utilizados, com o objetivo de situar o leitor no assunto.

No capítulo 3 é descrito o Projeto AGV/LCA, onde são apresentados os objetivos do projeto e as suas partes mais importantes.

No capítulo 4 é apresentado o problema de controle, as hipóteses para a modelagem do sistema, o projeto do controlador e uma série de simulações em computador digital, tentando validar o sistema modelado e obter condições de operação para servir como base para a implementação.

No capítulo 5 são feitas considerações a respeito da implementação, em particular do *software* que faz o controle das operações do AGV e de suas funções especiais, que visam dar condições de operação ao sistema.

Finalmente, no capítulo 6 são tiradas conclusões sobre os resultados obtidos e são feitas sugestões para a continuidade dos trabalhos referentes ao Projeto AGV/LCA.

2 - VEÍCULOS AUTO-GUIADOS

2.1 - Conceituação

Com as tecnologias disponíveis nos campos de processamento da informação, sensoriamento e controle, tornam-se realidade as fábricas automatizadas [1], o que a até pouco considerava-se como "fábricas do futuro", onde se produziriam bens de alta qualidade, a baixos custos, sob condições humanizadas de trabalho [2].

Dentro desta nova realidade, o fluxo de material assume importância destacada, uma vez que a preocupação com a integração das diversas matérias-primas e máquinas-ferramentas passa a ser parte das estratégias de produção.

O transporte automático de cargas passou a ser feito primeiramente por esteiras transportadoras e elevadores, que possibilitavam a transferência de carga com rapidez e precisão, tendo como desvantagem a pouca flexibilidade no que diz respeito à mudanças de *layout* ou mesmo no processo de produção [3]. Passou-se a buscar um sistema de transporte que fosse sobretudo flexível no que se refere aos fatores mencionados e desta forma surgiram os veículos de guiagem automática ou, como são tratados neste trabalho, os AGVs (*Automated Guided Vehicles* - Veículos Auto-Guiados). Estes veículos possuem como características [4]:

- veículos sobre rodas;
- movidos a motores elétricos;
- alimentados por baterias;
- munidos de algum controle de navegação.

Os AGVs circulam no interior das instalações seguindo percursos previamente definidos dentro do planeamento da produção e o seu deslocamento é feito sem a intervenção de um operador. Diversos sistemas de orientação têm sido empregados e alguns tipos são analisados neste capítulo.

2.2 - Breve Histórico

Os primeiros veículos auto-guiados foram desenvolvidos nos EUA, no início da década de 50 pela *Barret Electronics* (hoje *DEMAG - Barret*), como resultado de pesquisas no campo de controles indutivos. O primeiro sistema foi instalado em 1954 na Carolina do Sul, na empresa *Mercury Motor Freight*. Esse mercado ficou sob o domínio da *Barret* até 1961, quando a *Webb Company* passou também a atuar neste ramo [2,3,5,6].

Diversos fatores contribuíram para que a indústria ligada à produção de veículos autônomos nos EUA tivesse um crescimento tímido no início. Dentre eles destacam-se o grande volume e poucos recursos oferecidos pelos AGVs da época, como também o posicionamento contrário adotado pelas associações de trabalhadores.

Durante os anos 60 e início dos anos 70, os controladores passaram a ser transistorizados e posteriormente utilizaram a tecnologia dos circuitos integrados, o que deu um novo impulso ao mercado. Ainda assim as aplicações nos EUA eram pequenas, ao contrário do que ocorreu na Europa, devido, entre outros, aos seguintes fatores [6]:

- os trabalhadores europeus não viram na automação uma ameaça aos seus empregos da forma como foi vista pelos americanos;
- regulamentações severas visando à segurança no trabalho, o que favorece a automação;
- as empresas européias padronizaram a construção e as dimensões dos *pallets* (estrados para carga).

A aplicação pioneira na Europa foi na Volvo, numa fábrica de montagem em Kalmar, em 1974. Dentre os resultados positivos encontrados nesse caso, pode-se citar a redução de 25% no Tempo de Montagem e de 39% nos Reparos de Qualidade. A partir deste exemplo, diversas outras empresas européias passaram a utilizar sistemas com veículos auto-guiados (fig.2.1)[7]. Na figura 2.2 são mostradas aplicações industriais com AGVs [8].

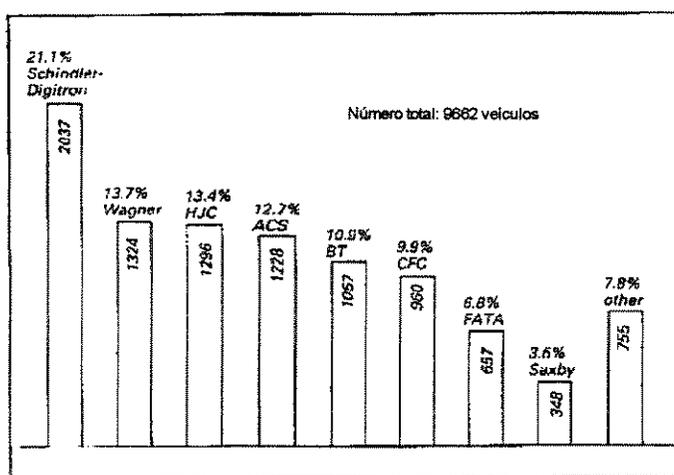


fig.2.1 - instalação de AGVs na Europa (até 1985)

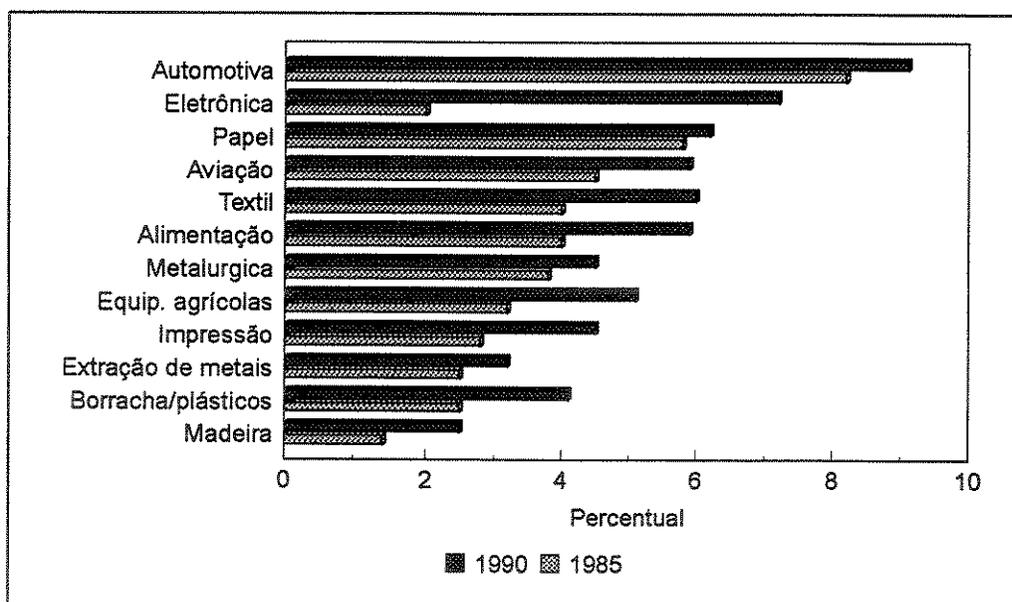


fig.2.2 - aplicações industriais com AGVs (%)

Por diversos motivos, as aplicações de AGVs nos EUA passaram a ser de interesse, dentre eles:

-a competição externa passou a ser mais acirrada;

-a recessão do final dos anos 70 e início dos anos 80 teve um efeito bastante forte sobre a indústria automobilística americana, forçando-a a buscar métodos mais eficientes de produção;

-as associações de trabalhadores passaram a ter um comportamento diferente frente a automação, desde que ela representasse, por exemplo, maior segurança no trabalho;

-os sistemas de AGVs europeus passaram a ser transferidos para os EUA.

O marco das aplicações nos EUA ocorreu em 1984, quando a *General Motors* implantou o seu primeiro sistema de montagem flexível (fig.2.3) [5,6].

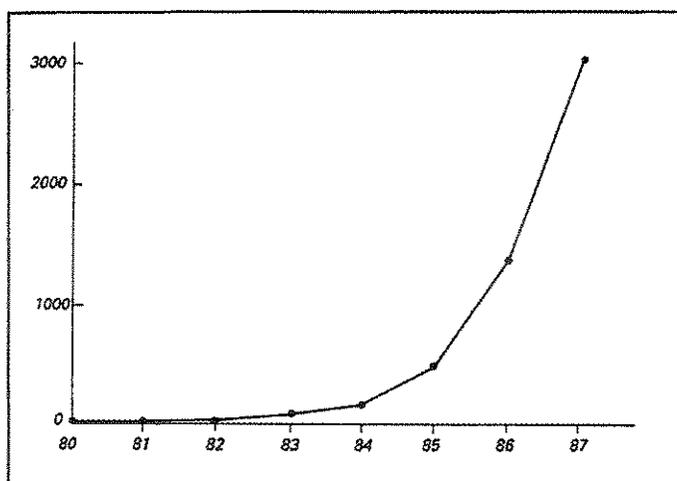


fig.2.3 - número total de AGVs na General Motors

Deve-se também levar em consideração os AGVs fabricados no Japão, inicialmente pela empresa *Daifuku*. Segundo dados de 1985, mais de 15 companhias trabalhavam no desenvolvimento de AGVs e mais de 30 empresas mantinham AGVs em operação nas suas instalações [3].

2.3 - Sistema de Veículos Auto-Guiados (AGVS)

Um AGVS (*Automated Guided Vehicle System* - Sistema de Veículos Auto-Guiados) pode ser definido como [2] "um sistema autônomo e descontínuo de movimentação de materiais, particularmente flexível no que diz respeito à trajetória, à frequência das operações de transporte e à quantidade de pontos de transferência de carga". Um AGVS (também denominado **DTS** - *Driveless Transport System*) consiste basicamente de veículos (AGVs) e de uma rede interna de transporte que define os possíveis caminhos a serem percorridos pelos veículos. Os componentes mais importantes dentro de um AGVS podem ser divididos da seguinte maneira [3] (fig.2.4):

- Nível Físico: constituído por: AGVs, Rede de Transporte e Sistema de Transferência de Carga.
- Nível de Informação: constituído pelo Sistema de Controle do Veículo e pelo Sistema de Controle do Tráfego.

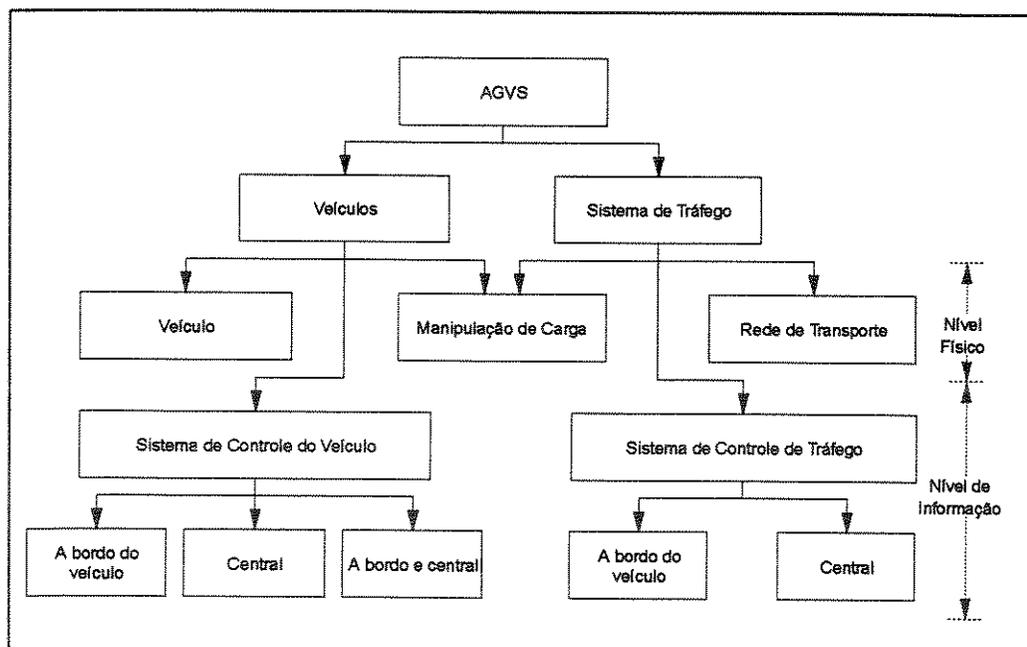


fig.2.4 - principais componentes de um AGVS

2.3.1 - Veículos

Os veículos dividem-se basicamente em tipo "carro" e tipo "comboio"[2]. No primeiro caso a carga é transportada diretamente sobre o veículo e no segundo, o AGV puxa reboques que efetivamente transportam a carga. No que se refere à aplicação, pode-se classificar os veículos da seguinte maneira [10] (fig.2.5):

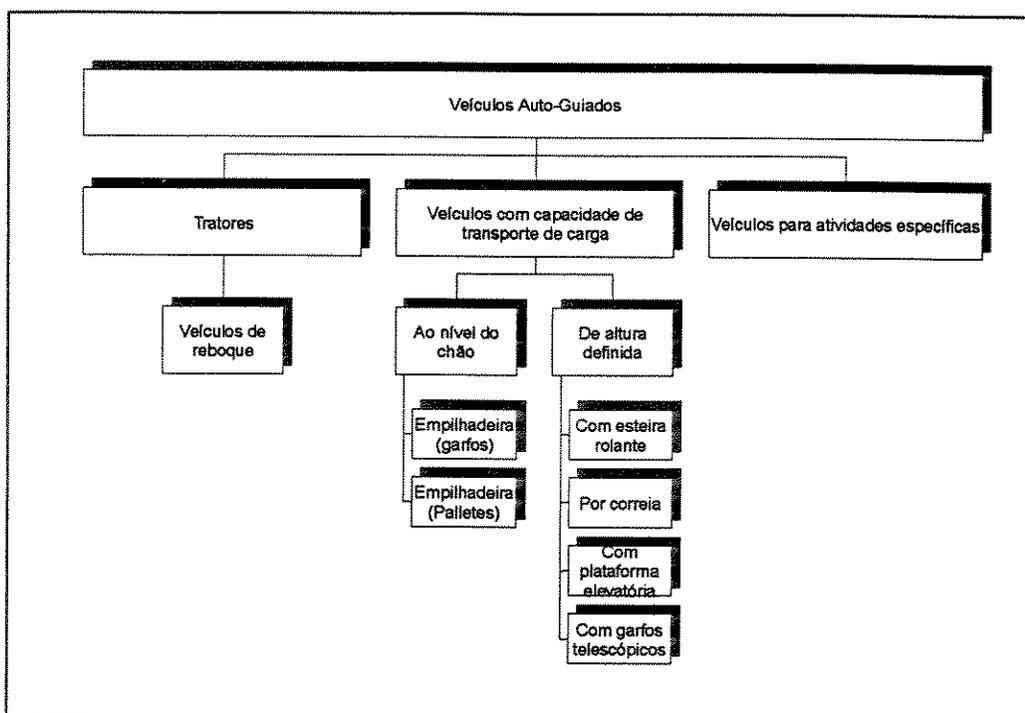


fig.2.5 - classificação dos veículos (AGVs)

A fig.2.6 mostra alguns tipos construtivos de AGVs.

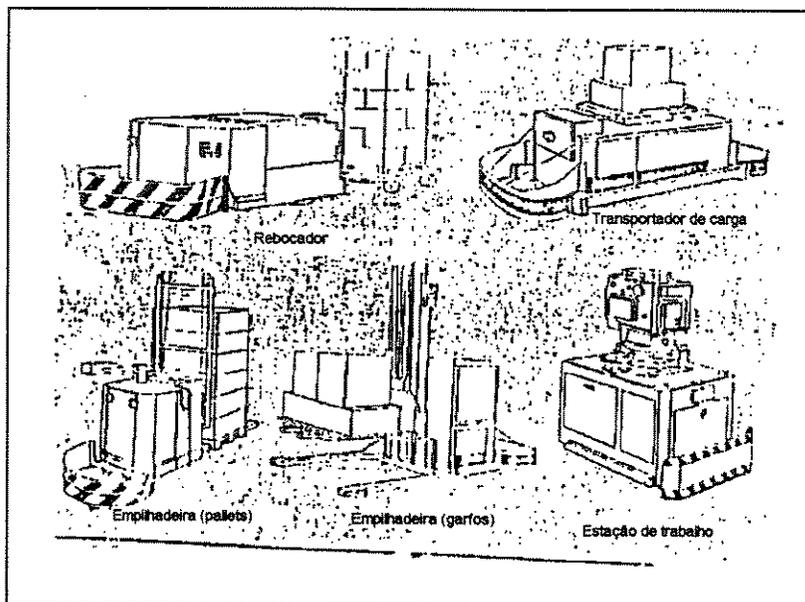


fig.2.6 - tipos de AGVs

Os veículos são constituídos dos seguintes componentes principais [3,11]:

-sistema de orientação, que é tratado no item 2.4;

-sistema de baterias: opera-se a recarga das baterias de duas maneiras, quando o AGV está parado em uma estação de trabalho (*opportunity charging*) ou quando o veículo é retirado de operação para recarga (*full-cycle charging*). A forma adotada depende das exigências do sistema de produção. Podem ser utilizadas baterias automotivas ou especiais (NiCd). A opção por um tipo ou outro é função do processo, que define o porte (tamanho) do veículo bem como a autonomia necessária (em horas de uso contínuo).

-computador de bordo: a ele geralmente são atribuídas as funções de controle do veículo (que são o controle dos sistema de tração e direção do carro), o sistema de aquisição de dados, (que trata dados do tipo estado das baterias, sensores de posição e velocidade do AGV etc), a implementação do algoritmo de controle de posição do veículo e a comunicação (através de interface apropriada) com um sistema de controle central de toda a produção.

-sistema de segurança: são implementados os critérios de segurança veículo-veículo, veículo-objeto e veículo-pedestre. A segurança veículo-veículo é geralmente baseada em sinais de ultra-som, sendo que os transmissores e receptores encontram-se nas partes dianteira e traseira dos

carros e visam manter uma distância mínima entre dois veículos. A segurança veículo-obstáculo é implementada usualmente através do pára-choque dos carros que possuem sensores que, uma vez acionados, obrigam a parada do veículo. A segurança veículo-pedestre é feita através de sinais sonoros e visuais emitidos pelos veículos ao longo de todo o trajeto e em especial em alguns de seus pontos. São colocados botões do tipo "soco" ao redor do veículo que, quando acionados, iniciam rotinas para a parada do carro.

-unidades de tração e direção: são usualmente constituídas por motores de corrente contínua para a tração e direção e motores de passo para a direção. Há dois casos típicos: quando o veículo possui duas rodas traseiras livres e uma roda dianteira aonde atuam os motores de tração e direção (denominada configuração triciclo) e quando a roda dianteira é livre (ou controlada por um motor de passo) e cada roda traseira é comandada por um motor DC independente um do outro. Neste caso, o controle de direção é feito pela diferença relativa de velocidades dos motores. Inclui-se também nas unidades de tração e direção laços de realimentação para o controle em malha fechada de velocidade e posição do carro.

-unidade de comunicação [3,4]: sendo o AGV um elemento dentro do sistema de produção, é vital que ele possa se comunicar com um centro de controle superior. O sistema de comunicação deve preencher os seguintes requisitos: identidade da comunicação, alta confiabilidade, boa relação sinal-ruído e compatibilidade entre os sistemas de comunicação. As informações típicas a serem enviadas para o veículo são o número do veículo, a estação de trabalho/ponto a ser atingida, o tempo de parada no local, a velocidade etc. As informações enviadas pelo veículo podem ser: sua identificação, estado das baterias, posição atual, velocidade etc.

A comunicação pode ser implementada segundo os seguintes meios: ondas de rádio, indução eletromagnética e sinais ópticos. A comunicação por ondas de rádio é a mais difundida, onde cada veículo é equipado com antenas para transmissão e recepção de mensagens e o sistema de controle central é conectado a diversas antenas espalhadas estrategicamente pela fábrica. Há a necessidade de algoritmos eficientes para garantir a integridade dos dados, uma vez que em ambientes industriais existem inúmeras fontes de interferência. Nos casos em que os níveis de interferência são

demasiadamente altos, a comunicação por meio de sinais ópticos pode ser mais favorável. Esta é implementada geralmente através de sinais infravermelhos e recentemente através de sinais de laser.

A comunicação indutiva prevê a colocação de fios no piso da instalação e de antenas na parte inferior dos veículos, por onde ocorre a comunicação.

Na implementação por ondas de rádio a comunicação é dita contínua e nas demais, comunicação discreta.

Além de elementos integradores de material e ferramentas, os AGVs têm sido utilizados também como estações de trabalho móveis, onde a carga ao invés de ser transferida é processada sobre o veículo. Exemplo típico ocorre na indústria automobilística, na montagem de chassis e motores [2].

2.3.2 - Rede de Transporte

A rede interna de transporte determina as possíveis trajetórias a serem seguidas pelos AGVs [2,3] e é constituída pelo sistema de orientação e pelas estações de controle do sistema. O sistema de comunicação pode ser considerado como pertencente à rede de transporte.

2.3.3 - Transferência de Carga

O sistema de transferência de carga pode estar situado tanto na estação de trabalho, no veículo ou em ambos. A opção por um sistema ou por outro, bem como o seu tipo construtivo vai depender da natureza da carga a ser manuseada. Na fig.2.7 são mostrados alguns tipos de sistemas de transferência de carga.

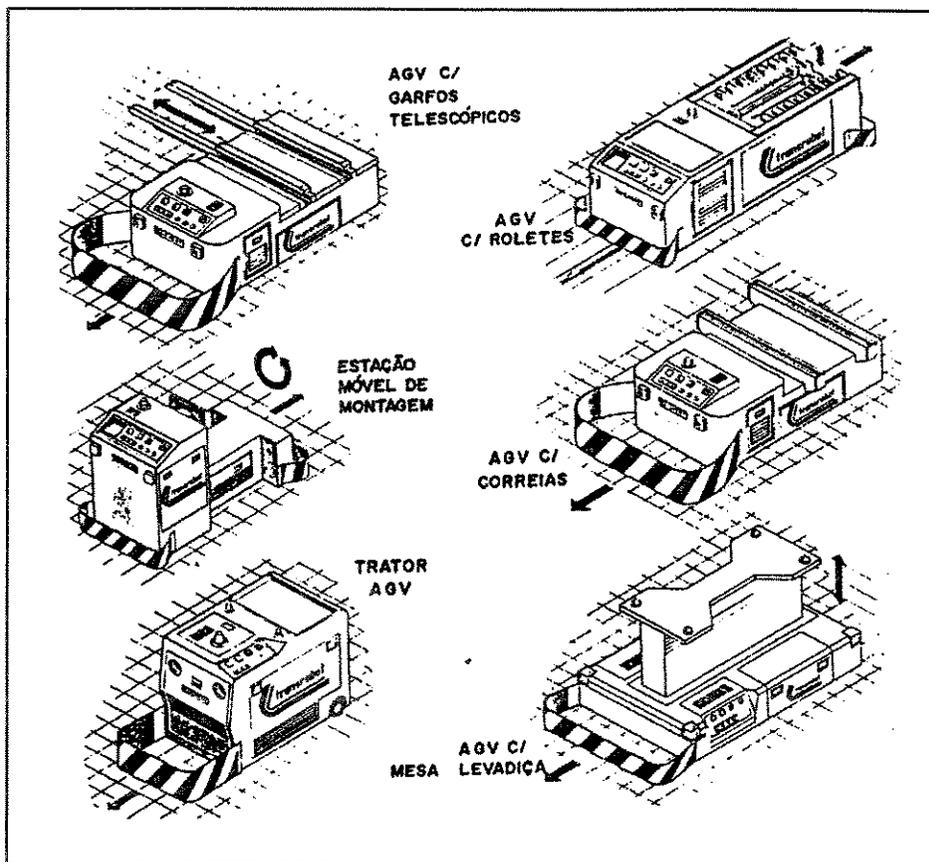


fig.2.7 - AGVs segundo os sistemas de transferência de carga

2.3.4 - Sistema de Controle do Veículo

A função básica deste sistema é o controle de destino [2,3], que pode ser descrito pelas seguintes funções:

- Planejamento e Controle da Rota (Navegação): orienta o AGV com relação ao caminho a ser seguido, em função da posição atual e do destino perseguido;

- Controle de Direção: faz com que o veículo mantenha o seu curso, segundo informações do sistema de aquisição de dados e de acordo com o estabelecido pelo Planejamento e Controle da Rota;

- Pilotagem: recebe os sinais do controle de direção e, de acordo com outras informações (tráfego da rede, velocidade desejada), atua nos sistemas de tração e direção;

-Controle de Transferência de Carga: atua sobre os sistemas de transferência de carga do veículo;

-Controle de Bateria: monitora e informa ao computador central o estado das baterias.

2.3.5 - Sistema de Controle de Tráfego

É responsável por otimizar o tráfego dos **AGVs** pela rede, bem como garantir a integridade da rede no que diz respeito a colisões entre veículos. Geralmente esta tarefa é executada por um computador fora do veículo que tem uma função de gerenciamento superior, ou seja, é responsável pela integração dos **AGVs** com o restante do sistema de produção, fazendo a programação das rotas dos veículos, das paradas, dos tempos de parada etc.

2.4 - Sistemas de Orientação

Os sistemas de orientação permitem que o veículo se oriente em relação ao percurso que deverá ser seguido.

Os sistemas de orientação que estão hoje disponíveis ou estarão em curto prazo podem ser classificados da seguinte maneira [1,3,4]:

2.4.1 - Caminho Fixo (instalação contínua)

Os possíveis caminhos a serem percorridos são traçados diretamente na fábrica.

a) Guias Indutivas

É a técnica que até o momento obteve maior confiabilidade e portanto encontra o maior número de sistemas implementado. É feita uma ranhura no piso da instalação, por onde passa um condutor que é percorrido por uma corrente elétrica (com frequência tipicamente entre 3 - 35 kHz), que induz um campo concêntrico. O AGV possui na sua parte frontal duas bobinas de direção, aonde são induzidas tensões. Estas bobinas são colocadas simetricamente em relação à guia indutiva, de forma que a diferença entre as tensões induzidas nelas seja proporcional ao desvio em relação à guia indutiva (fig.2.8).

As redes que se utilizam deste princípio podem ser do tipo multifrequência, onde diferentes rotas podem ser determinadas por diferentes frequências das correntes que circulam pelas guias.

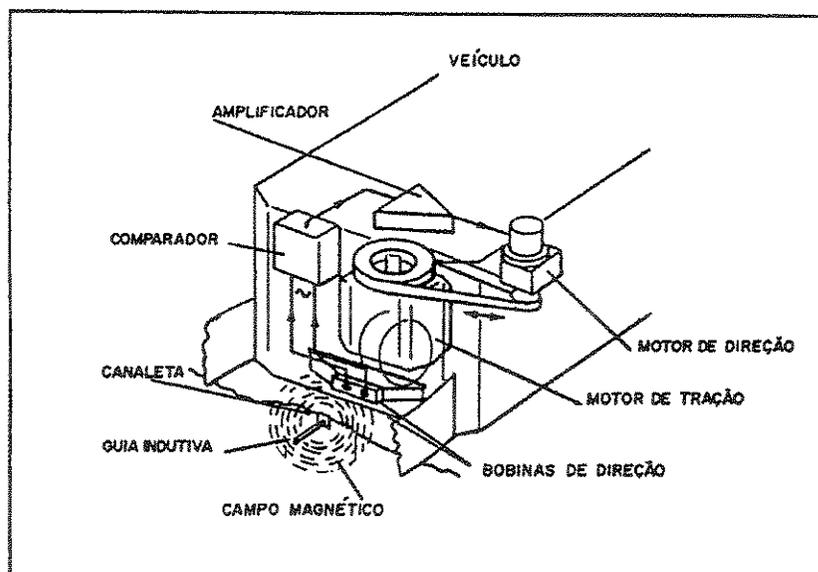


fig.2.8 - princípio da orientação indutiva

b) Reflexão Óptica

São colocadas no piso da instalação fitas que refletem sinais ópticos, tais como fitas de alumínio ou fitas plásticas (ou até mesmo a marcação é pintada no chão da fábrica). No veículo existe uma fonte de luz de baixa potência que emite fluxo luminoso que é refletido pela fita e captado por sensores (*e.g.* fototransistores) sob o veículo (fig.2.9).

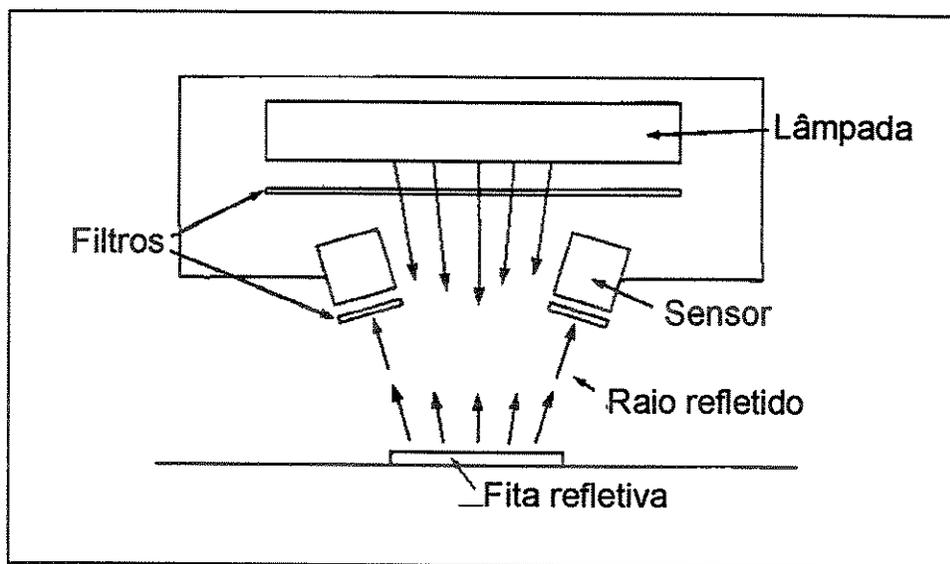


fig.2.9 - sistema por reflexão óptica

A sensibilidade do sistema de orientação depende da filosofia empregada - em alguns casos são colocados diversos sensores e a medida do erro em relação à trajetória está vinculada ao número de sensores que se encontram fora da trilha (fig.2.10), ou pode-se ter sensores analógicos que geram sinais contínuos proporcionais ao desvio do carro em relação à trajetória.

Em locais em que a refletividade do piso é bastante alta, são utilizadas marcas que amplificam o sinal refletido (como por exemplo fitas com partículas fosforescentes) e, no caso de haver influência de fontes de luz externas, podem ser utilizados sensores de trilha infravermelhos.

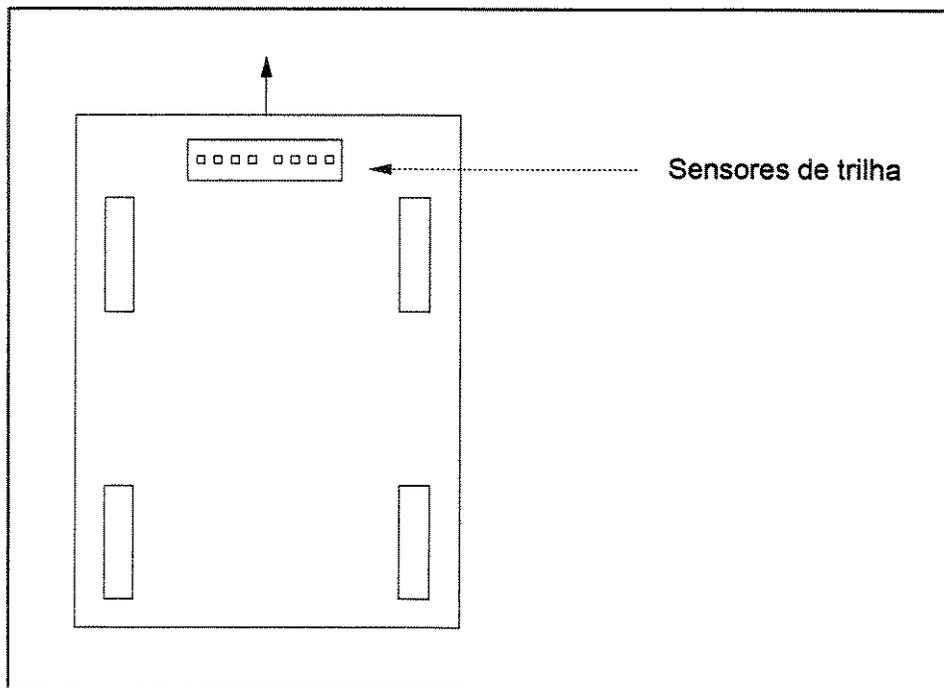


fig.2.10 - sistema de orientação com seis sensores

c) Laser

O veículo tem o seu caminho determinado por feixes de raio laser que são emitidos geralmente por um emissor instalado/controlado em conjunto com dispositivos refletores, que são geralmente localizados na parte superior da fábrica.

Aplicações típicas são nos casos em que a pista não permite a colocação de guias indutivas ou fitas refletivas (fig.2.11).

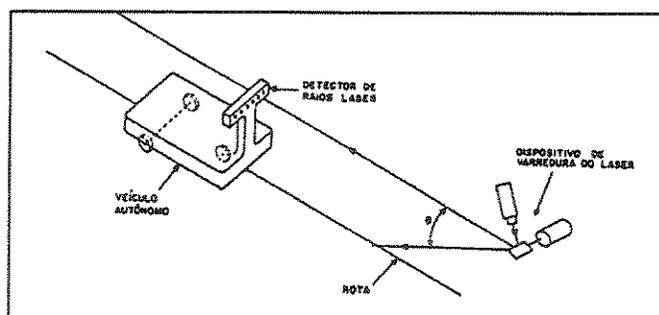


fig.2.11 - sistema de orientação com laser

d) Reconhecimento de Imagens

A idéia básica é conduzir o veículo manualmente pelo percurso que deverá ser seguido e assim gravar as imagens que posteriormente serão comparadas quando o AGV estiver funcionando no modo automático, isto é, sem a intervenção de um operador. As limitações para a implementação deste sistema estão na alta capacidade computacional exigida do *hardware*, bem como dos algoritmos que deverão ser utilizados pelo *software* para o processamento e análise em tempo real das imagens. É importante que neste caso o veículo seja dotado de certa inteligência para a análise dos dados, como no caso de haver algum obstáculo transitório (a passagem de alguma pessoa, por exemplo) durante o percurso do AGV.

2.4.2 - Caminho Semi-Fixo (instalação descontínua)

Os possíveis caminhos são marcados descontinuamente.

a) Marcação da Trajetória

Os AGVs possuem uma ITV (*Industrial Television Camera*), que fornece informações visuais ao controle de orientação. A informação é passada por meio da leitura de códigos de barras colocados no piso ou no teto da instalação (fig.2.12).

b) Magnetos Sinalizadores

São implementados de diferentes maneiras: por meio de Fitas Magnéticas colocadas ao longo do caminho a ser percorrido, instalação de Ferrita ou instalação de Magnetos (Barras Magnéticas). Em todos os casos o veículo possui sensores magnéticos para o tratamento das informações.

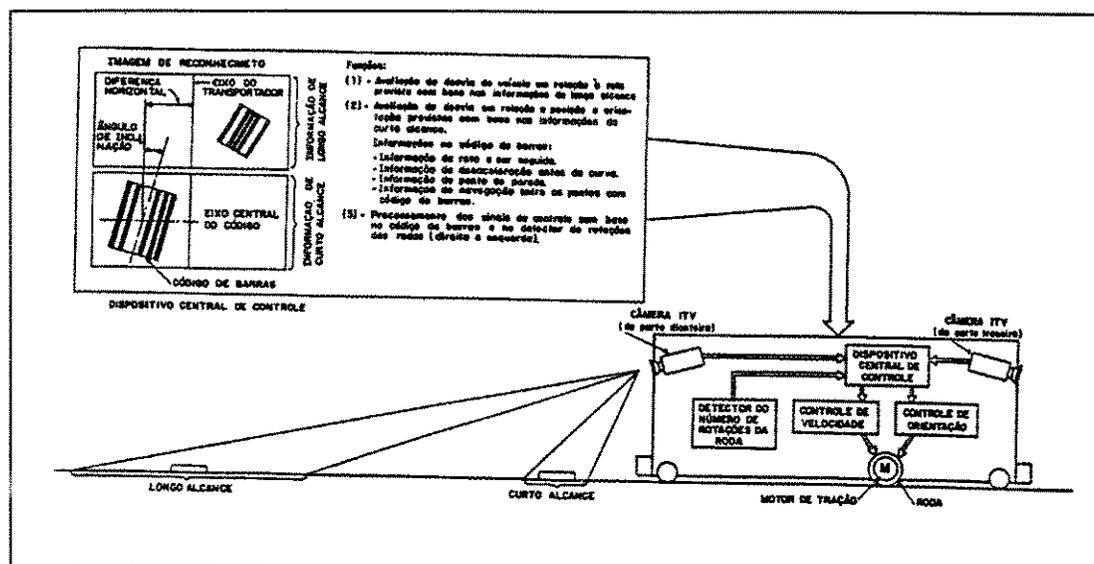


fig.2.12 - sistema de orientação baseado em visão computacional

2.4.3 - Caminho Indefinido (sem referências)

O veículo se vale dos seus próprios recursos para seguir a trajetória. Trabalha-se segundo as seguintes filosofias: o percurso pode estar armazenado em um mapa (mapeamento prévio), ou o AGV pode receber informações de fontes de sinais de ultra-som ou raios laser. A forte característica neste tipo de sistema de orientação é a capacidade do veículo de decidir sobre qual caminho tomar para chegar até o seu destino, bem como a capacidade de tratamento de situações inesperadas (como o aparecimento de um obstáculo).

Uma comparação sobre diversos sistemas de orientação segundo os critérios precisão, flexibilidade, confiabilidade, controlabilidade e custos é feita em [12].

Não é possível estabelecer, de um modo geral, qual é o sistema de orientação mais adequado. A opção por um tipo ou por outro está diretamente relacionada com a aplicação do AGV. Por exemplo, em

situações bem definidas, como em um Sistema Flexível de Manufatura [13], AGVs com sistemas de orientação por guias indutivas poderão ser bastante indicados pela alta confiabilidade apresentada pelo sistema, porém para a aplicação em locais desconhecidos e insalubres os de caminho indefinido serão mais indicados.

2.5 - Outras Aplicações

Até o presente, foram indicadas basicamente aplicações em ambientes fabris para os AGVs. Entretanto, de forma crescente, tem-se dado novas aplicações para os Veículos Auto-Guiados, como o transporte de comida e de roupas em lavanderias e em hospitais, o transporte de correspondências em agências dos correios e o transporte de correspondências e outras mercadorias em escritórios comerciais (fig.2.13).

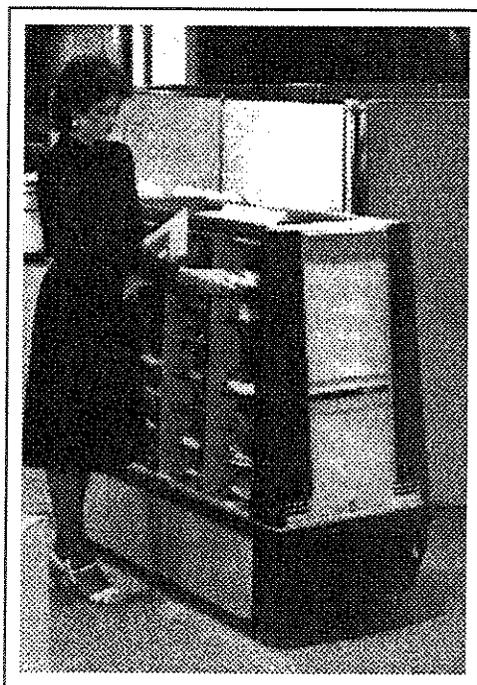


fig.2.13 - aplicação de AGV em escritórios comerciais

No caso de hospitais, tipicamente os AGVs servem para o transporte de roupas, de medicamentos, de amostras de exames e de comida. O correio dos EUA possui vários AGVs em diversas agências que funcionam 24h por dia. Como exemplo, *The Pittsburg General Mail Facility* possui uma rota com extensão de 2 km com 56 pontos de parada [5].

Aplicações militares e em ambientes perigosos também são referidas [14,15].

2.6 - Perspectivas Futuras

As aplicações de veículos de guiagem automática estão sendo cada vez maiores. À medida em que novas tecnologias de sistemas de orientação vão sendo colocadas à disposição e as existentes aperfeiçoadas, aumenta a possibilidade de aplicação de tais sistemas. Exemplo notório deste fato são os veículos de caminho indefinido, que são verdadeiros Robôs Móveis e garantem um futuro promissor para a área.

Dentro deste contexto mais amplo de Robôs Móveis, estudos têm sido feitos em todo o mundo, conforme pode ser visto em [16,17,18], e os limites para esta área parecem estar bem longe de ser alcançados, principalmente quando se leva em consideração novas teorias, como a do *Perception-Action* [19], que vem abrir novos caminhos dentro do conceito de Robôs Móveis.

O estudo de Robôs Móveis tem servido como suporte para pesquisas em diversas áreas do conhecimento, como engenharia de controle, instrumentação, acionamento de motores, inteligência artificial e engenharia de *software*, entre outros [1].

2.7 - Referências Bibliográficas

- [1] Cozman, F.G....[*et alii*], (1990). "O Projeto de Veículos Autônomos de Transporte", 1º Simpósio de Automação Integrada, Curitiba, CEFET/PR: 119-123.
- [2] Ferreira E.D.e Paskulin,F.A., (1990). "AGVS (Sistemas Autônomos de Transporte), uma Opção para a Racionalização do Fluxo de Material e seu Potencial Apicativo", 9º Seminário de Comando Numérico e Automatização Industrial, SOBRACOM: 16.01-16.24.
- [3] Eleutério, M.A., (1989). "Sistema de Controle para Veículo Auto-Guiado por Fita Refletiva", Dissertação de Mestrado, Curitiba, CEFET/PR.
- [4] Miyagi, P.E....[*et alii*] (1988). "Veículos Autônomos de Transporte e seus Controles", 3º Congresso Nacional de Automação Industrial: 226-231.
- [5] Hammond,G., (1987). "Evolutionary AGVS - from Concept to Present Reality", in "Automated Guided Vehicle Systems", chapter 1, Springer-Verlag: 3 - 9.
- [6] Love,J.,(1986). "European *versus* United States AGV Applications", Proc.of an Executive Breefing on AGV, Stratford: 171 - 195.
- [7] Müller,T., (1987). "AGVS in Europe - Current Techniques and Future Trends", in Automated Guided Vehhicle Systems, chapter 1, Springer-Verlag:11 - 17.
- [8] Architecture Technology Corporation, (1991). "Automated Guided Vehicles", Oxford,Elsevier Advanced Technology.
- [9] Müller, T., (1983). "Automated Guided Vehicles", Bedford, IFS (Publications) Ltd & Berlin, Springer - Verlag.
- [10] Daum,M., (1986). "A Modular AGV", 4th International Conference on AGVS, Chicago: 87 - 102.
- [11] Hammond, G., (1986). "AGVS at Work - Automated Guided Vehicle Systems", Bedford, IFS (Publications) Ltd & Berlin, Springer - Verlag.

- [12] Boegli,P., (1987). "A Comparative Evaluation of AGV Navigation Techniques", in Automated Guided Vehicle Systems, chapter 2, Springer-Verlag: 65 -77.
- [13] Tazza,M. ...[et alii], (1992). "Sistemas Flexíveis de Manufatura: Projeto e Análise", minicurso no 9º Congresso Brasileiro de Automática, Vitória, UFES: 62 - 81.
- [14] Simões,G.S. ...[et alii], (1991). "Proposta de um Controlador Adaptativo para Acionamento de um VAT utilizando a Técnica de Modelo de Referência", II Seminário Internacional de Motores Elétricos e Acionamentos Reguláveis, São Paulo, ABINEE/EPUSP: 227 - 241.
- [15] Rembold,U., Hörmann,A. (1992). "Autonomous Mobile Robots", 9º Congresso Brasileiro de Automática, Vitória, UFES: 1 - 6.
- [16] Giralt,G., (1984). "Mobile Robots", in Robotic & Artificial Intelligence, Nato ASI Series, vol F11: 364 - 393.
- [17] Kyono,S. (1987). "An Application of Explosion Proof AGVs in Hazardous Locations", 5th International Conference on AGVS, Tokyo: 251 - 260.
- [18] Jorgensen,C. ...[et alii], (1986). "Autonomous Robot Navigation", Byte, Jan86: 223 - 235.
- [19] Brooks,R.A., (1991). "Intelligence without Representation", in Artificial Intelligence, vol 47, Jan1991.
- [20] Brooks,R.A., (1987). "Autonomous Mobile Robots".
- [21] Simões, M.G. ...[et alii], (1990). "Estratégia de Acionamento de Motores para Veículos Autônomos", 4º Congresso Nacional de Automação Industrial: 214 - 219.
- [22] Simões, M.G. ...[et alii], (1989). "Controle e Acionamento de Motores para Veículos Autônomos de Transporte", II Seminário de Eletrônica de Potência, Florianópolis, UFSC: 190 - 197.
- [23] Ferraz, C.A.M. ...[et alii], (1989). "Controlador de Trajetória de Veículo Autônomo de Transporte", X Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ: 229 - 232.
- [24] Adamowski, J.C. ...[et alii], (1990). "Desenvolvimento de um Robô Móvel", 8º Congresso Brasileiro de Automática, Belém, UFPA: 513 - 517.

- [25] Maruyama, N. e Cozman, F.G., (1992). "Trajectory Control with Fuzzy Rules applied to a Mobile Robot", 9º Congresso Brasileiro de Automática, Vitória, UFES: 378 - 383.
- [26] Furukawa, C.M. ...[et alii], (1992). "Navegação de um Veículo Autônomo de Transporte por Ultra-Som em Ambientes Estruturados", 9º Congresso Brasileiro de Automática, Vitória, UFES: 384 - 389.
- [27] Costa, S.E.G. ...[et alii], (1992). "Sistema de Controle de Direção de um Veículo Auto-Guiado", 9º Congresso Brasileiro de Automática, Vitória, UFES: 390 - 394.
- [28] Preciado, A. e Meizel, D., (1992). "Closed Loop Control of an Autonomous Mobile Robot", 9º Congresso Brasileiro de Automática, Vitória, UFES: 372 - 377.
- [29] Shih, L.Y., (1985). "Automatic Guidance of Mobile Robots in Two-way Traffic", *Automatica*, vol.21, nº2: 193 - 198.
- [30] Lengyel, J. ...[et alii], (1990). "Real-Time Robot Motion Planning Using Rasterizing Computer Graphics Hardware", *Computer Graphics*, vol.24, nº4: 327 - 335.
- [31] Petriu, E.M. ...[et alii], (1990). "Automated Guided Vehicle Position Recovery", *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, vol.39, nº1: 254 - 258.
- [32] Marsh, P., (1985). "Robots", London, Salamander Books.
- [33] Hollier, R.H., Ed., (1987). "Automated Guided Vehicle Systems (International Trends in Manufacturing Technology)", Bedford, IFS (Publications) Ltd & Berlin, Springer - Verlag.
- [34] Hollier, R.H., Ed., (1986). "Automated Guided Vehicles", Proc. of an Executive Briefing, Stratford-upon-Avon.
- [35] Hammond, G., Ed., (1986). "Automated Guided Vehicles Systems", Proc. of the 4th International Conference, Chicago.
- [36] Takahashi, T., Ed., (1987). "Automated Guided Vehicles Systems", Proc. of the 5th International Conference, Tokyo.

3 - O PROJETO AGV/LCA

3.1 - Histórico

O PROJETO AGV do Laboratório de Engenharia de Computação e Automação Industrial da Faculdade de Engenharia Elétrica (LCA/FEE) da UNICAMP, foi iniciado em uma disciplina de Tópicos em Engenharia da Computação, oferecida em nível de pós-graduação.

No curso, propunha-se desenvolvimentos nas áreas de sensores e atuadores. Os assuntos a serem tratados eram o projeto e implementação de sistemas para aquisição de dados e comunicação e o desenvolvimento de *hardware* e técnicas para o controle do acionamento de motores de indução.

Uma vez que o projeto de um Veículo Auto-Guiado contempla estas áreas, foram iniciados estudos sobre tecnologias disponíveis sobre o assunto, análise de projetos existentes no país e no exterior [1 a 11], bem como contatos com fabricantes.

Foi firmado convênio de cooperação com a empresa AMEISE S/A, que forneceu um veículo rebocador de carga, modelo EFZ-30 (fig.3.1), adaptado às especificações, assim como componentes eletrônicos e microcomputadores para o desenvolvimento do *hardware* e do *software* do veículo.

O projeto tem como forte característica a multidisciplinariedade. A diversidade de assuntos tratados e pessoas envolvidas exigiu grande esforço na coordenação das ações.

Foram desenvolvidos vários subprojetos, que culminaram em dissertações de mestrado, como o projeto de inversores de potência [12], a interface controladora dos inversores PWM [13] e a unidade de aquisição de sinais [14].

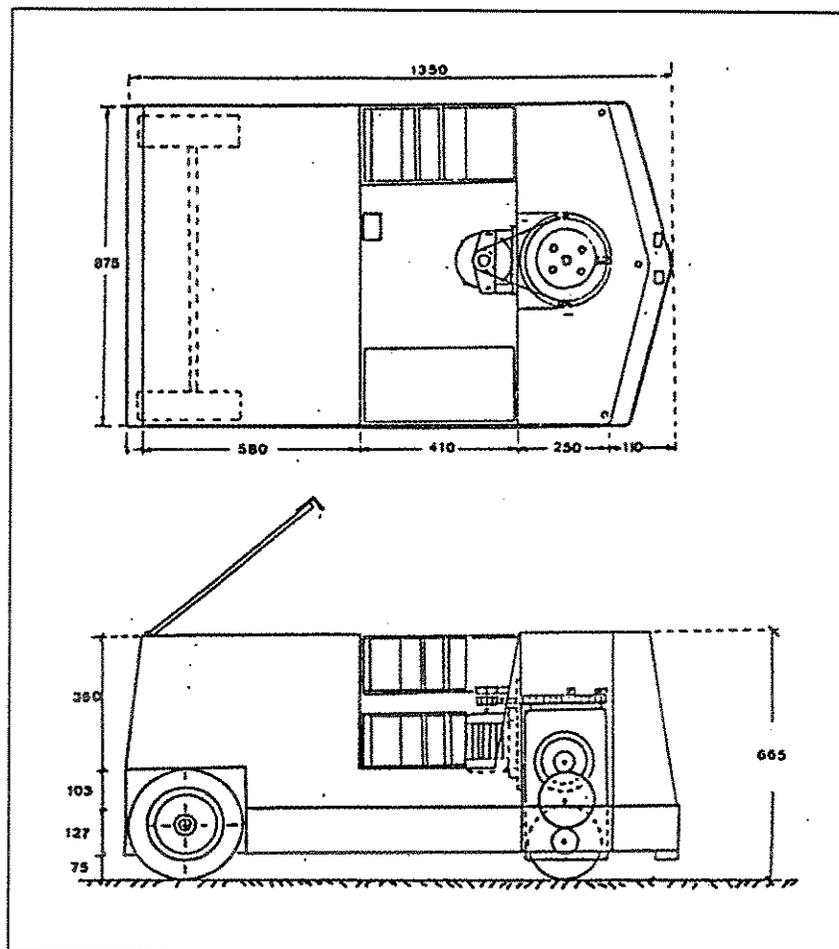


fig.3.1 - rebocador EFZ-30 da AMEISE S/A

Este trabalho é composto por duas partes, que são o projeto do sistema de controle de direção e o desenvolvimento de um programa para o controle das operações do veículo, tendo como objetivo principal dar condições de operação ao sistema, quer seja no modo manual quer no automático.

O projeto do controlador de direção [15] para a operação automática do veículo envolve a modelagem do sistema, a síntese do controlador, seguida de simulações em computador digital do sistema sob a ação do controlador e a implementação do algoritmo de controle no computador de bordo do veículo.

O *software*, através de seus módulos, interage com todos os subsistemas do veículo e faz o controle das operações do AGV.

Portanto, o trabalho tem como característica principal a integração entre os diversos subsistemas, dentre eles, o de controle de posição do carro.

Devido às dificuldades encontradas no país para o desenvolvimento de trabalhos que envolvem implementação prática (particularmente de *hardware*), não foi possível fazer a implementação final, ou seja, a operação automática do AGV.

Neste capítulo são mostradas as características gerais do Projeto AGV/LCA, sendo que muitos dos recursos descritos foram previstos na concepção do veículo mas não foram implementados na primeira fase do projeto; no capítulo 4 é mostrado o projeto do controlador, no capítulo 5 as implementações que foram feitas e no capítulo 6 é feita uma avaliação desta fase do projeto, com considerações sobre possíveis evoluções do mesmo.

3.2 - Metodologia de Desenvolvimento do Projeto

Objetivando uma racionalização do esforço despendido no projeto, optou-se por uma metodologia de desenvolvimento *top-down*. A abordagem adotada envolveu as seguintes etapas de projeto:

- para o desenvolvimento do hardware:
 - a) especificação funcional das características dos módulos;
 - b) desenho de esquemáticos;
 - c) simulação;
 - d) geração da lista de conexões;
 - e) descrição funcional do circuito;
 - f) lista de materiais;
 - g) especificação de testes;
 - h) montagem do protótipo;

- i) testes do protótipo;
- j) revisão da especificação e documentação.
- para o desenvolvimento do software:
 - a) especificação funcional das características do software (análise e projeto);
 - b) programação dos módulos;
 - c) descrição dos programas desenvolvidos;
 - d) teste dos módulos isolados;
 - e) integração dos módulos;
 - f) integração com o hardware;
 - g) revisão da documentação.

3.3 - Descrição do Projeto

O protótipo de Veículo Auto-Guiado do LCA foi concebido para operar em ambientes industriais fortemente estruturados, como elemento de integração de matérias-primas e ferramentas, dentro do conceito de um Sistema de Transporte Flexível.

O veículo utilizado (fig.3.2) possui a configuração denominada triciclo, onde a tração e a direção são exercidas na roda frontal, sobre a qual atuam os chamados motores de tração e direção, e as duas rodas traseiras são livres.

Os acoplamentos eletromecânicos são feitos através de redutor de velocidade para o motor de tração e de correia dentada para o motor de direção.

O protótipo foi dimensionado para uma capacidade de carga rebocada de 3.000 kg ou carregada de 400 kg, líquidos, com uma velocidade máxima de 1.00 m/s e rampas com aclive máximo de 15 graus.

O veículo possui uma massa de aproximadamente 600 kg com o banco de baterias, ou aproximadamente 300 kg sem o banco de baterias.



fig.3.2 - o AGV/LCA

A alimentação dos sistemas de tração e direção é provida por um banco de baterias tracionárias (96 V, 90 A.h.), que permite um período de operação de até 8 horas sem recargas.

A eletrônica embarcada é alimentada por uma fonte chaveada.

O protótipo de AGV em desenvolvimento no LCA é controlado por um microcomputador de bordo (inicialmente do tipo PC XT e atualmente PC AT 386/SX - 25 MHz, com processador matemático). Um segundo microcomputador deverá ser utilizado como supervisor, sendo colocado fora do veículo. A comunicação prevista entre estes computadores é feita por meio de uma interface serial RS-422.

O computador de bordo tem como funções as ações de controle de direção e pilotagem, interface com sensores, interface homem-máquina e comunicação com computador supervisor. Este, por sua vez, tem como finalidades a navegação e o estabelecimento das rotas para um ou mais AGVs, constituindo assim um AGVS (*Automated Guided Vehicle System*), assim como a interface com sistemas de controle hierarquicamente superiores.

O veículo tem sua trajetória definida por meio de trilhas físicas e passivas (fita refletiva), presas ao solo. A largura da trilha utilizada é de 20 mm, garantindo assim uma precisão de posicionamento menor que uma polegada. O erro da posição do veículo em relação à trajetória é lido por um sensor analógico, que fornece um sinal de tensão proporcional à distância do carro à fita refletiva.

A opção por este sistema de orientação deve-se às características de boa precisão na execução da trajetória, boa flexibilidade no que diz respeito a alterações no percurso e baixo custo em relação aos outros sistemas de orientação [7]. A aplicação a sistemas industriais fortemente estruturados foi também fator preponderante para a determinação do tipo de sistema de orientação a ser empregado.

A interação com o meio, quando são obtidos os dados necessários à operação do veículo - como erro em relação à trajetória, estado das baterias e identificação dos pontos de parada - se dá através de sensores específicos, conectados a um cartão que é fixado em um *slot* do computador de bordo.

Os sistemas de tração e direção são baseados em motores de indução trifásicos tipo gaiola de esquilo, acionados por inversores transistorizados em ponte trifásica, do tipo fonte de tensão com controle por modulação por largura de pulso (**PWM**). Os motores de corrente alternada apresentam vantagens na sua utilização em relação aos motores de corrente contínua, como menor custo de aquisição e manutenção, ampla disponibilidade no mercado e também por terem menores restrições ao seu emprego em ambientes fabris sujeitos a gases explosivos. Em contrapartida, exigem técnicas para o controle de seu acionamento bastante sofisticadas quando comparadas com as dos motores **DC**.

Foram tomadas precauções especiais para a isolamento galvânica entre o microcomputador de bordo e os sistemas inversores de potência, bem como para proteção contra sobrecargas de tensão e corrente nos transistores de potência.

Com relação à operação, o **AGV/LCA** pode ser comandado manual ou automaticamente.

No modo manual, o veículo é comandado por um operador através de um *mouse* de três botões, sendo dois deles para o comando da roda de direção e o outro para o comando da tração.

Através de um teclado no veículo, pode-se acionar diversas funções, como por exemplo a reinicialização do sistema (deixando-o em um estado conhecido), reversão do sentido de giro do motor de tração, comutação entre os modos manual e automático, mudança de velocidade de deslocamento do veículo, estado de emergência e fim do programa de controle das operações. O controle manual pode ser realizado também por meio do computador supervisor.

Sob operação automática, o veículo deverá seguir o percurso definido pelo sistema de orientação sem a interferência de um operador, devendo reconhecer os pontos de parada no percurso e

parar naqueles definidos segundo uma programação inicial ou através de mensagem enviada pelo computador supervisor, sendo que o tempo de cada parada também pode ser programado. Neste modo de operação, as ações solicitadas através do *mouse* não são aceitas, mas pode-se, através do teclado ou do computador supervisor, mudar a velocidade de operação, comandar a partida do carro em uma estação de trabalho antes que se atinja o tempo programado, além da operação de emergência.

Estando em operação automática, o veículo pode ser parado através da solicitação do modo manual ou da finalização do programa de controle, operações estas feitas por meio do teclado ou do computador supervisor.

3.4 - Módulos de Hardware

Todos os circuitos utilizados no veículo foram desenvolvidos no LCA, com exceção dos microcomputadores.

Na fig.3.3 temos um diagrama de blocos dos módulos que compõem os circuitos do veículo.

Os módulos que compõem o sistema são:

- a) ADIR: unidade do acionamento do motor de direção;
- b) ATRA: unidade do acionamento do motor de tração;
- c) BB: banco de baterias;
- d) CB: computador de bordo;
- f) FONTCH: fonte DC do tipo chaveada que alimenta os demais circuitos (+12V, -12V, +5V, -5V);
- g) MDIR: motor do sistema de direção;
- h) MTRA: motor do sistema de tração;
- i) SENS: sensores do veículo;
- j) UAS: unidade de aquisição de sinais;
- k) UNID: unidade de controle do inversor do sistema de direção;

- l) UNIT: unidade de controle do inversor do sistema de tração;
- m) USER: unidade de interface serial;

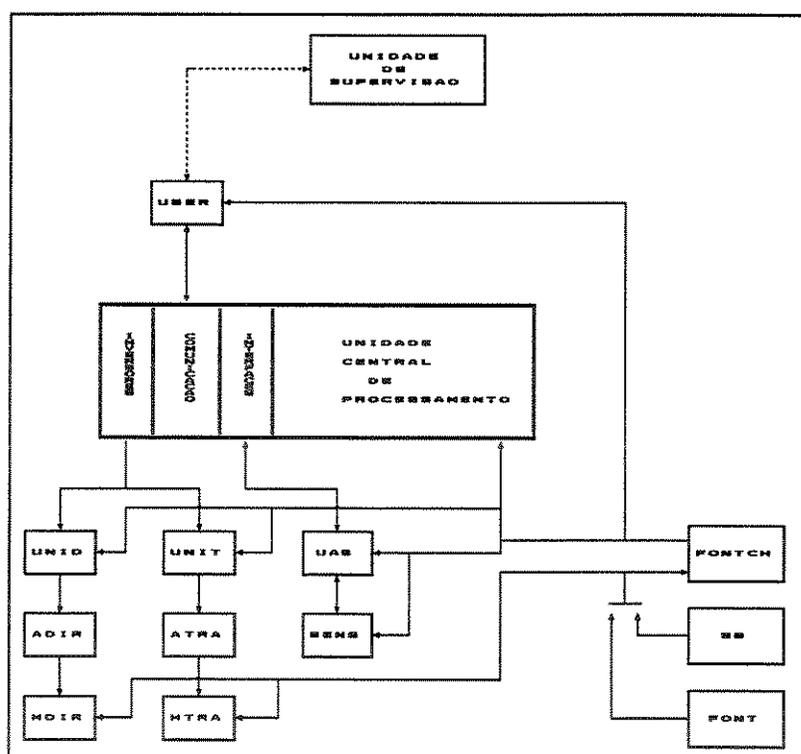


fig.3.3 - módulos de hardware do AGV

3.4.1 - Sensores

O módulo de sensoramento permite ao computador de bordo obter as informações necessárias à operação do veículo. Ele é baseado em um cartão, denominado UAS - Unidade de Aquisição de Sinais. A UAS foi desenvolvida com características superiores às exigidas pelo projeto, visando outras aplicações em que a aquisição de sinais analógicos, a geração de sinais analógicos e o controle e/ou

atuação sobre sinais digitais fossem necessários [14]. O circuito desenvolvido é compatível com os barramentos internos dos microcomputadores tipo IBM PC XT/AT.

O módulo de sensoramento é composto pelos seguintes elementos (fig.3.4):

- a) UAS: unidade de aquisição de sinais. Trata-se de uma interface que permite a conexão dos demais módulos de sensoramento ao computador de bordo. Possui 8 entradas analógicas absolutas multiplexadas (conversão A/D de 12 bits), 24 linhas de entrada ou saída digitais e 3 contadores programáveis. A UAS opera em modo de acesso direto à memória (DMA), transferindo sinais digitalizados para um *buffer* de memória interna do PC. A base de tempo é de 1 μ s.
- b) BPE: botões de parada de emergência. São botões do tipo soco instalados em paralelo, estrategicamente distribuídos sobre o veículo. Quando algum destes botões é acionado, uma interrupção de hardware é ativada. A rotina de tratamento desta interrupção executa o procedimento de parada do AGV;

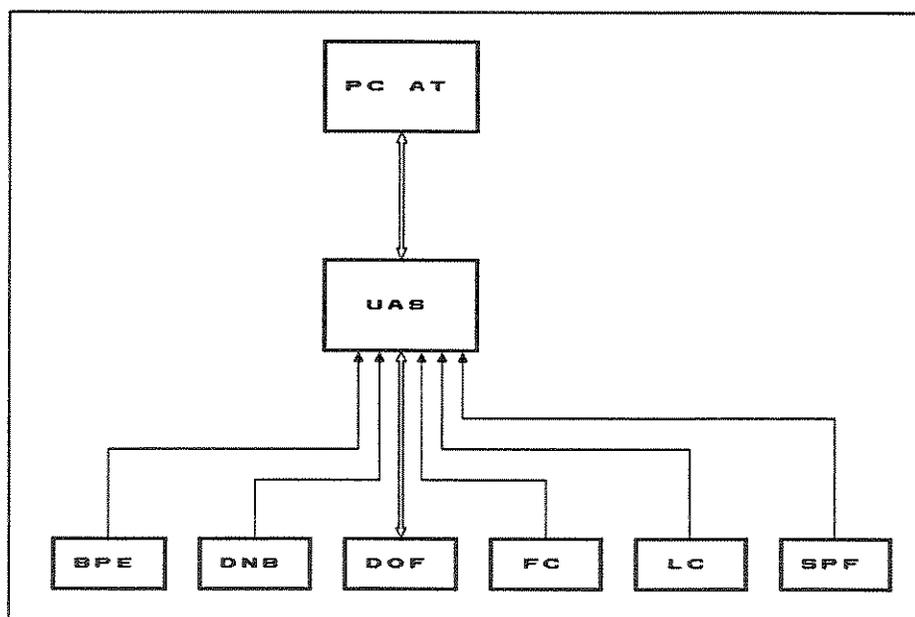


fig.3.4 - diagrama de blocos do módulo de sensoramento

- c) DNB: detector de nível de tensão do banco de baterias. Sinaliza a queda da carga da bateria a um nível crítico, indicando a necessidade de recarga;

- d) DOF: detector de obstáculos frontais. Trata-se de um sonar cujo sensor é instalado frontalmente ao veículo. Assim, obstáculos posicionados na trajetória do veículo são detectados (assim como a distância entre o veículo e o obstáculo), sendo possível o tratamento do evento por uma rotina de software;
- e) FC: fins de curso. São utilizados para a limitação do ângulo de rotação do eixo de direção;
- f) LC: leitor de códigos. Realiza a leitura de marcas refletivas fixas no solo. Estas marcas podem ser utilizadas para indicar a posição física de um ponto do percurso do AGV (por exemplo, uma estação de trabalho como ponto de parada);
- g) SPF: sensor de posicionamento sobre a faixa. Este sensor gera um sinal de erro proporcional à fuga do veículo em relação ao centro da faixa indicadora de percurso;

3.4.2 - Interface Controladora dos Inversores PWM [13]

Foi desenvolvida uma interface para ser utilizada em microcomputador PC XT/AT ou compatível.

Utilizou-se neste desenvolvimento o circuito integrado HEF4752V, que emprega tecnologia **LOC MOS** [16,17], especialmente desenvolvido para produzir pulsos de controle para ponte de potência em inversores trifásicos que empregam tanto transistores como tiristores.

Para a operação do HEF4752 V são necessários vários sinais de forma de onda quadrada com fator de ciclo de 50%, sendo que um deles controla a frequência e o outro o valor eficaz da tensão sintetizada, o que torna possível, dentro de certos limites, manter a relação tensão/frequência constante [18] na saída do inversor, possibilitando, desta forma, o controle das características de operação de cada motor.

Para obter os sinais de controle do HEF 4752V, utilizou-se VCOs (Osciladores Controlados por Tensão), cujas tensões de controle são fornecidas através de conversores D/A de 12 bits.

Uma vez que os VCOs geradores de sinais de controle operam em malha aberta e em face da sensibilidade que os mesmos apresentam em relação à tensão de alimentação dos sistema, incorporou-se ao projeto um frequencímetro, implementado através de um divisor programável, que permite o levantamento das "funções de transferência" dos mesmos, no instante inicial da operação, bem como torna possível a verificação das frequências por parte do programa de controle.

A fig.3.5 mostra o diagrama de blocos da interface, onde são evidenciadas as partes mais importantes do circuito projetado.

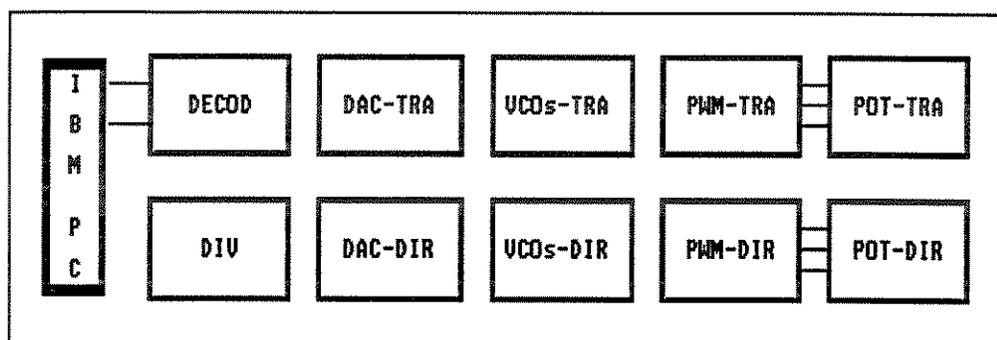


fig.3.5 - diagrama de blocos da interface controladora dos inversores PWM

- DECOD: decodifica os endereços necessários para os periféricos que fazem parte do controlador;
- DAC-TRA/DAC-DIR: são constituídos de conversores D/A de dois canais, através dos quais são geradas as tensões analógicas de controle dos VCOs que produzem os sinais de controle da frequência e valor eficaz da tensão sintetizada pelo HEF 4752V;
- VCOs-TRA/VCOs-DIR: são os osciladores controlados por tensão que geram os sinais de controle utilizados pelo HEF 4752V;
- DIV: baseado no divisor programável 8254 que contém três divisores de 16 bits, é utilizado na função de frequencímetro e para gerar o sinal de controle do tempo de intertravamento dos sinais PWM gerados pelo HEF 4752V;
- PWM-TRA/PWM-DIR: constituem os geradores de pulsos PWM propriamente ditos, tanto de tração como de direção, aos quais estão associados os circuitos de controle de partida/parada e reversão de rotação;

- POT-TRA/POT-DIR: são os *drives* de potência, tratados no item 3.4.3.

3.4.3 - Drive de Potência [12]

Os inversores utilizados nos sistemas de tração e direção são do tipo fonte de tensão configurados topologicamente em ponte trifásica, tendo transistores **MOSFET** como dispositivos de chaveamento (fig.3.6). A tensão de entrada de cada *drive* é fornecida através de um banco de baterias e a saída alimenta um motor de indução trifásico tipo gaiola de esquilo. O inversor está disposto para trabalhar no modo de operação contínuo ou de condução de 180°, controlado pelo sistema de modulação de largura de pulsos PWM.



fig.3.6 - inversores de potência

São utilizados transistores **MOSFET** devido a sua alta velocidade de chaveamento, boa estabilidade térmica e por necessitar de circuitos simples no acionamento de porta. Os diodos intrínsecos dos **MOSFETs** são utilizados como diodos de recuperação.

Foram testados no inversor dois tipos de circuito de acionamento de porta:

- a) com isolamento óptico através de optoacopladores ;

b) com isolamento magnético através de um sistema de onda portadora de 1 MHz [19].

No circuito de acionamento óptico, é utilizada uma fonte chaveada com 4 saídas simétricas isoladas para os circuitos de acionamento de porta de cada inversor.

No circuito de acionamento com acoplamento magnético, se utiliza uma fonte chaveada com somente uma saída. Além disso, este circuito permite o uso de núcleos de ferrite de pequenas dimensões para o isolamento dos sinais de comando do inversor.

Os *drives* possuem um circuito de proteção contra sobretensões transitórias internas, e um circuito de proteção contra sobrecorrentes e curto-circuito. O primeiro circuito de proteção abrange o circuito *snubber* e o circuito de grampeamento, que permitem reduzir ou limitar os picos de sobretensão dentro dos valores de capacidade máxima dos **MOSFETs**. Além da proteção, estes dispositivos também provocam uma diminuição das perdas nos **MOSFETs**, fazendo com que a resistência interna do **MOSFET** seja mais estável, pois modificam as taxas dv/dt melhorando as condições do **MOSFET** [20,21,22,23]. A proteção contra sobrecorrentes e curto-circuito é fornecida para cada transistor do inversor, através de circuitos de sensoriamento dos circuitos de proteção.

3.5 - Módulos de Software

Foi desenvolvido um programa para o controle das operações do AGV/LCA. Como filosofia para o desenvolvimento do *software*, buscou-se uma estrutura modular, onde funções importantes ficassem agrupadas em módulos, e a interação entre os diversos módulos do programa permitisse o controle das operações do AGV, de acordo com o comportamento esperado do sistema.

O programa foi implementado de forma sequencial, porém os módulos foram concebidos levando-se em consideração uma futura implementação de forma concorrente.

Na fig.3.7 são mostrados os módulos que compõem o programa de controle do AGV.

- **MÓDULO CHM:** é responsável pela comunicação homem-máquina. Estabelece um meio de comunicação entre o operador e o **AGV**. Faz a leitura de arquivos, do *mouse*, do teclado e envia mensagens para a tela (utilizada apenas na fase de desenvolvimento).
- **MÓDULO COM:** é responsável pela comunicação entre o computador de bordo do veículo e o computador supervisor, através de uma interface de comunicação RS 422. Este módulo foi previsto no desenvolvimento do programa, mas ainda não foi implementado.

O programa de controle das operações do **AGV/LCA** é executado no computador de bordo do veículo e, através de seus módulos, faz a integração de todo o sistema.

Maiores considerações sobre o programa são feitas no capítulo 5, que trata da implementação do sistema e em particular do *software*.

3.6 - Referências Bibliográficas

- [1] Hollier, R.H., Ed., (1987). "Automated Guided Vehicle Systems (International Trends in Manufacturing Technology)", Bedford, IFS (Publications) Ltd & Berlin, Springer - Verlag.
- [2] Hammond, G., (1986). "AGVS at Work - Automated Guided Vehicle Systems", Bedford, IFS (Publications) Ltd & Berlin, Springer - Verlag.
- [3] Müller, T., (1983). "Automated Guided Vehicles", Bedford, IFS (Publications) Ltd & Berlin, Springer - Verlag.
- [4] Hollier, R.H., Ed., (1986). "Automated Guided Vehicles", Proc. of an Executive Briefing, Stratford-upon-Avon.
- [5] Hammond, G., Ed., (1986). "Automated Guided Vehicles Systems", Proc. of the 4th International Conference, Chicago.
- [6] Takahashi, T., Ed., (1987). "Automated Guided Vehicles Systems", Proc. of the 5th International Conference, Tokyo.
- [7] Eleutério, M.A., (1989). "Sistema de Controle para Veículo Auto- Guiado por Fita Refletiva", Dissertação de Mestrado, Curitiba, CEFET/PR.
- [8] Cozman, F.G. ...[et alii], (1990). "O Projeto de Veículos Autônomos de Transporte", 1º Simpósio de Automação Integrada, Curitiba, CEFET/PR: 119-123.
- [9] Ferreira E.D.e Paskulin,F.A., (1990). "AGVS (Sistemas Autônomos de Transporte), uma Opção para a Racionalização do Fluxo de Material e seu Potencial Aplicativo", 9º Seminário de Comando Numérico e Automatização Industrial, SOBRACOM: 16.01-16.24.
- [10] Hervella, C. , (1990). "Modelamento Dinâmico e Implementação de um Veículo Auto - Guiado (AGV) por Fita Refletiva via Simulação em Computador", Estágio em Iniciação Científica I, Campinas, FEE/UNICAMP.
- [11] Miyagi, P.E. ...[et alii], (1988). "Veículos Autônomos de Transporte e seus Controles", 3º Congresso Nacional de Automação Industrial: 226-231.

- [12] Sánchez,V.A.B., (1993). "Projeto de Inversor por Fonte de Tensão para Motores Trifásicos de Indução Tipo Gaiola de Esquilo", Dissertação de Mestrado, Campinas, FEE/UNICAMP.
- [13] Fontes,I.R., (1993). "Controle de Velocidade de Motor de Indução Trifásico alimentado por Inversor PWM através de Microcomputador", Dissertação de Mestrado, Campinas, FEE/UNICAMP.
- [14] Pilla Jr.,V. ...[et alii], (1992). "Implementação de um Eletro/Vectorcardiógrafo baseado em um Microcomputador", 9º Congresso Brasileiro de Automática, Vitória-ES, UFES, vol.2 : 970 - 975.
- [15] Costa,S.E.G. ...[et alii], (1992)."Sistema de Controle de Direção para um Veículo Auto-Guiado", 9º Congresso Brasileiro de Automática, Vitória - ES, UFES, vol.1:390 - 394.
- [16] Starr, B. G. e Van Loon, J. C. F., (1980). "LSI circuit for AC motor speed control", Electronic Components and Applications, vol.2, nº 4: 219-229.
- [17] Houldsworth, J. A. e Rosink, W. B., (1980). "Introduction to PWM speed control-system for 3-phase AC motors", Electronic Components and Applications, vol.2, nº2: 66-79.
- [18] Krause, P. C., (1987). "Analysis of Electric Machinery", McGraw-Hill.
- [19] Swanepoel P. H., Van Wyk J. D. (1989). "Transformer-coupled Direct base drive Technology for high-power/high-voltage Bipolar transistor PWM converters", IEEE Transactions on Industrial Applications, vol.25, nº 6: 1158-1166.
- [20] Clemente S., Pelly B. R. (1983). "Understanding Power MOSFET, Switching Performance", Solid State Electron, vol.26, nº12: 1133-1141.
- [21] Mc Murray, W., (1980). "Selection of snubbers and clamps to optimize the design of transistor switching converters", IEEE Transactions Industrial Applications, vol. IA-16, nº 4: 513-525.
- [22] Nair B., Sen, P. C. (1987). "Voltage Clamp circuits for a Power MOSFET PWM inverter", IEEE Transactions Industrial Applications, vol. IA-23, nº 5: 911-920.
- [23] Severns R. (1981). "dv/dt Effects in MOSFET and Bipolar Junction Transistor Switches", IEEE Power Electronics, Specialists Conference: 258-264.

4 - PROJETO DO CONTROLADOR E SIMULAÇÕES EM COMPUTADOR DIGITAL

4.1 - Descrição do Problema de Controle

O trabalho foi desenvolvido sob o "ponto de vista de sistema" [1] onde a análise, indentificação e síntese de sistemas são baseadas nas informações (sinais), ou seja, nas relações entrada-saída.

Dentro desta metodologia, a análise de sistemas está relacionada a um modelo e suas propriedades, e não à natureza do mesmo - elétrica, mecânica etc.

4.1.1 - Ciclo de Desenvolvimento [2]

Para o projeto do sistema de controle foi adotado o ciclo de desenvolvimento clássico (fig.4.1).

Na parte A da figura vemos a primeira fase onde, a partir de um sistema físico real e de uma descrição do mesmo, faz-se a modelagem do sistema. De uma forma geral, o sistema pode ser modelado através de diagramas esquemáticos onde são considerados componentes do tipo elétrico, mecânico e hidráulico. A partir do modelo físico, é feita a representação matemática do sistema, através de equações diferenciais. Concluindo a fase de modelagem do sistema, são feitas a identificação dos parâmetros e a análise do modelo obtido.

A segunda etapa é referente ao projeto do controlador. São escolhidas técnicas para a síntese do controlador, em função das características do modelo obtido e da filosofia que será empregada no projeto

- e.g. se o modelo é contínuo ou discreto, linear ou não-linear, variante ou invariante no tempo, se será feita realimentação de saída ou de estado. Nesta fase, são feitas análises do conjunto sistema + controlador no domínio do tempo (simulações) e no domínio da frequência (Bode, Nyquist).

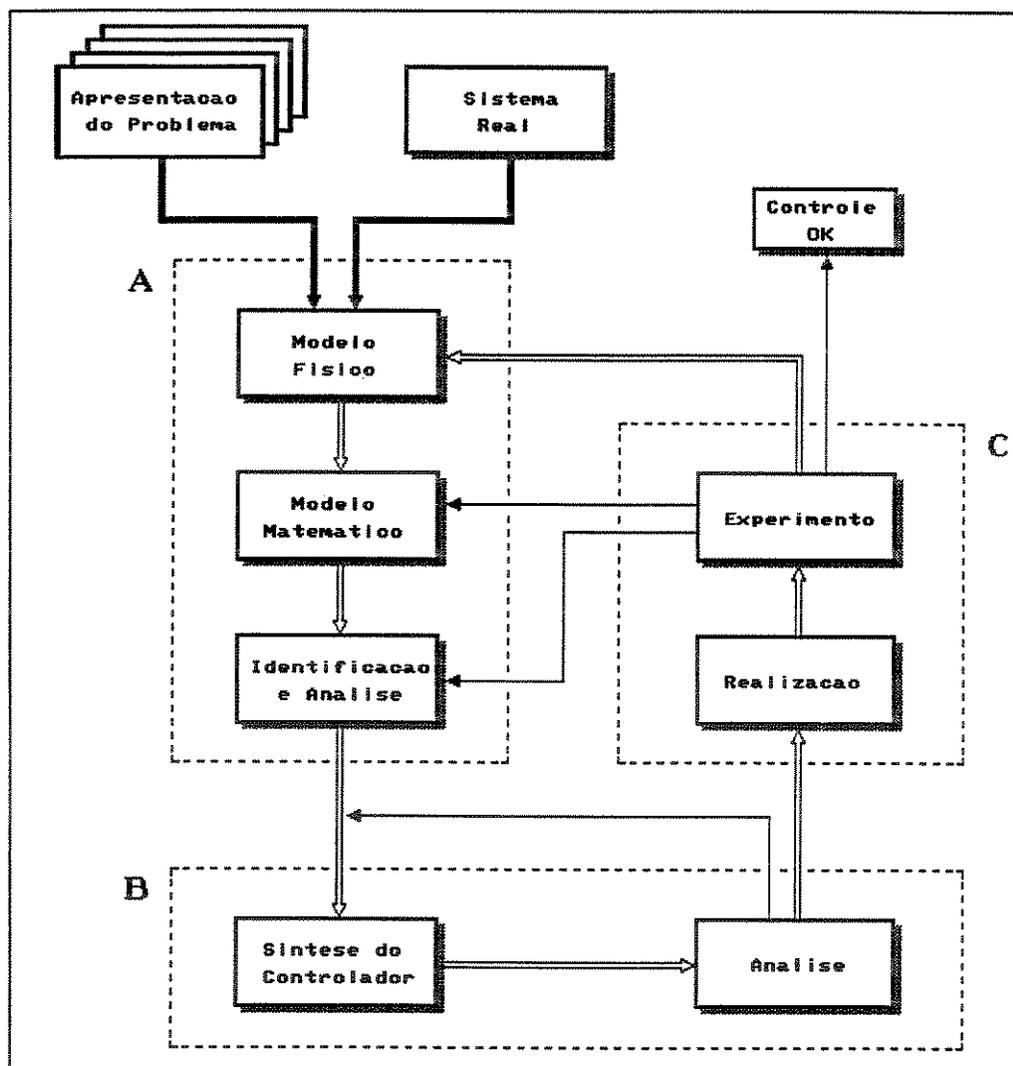


fig.4.1 - ciclo de desenvolvimento clássico

Na parte C temos a implementação do sistema de controle, iniciando com simulações *hardware-in-the-loop*, onde gradativamente são incorporados componentes reais na simulação e finalmente a implementação.

As diversas fases do ciclo de desenvolvimento interagem, de forma que a cada nova etapa as informações obtidas contribuem com fases anteriores.

4.1.2 - Abordagem para a Modelagem do AGV/LCA

As três fases descritas no ciclo de desenvolvimento - modelagem, síntese do controlador e implementação - fizeram parte do trabalho.

A idéia fundamental foi a obtenção de um modelo o mais simples possível - escalar, de baixa ordem e linear - para a representação do sistema. Caso este modelo não represente as características do sistema em estudo, busca-se outro de complexidade crescente até que seja encontrado um modelo adequado. A verificação da validade ou não do modelo se dá através de simulações e experimentação.

O modelo contínuo do sistema foi discretizado e o controlador foi obtido no domínio discreto.

Nas seções seguintes são descritas as fases de modelagem do veículo, de síntese do controlador e de simulações em computador digital. No capítulo 05 são feitas considerações sobre a implementação.

4.2 - Modelagem do Sistema [3]

Dentro do contexto geral do Projeto AGV, espera-se do sistema de controle de direção que, uma vez fornecida a informação sobre a trajetória, o veículo siga seu percurso sem a intervenção de um operador. Sob o ponto de vista particular de engenharia de controle, deve ser projetado um controlador que force o veículo a manter-se sobre a trajetória.

Baseado no princípio de que o modelo deve ser o mais simples possível, procura-se a obtenção de um modelo do carro que tenha como entrada o ângulo (θ) aplicado ao bloco de direção, em relação ao eixo longitudinal do veículo, e como saída a posição do veículo, através de suas coordenadas (x e y) no plano.

Uma vez que a trajetória desejada é conhecida (determinada pela fita refletiva), conhecendo-se a posição do veículo pode-se obter a diferença entre essa posição e a trajetória. Considerando a diferença como a saída do sistema, chamada de $D(t)$ e fazendo como entrada de referência $R(t)$ igual a zero, tem-se o seguinte sistema em malha fechada (fig.4.2):

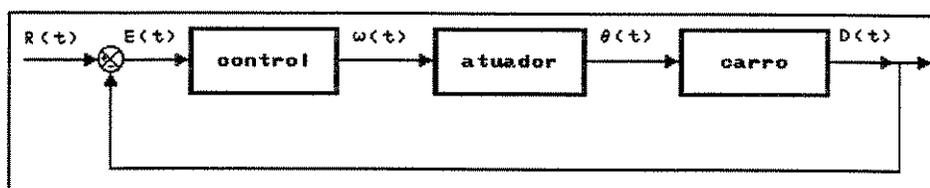


fig.4.2 - sistema em malha fechada

onde *control* representa o controlador, *atuador* o conjunto acionamento + motor e *carro* o modelo do AGV.

Sendo o sistema representado desta forma, tem-se como variável de controle o ângulo θ e como variável controlada o erro $D(t)$ da posição do veículo em relação à trajetória.

4.2.1 - Modelo Geométrico Não-Linear do AGV

O modelo obtido para o veículo levou em consideração apenas a sua geometria e por este motivo foi chamado de modelo geométrico.

A velocidade de deslocamento do carro e a carga que ele transporta são consideradas constantes.

A fig.4.3 mostra as grandezas utilizadas no modelo geométrico do carro.

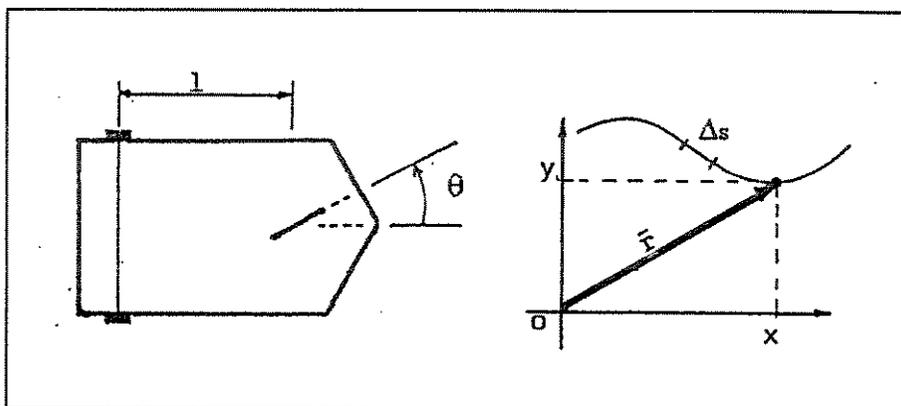


fig.4.3 - grandezas utilizadas na modelagem do veículo

- l : é a distância entre as rodas traseiras e a roda dianteira;
- θ : é o ângulo que o bloco de direção faz com o eixo longitudinal do carro;
- \vec{r} : é o vetor posição do carro com coordenadas x e y em relação a um sistema de referência inercial;
- s : é a distância percorrida sobre a trajetória.

Considerando apenas o movimento de tração com um valor de θ constante, o veículo irá descrever uma trajetória circular de raio R , de maneira que pode-se obter a relação entre R , l e θ (fig.4.4):

$$R = \frac{l}{\text{sen } \theta} \quad (4.1)$$

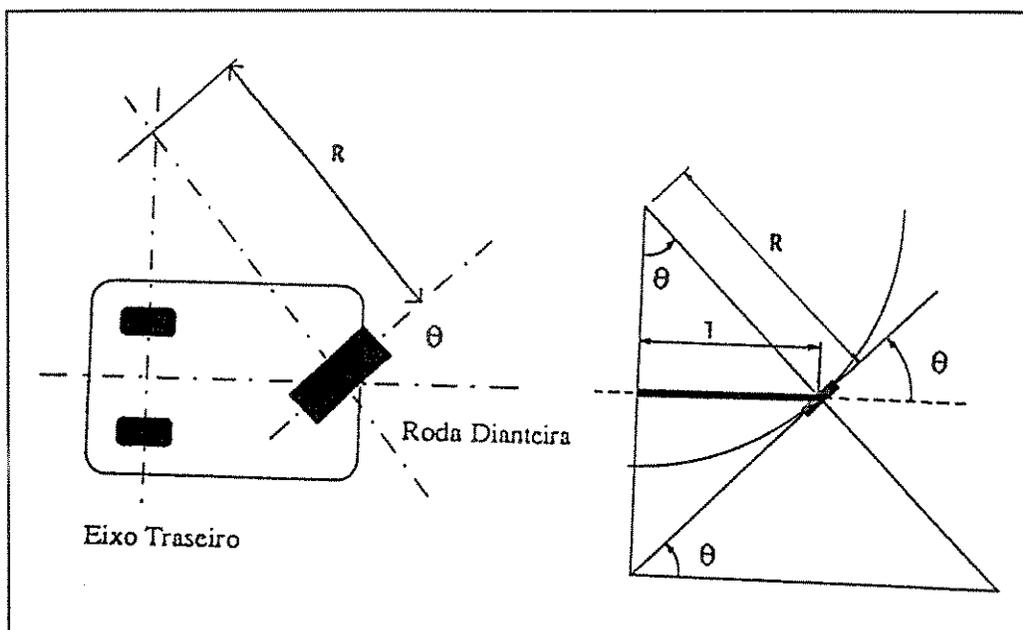
Da cinemática, a velocidade do carro é:

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{d\vec{r}}{ds} \frac{ds}{dt} = \frac{d\vec{r}}{ds} v \quad (4.2)$$

onde v é a velocidade escalar de deslocamento do carro.

A aceleração é dada por:

$$\frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = \frac{d}{dt} \left[\frac{d\vec{r}}{dt} \right] = \frac{d}{dt} \left[\frac{d\vec{r}}{ds} v \right] \quad (4.3)$$

fig.4.4 - relações entre R , l e θ

Considerando que a velocidade do veículo é constante ($\dot{v} = 0$) e aplicando a regra da cadeia em (4.3), tem-se:

$$\frac{d^2\bar{r}}{dt^2} = \frac{d}{ds} \left[\frac{d\bar{r}}{ds} v \right] \frac{ds}{dt} = \frac{d^2\bar{r}}{ds^2} v^2 \quad (4.4)$$

onde \dot{v} é a notação de Newton para a derivada primeira da variável v em relação ao tempo.

De (4.4) tira-se:

$$\frac{d^2\bar{r}}{ds^2} = \frac{d^2\bar{r}}{dt^2} \frac{1}{v^2} \quad (4.5)$$

Decompondo o módulo da aceleração nas suas componentes normal e tangencial, pode-se escrever:

$$\left| \frac{d^2\bar{r}}{dt^2} \right| = \left[\left(\frac{dv}{dt} \right)^2 + \left(\frac{v^2}{R} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.6)$$

Sendo a velocidade em (4.6) constante, de (4.5) e (4.6) pode-se escrever:

$$\left| \frac{d^2\bar{r}}{ds^2} \right| = \frac{1}{R} \quad (4.7)$$

Decompondo o módulo da aceleração em suas coordenadas cartesianas,

$$\ddot{x}^2 + \ddot{y}^2 = \left| \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} \right|^2 \quad (4.8)$$

de (4.1), (4.4), (4.7) e (4.8) tem-se:

$$\ddot{x}^2 + \ddot{y}^2 = \left(\frac{v^2 \operatorname{sen} \theta}{l} \right)^2 \quad (4.9)$$

Decompondo a velocidade nas suas componentes cartesianas e derivando o quadrado do módulo do vetor velocidade em relação ao tempo ($\dot{v}=0$):

$$\frac{d|v|^2}{dt} = 2\dot{x}\ddot{x} + 2\dot{y}\ddot{y} = 0 \quad (4.10)$$

Isolando \ddot{y} em (4.10) e substituindo em (4.9) obtemos \ddot{x} e fazendo o mesmo com \ddot{x} , tem-se:

$$\begin{cases} \ddot{x} = +\frac{v \operatorname{sen} \theta}{l} \dot{y} \\ \ddot{y} = -\frac{v \operatorname{sen} \theta}{l} \dot{x} \end{cases} \quad (4.11)$$

que são as equações que descrevem a trajetória do veículo.

Resultado idêntico é encontrado em [4].

Embora as equações acima tenham sido deduzidas para $\theta = \text{constante}$, elas permanecem válidas para θ variante no tempo, $\theta = \theta(t)$, mantendo obviamente a hipótese $v = \text{constante}$.

Uma análise aprofundada com relação ao modelo do AGV é feita em [5].

4.2.2 - Modelo Geométrico Linear do AGV

Tendo sido o modelo obtido não-linear, foram formuladas outras hipóteses no sentido de se encontrar um modelo linear que orientasse o projeto do controlador.

Considerando que a trajetória descrita pelo veículo é uma circunferência, é verdade que para um tempo pequeno ela pode ser aproximada por outra trajetória, resultante de um modelo linear.

Assim, do ponto de vista da linearização, a trajetória que mais se aproxima da circunferência é aquela que tem a mesma curvatura na origem.

Considerando que o veículo esteja numa trajetória retilínea e que, em $t = 0$, o ângulo θ sofra uma variação em degrau, fazendo com que $\theta \neq 0$. A função $D(t)$ é o erro observado entre a trajetória retilínea e a trajetória circular descrita pelo carro para $t > 0$ (fig.4.5):

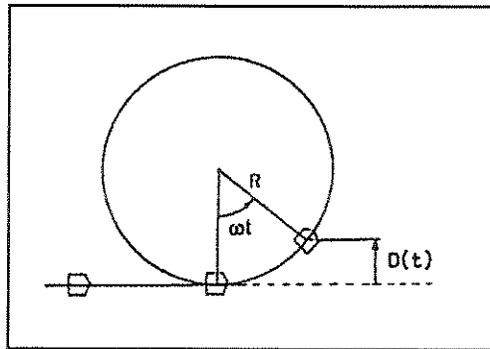


fig.4.5 - distância $D(t)$ entre a trajetória retilínea e a circular

$$D(t) = (1 - \cos \omega t)R \quad (4.12)$$

onde ω é a velocidade angular do carro, dada por $\omega = v/R$, sendo v a velocidade escalar do carro (constante) e R o raio da circunferência. Portanto, tem-se que:

$$D(t) = \left(1 - \cos \frac{vt}{R}\right)R \quad (4.13)$$

A expressão para $D(t)$ dada em (4.13) pode ser aproximada, para t pequeno, pela seguinte função:

$$D(t) \cong f(\theta)t^2 \quad (4.14)$$

Vamos supor que a relação (4.14) pode ser ainda aproximada por

$$D(t) \cong K_1 \theta^2 \quad (4.15)$$

onde K_1 é uma constante.

A forma da equação (4.15) nos permite propor como modelo simplificado para a relação entre $\theta(t)$ e $D(t)$ um duplo integrador, considerando que θ é constante durante um pequeno lapso de tempo, o que elimina a convolução, conforme mostra a figura 4.6.

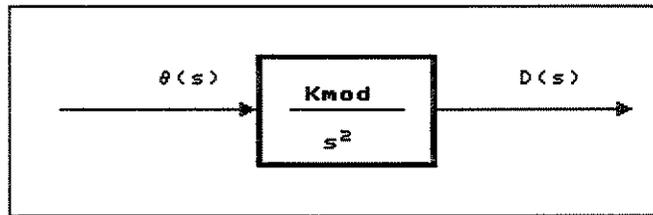


fig.4.6 - modelo linear do veículo aproximado por um duplo integrador

Na fig.4.6, K_{mod} é o ganho do modelo do veículo e é igual a $2 K_1$. Assim,

$$D(t) = \frac{K_{mod}}{2} \theta t^2 \quad (4.16)$$

Sendo K_{mod} uma constante, a equação (4.16) lineariza o modelo. Na próxima seção a aproximação feita é justificada e é determinado o valor de K_{mod} .

É importante observar que as simplificações realizadas são drásticas. Essas têm como objetivo apenas a obtenção de um modelo que oriente o projeto do controlador. Na seção 4.3 procurar-se-á validar o controlador obtido através de simulações feitas com o modelo geométrico não linear.

4.2.3 - Cálculo do Ganho em Malha Aberta

Chamando de ganho em malha aberta o ganho do conjunto atuador mais veículo, e representando este ganho por K , tem-se:

$$K = K_{atu} K_{mod} K_{discr} \quad (4.17)$$

onde:

- K_{atu} é o ganho associado ao atuador;
- K_{mod} o ganho do modelo do veículo;
- K_{dscr} o ganho que aparece na discretização do conjunto atuador + carro.

O sistema de acionamento foi considerado como um ganho K_2 , que relaciona a velocidade desejada para a movimentação do eixo do motor de direção com o valor da tensão a ele aplicada.

Devido ao fato de as constantes de tempo elétricas do motor serem muito menores que as constantes de tempo mecânicas envolvidas, considerou-se como modelo para o motor um integrador com ganho K_3 , tendo como entrada a tensão aplicada à máquina e como saída o ângulo descrito por um ponto do seu eixo.

Assim, pode-se representar o atuador como (fig.4.7):

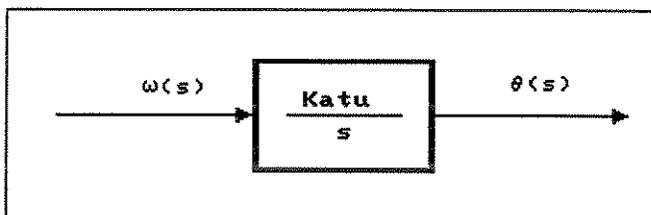


fig.4.7 - modelo do atuador

onde ω é a velocidade angular desejada do motor e K_{atu} é o produto entre K_2 e K_3 .

O valor de K_{atu} depende do *hardware* do sistema de acionamento e do motor, e é determinado no capítulo 5.

K_{mod} é obtido igualando-se os raios de curvatura das trajetórias circular e do modelo linearizado em $t = 0$, ou seja, no instante de aplicação do degrau, conforme discussão na seção 4.2.2.

Chamando de R_c o raio de curvatura da trajetória circular, dado por (4.1), e de R_p o raio de curvatura da trajetória do modelo linearizado e dado que a trajetória do modelo linearizado pode ser descrita por:

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = v^2 \\ y = K_4 t^2 \end{cases} \quad (4.18)$$

o módulo da aceleração pode ser calculado por:

$$\left| \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} \right|_{t=0} = (\dot{x}^2 + \dot{y}^2)^{1/2} \Big|_{t=0} = 2K_4 \quad (4.19)$$

De (4.5) e (4.7) pode-se escrever:

$$\left| \frac{d^2 \vec{r}}{ds^2} \right| = \left| \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} \right| \frac{1}{v^2} = \frac{1}{R_p} \quad (4.20)$$

De (4.19) e (4.20) tira-se:

$$R_p = \frac{v^2}{2K_4} \quad (4.21)$$

Lembrando que y da equação (4.18) e $D(t)$ da equação (4.16) representam a mesma grandeza (o desvio da posição do carro em relação à trajetória retilínea), vem:

$$y = K_4 t^2 = D(t) = \frac{K_{\text{mod}}}{2} \theta t^2 \quad (4.22)$$

Levando K_4 de (4.22) em (4.21), obtém-se o raio de curvatura para a trajetória do modelo linearizado:

$$R_p = \frac{v^2}{K_{\text{mod}} \theta} \quad (4.23)$$

Finalmente, igualando os raios de curvatura R_c (4.1) e R_p (4.23), obtém-se o valor de K_{mod} :

$$K_{\text{mod}} = \frac{v^2 \text{sen} \theta}{l \theta} \quad (4.24)$$

Sendo que para uma variação do ângulo θ no intervalo $0 < \theta \leq 1.1$ radianos (entre 0° e 63.03°) - que é uma faixa de variação razoável para o ângulo de direção do veículo, $1 > \text{sen} \theta / \theta \geq 0.810$, considerou-se um valor médio de $\text{sen} \theta / \theta$ igual a 0.9.

Assim, a equação (4.24) é linearizada e tem-se como ganho do modelo geométrico linear do AGV:

$$K_{\text{mod}} = 0.9 \frac{v^2}{l} \quad (4.25)$$

Através de simulações, observou-se que o sistema em malha fechada apresenta melhores resultados, em termos de resposta, com um ganho K_{mod} igual a:

$$K_{\text{mod}} = 1.25 \frac{v^2}{l} \quad (4.26)$$

Na seção 4.4 são mostradas simulações que justificam a escolha.

Em [4], a partir das coordenadas do veículo (x e y obtíveis em (4.11)) e sendo conhecidas as coordenadas de um ponto de uma trajetória qualquer (X_r, Y_r), lemos que a distância percorrida pelo veículo entre os dois pontos, em particular para os casos das trajetórias retilínea e circular.

No caso da trajetória retilínea os autores encontraram a mesma expressão para K_{mod} , onde o valor constante é igual a 1, ou seja, $K_{\text{mod}} = v^2/l$.

A diferença no valor constante em relação à equação (4.25) deve-se à aproximação feita na linearização, quando $\text{sen}\theta/\theta$ foi considerado igual a 1.

Para a trajetória circular, o valor de K_{mod} difere também pelo valor constante.

O modelo simplificado do AGV foi discretizado a partir da sua função de transferência mostrada na figura 4.8, considerando um segurador de ordem zero [6].

Uma vez que o sistema apresenta uma inércia grande e que a sua velocidade máxima será, definida por projeto, de 1.00 m/s, adotou-se um período de amostragem de 5.00 ms. Sendo o tempo para a leitura e transferência do dado relativo ao erro $D(t)$ pelo sistema de aquisição de dados desprezível em relação ao tempo de 5.00 ms, não é necessária a utilização de transformada Z modificada.

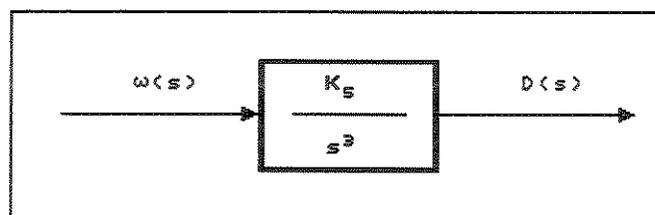


fig.4.8 - função de transferência do conjunto atuador + carro

Na fig.4.8, K_s é a associação do ganho do bloco atuador com o ganho do modelo do carro (o produto de K_{atu} por K_{mod}).

Através de uma tabela de Transformada Z [6], a partir da função de transferência obtém-se a função de transferência pulsada do sistema:

$$\frac{D(z)}{W(z)} = \frac{z^2 + 4z + 1}{z^3 - 3z^2 + 3z - 1} 0.2083 \cdot 10^{-7} K_s \quad (4.27)$$

de onde tiramos que $K_{\text{discr}} = 0.2083 \cdot 10^{-7}$.

Na equação (4.27), $D(z)$ e $W(z)$ correspondem, respectivamente, às transformadas Z do erro do carro em relação à trajetória e da velocidade desejada do motor de direção.

4.3 - Projeto do Controlador

Dado o modelo do sistema (4.27), foi projetado um controlador no domínio discreto.

Procurou-se obter um controlador que garanta uma resposta do sistema em malha fechada rápida e que não permita grande sobre-elevação. Estas imposições se devem à operação do sistema, de forma que o veículo não ultrapasse determinada distância da trajetória definida pela fita refletiva e também que o erro seja corrigido rapidamente, de modo a evitar que o carro se desloque muito sem estar sobre a fita refletiva.

O controlador foi projetado pelo método da alocação de pólos [7], num processo de tentativa-e-erro.

Foi utilizada uma ferramenta computacional para auxiliar o projeto onde, dada a posição desejada dos pólos em malha fechada, era fornecida a equação do controlador que garantia a alocação dos pólos o mais próximo do valor especificado. Obtida a equação do controlador, era verificada a estabilidade do sistema.

Para os pólos complexos em $0.5 \pm j 0.2$, $0.4 \pm j 0.3$ e um pólo real em 0.6, obteve-se a seguinte equação para o controlador:

$$\frac{W(z)}{D(z)} = \frac{0.195z^2 - 0.323z + 0.137}{z^2 + 0.405z + 0.181} K_{\text{cont}} \quad (4.28)$$

onde K_{cont} é o ganho do controlador e é dado por:

$$K_{\text{cont}} = \frac{1}{K} = \frac{1}{K_{\text{atu}} K_{\text{mod}} K_{\text{dscr}}} \quad (4.29)$$

Foi utilizado o pacote computacional SAPIC - Sistema de Análise e Projeto Integrado por Computador, versão 1.4, desenvolvido no LCMI/UFSC para a visualização do lugar das raízes e da resposta no tempo do sistema.

O sistema em malha aberta apresenta o seguinte *Root Locus* (fig.4.9):

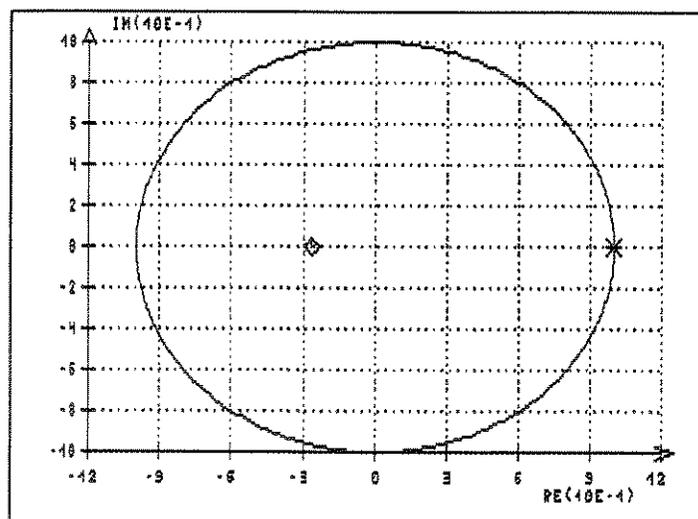


fig.4.9 - lugar das raízes do sistema em malha aberta

Na figura 4.9 são visualizados os pólos reais múltiplos sobre a circunferência unitária, de valor 1, e é mostrado o zero real de valor -0.268. O outro zero não aparece na figura e tem valor -4.732.

Na fig.4.10 vemos o lugar das raízes para o sistema em malha fechada, com o ganho variando entre 0 e 1, onde vemos os pólos alocados em $0.5 \pm j0.2$, $0.4 \pm j0.5$ e 0.6.

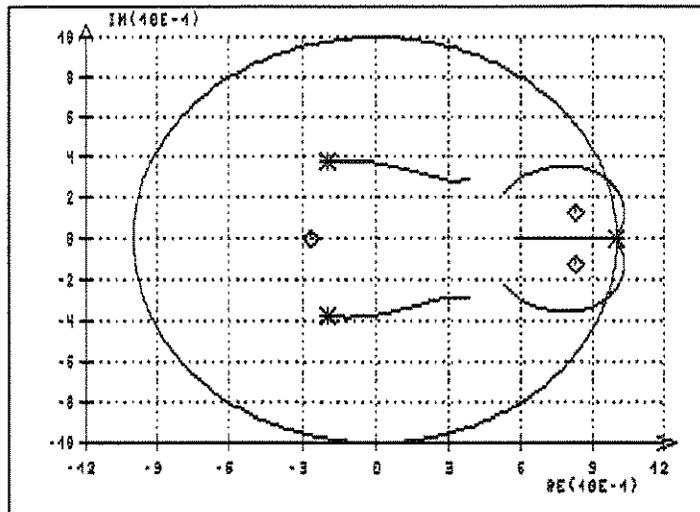


fig.4.10 - lugar das raízes do sistema em malha fechada, com ganho variando entre 0 e 1

Na fig.4.11 o ganho varia entre 0 e 0.4, mostrando o limite inferior do ganho para o qual o sistema é estável.

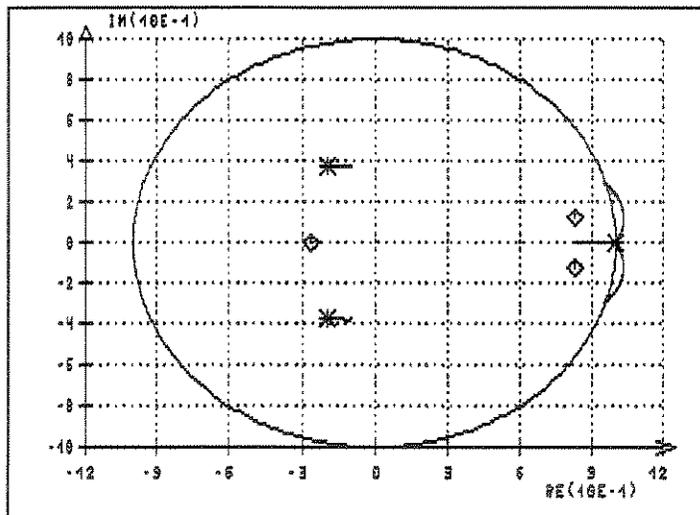


fig.4.11 - lugar das raízes do sistema em malha fechada, com ganho variando entre 0 e 0.4

Na fig.4.12 é mostrado o limite superior para a variação do ganho do controlador, permanecendo o sistema estável (o ganho varia entre 0 e 1.6).

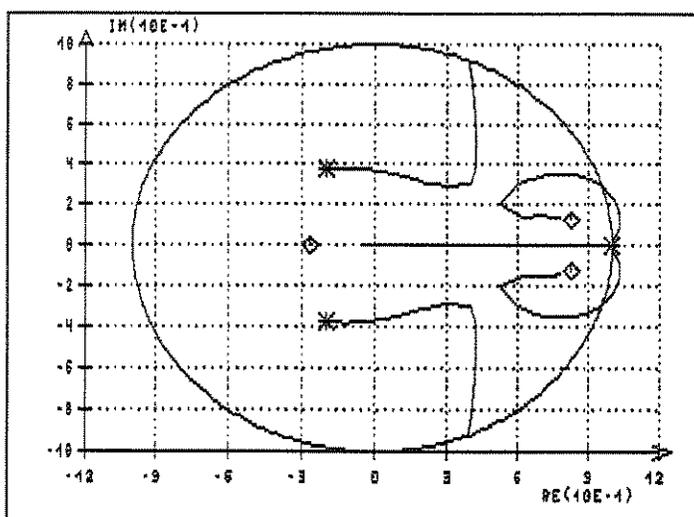


fig.4.12 - lugar das raízes do sistema em malha fechada, com ganho variando entre 0 e 1.6

Para o sistema linear, portanto, o controlador tem uma faixa de variação de $\pm 60\%$ do valor do ganho, permanecendo o sistema estável.

Aplicando uma entrada do tipo degrau, de 5.00 mm, que é um valor razoável em termos práticos, uma vez que a velocidade máxima do veículo é 1.00 m/s e o tempo de amostragem 5.00 ms, o sistema apresenta a seguinte resposta no tempo (fig.4.13):

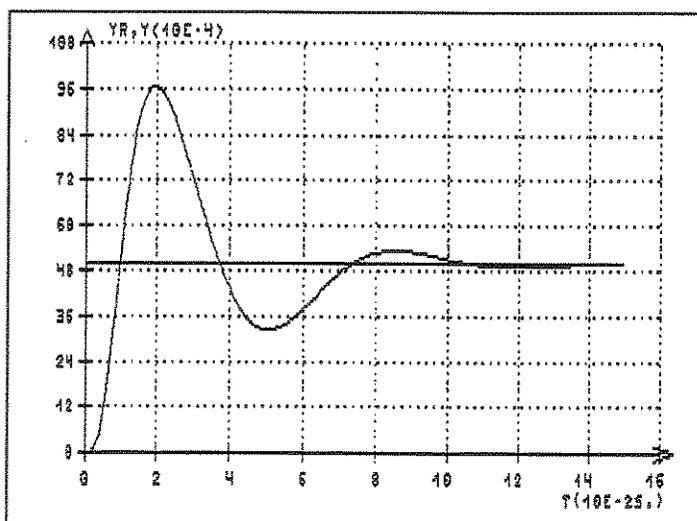


fig.4.13 - resposta no tempo do sistema em malha fechada a uma entrada degrau

Na figura 4.13, observa-se que o sistema se estabiliza num tempo pequeno.

Dada a ordem de grandeza do erro esperado na operação do veículo, a sobre-elevação é aceitável.

No próximo capítulo são mostrados o significado físico dos sinais de entrada e saída de cada bloco do sistema em malha fechada mostrado na fig.4.2.

O controlador aplicado ao sistema linear mostra-se eficiente no que diz respeito aos critérios de desempenho. Na próxima seção são apresentadas simulações aplicando o controlador ao sistema não-linear, e daí então se poderá concluir sobre a validade ou não da ação do controlador sobre o sistema, como etapa anterior à implementação.

4.4 - Simulações em Computador Digital

Foram feitas diversas simulações em computador digital, com o objetivo de verificar-se o comportamento do sistema, utilizando o pacote SSA - Sistema de Simulação Analógica, versão 1.5, desenvolvido no LCA/FEE [8].

O integrador adotado é baseado no método de Adams-Bashforth (2ª ordem).

Na fig.4.14 é mostrada a simulação do modelo não-linear dado pelas equações (4.11), quando o ângulo θ da roda de direção vale 0.9 rad e a velocidade é igual a 1.00 m/s. Pode-se observar que o veículo perfaz uma trajetória circular.

As simulações auxiliaram a fase de projeto do sistema de controle pois, uma vez obtido um controlador, eram feitas simulações com o controlador aplicado ao sistema não-linear a analisado o comportamento do conjunto controlador + sistema.

Da mesma forma, através das simulações foram obtidas faixas de variação para o ganho do controlador e para a velocidade de deslocamento do carro, assim como o raio de curvatura mínimo da

trajetória, permanecendo o sistema estável, para servirem como referência na fase de implementação do sistema.

Em todas as simulações, partiu-se da hipótese que o veículo é inicialmente colocado sobre a trajetória, ou seja, $D(t)$ igual a zero, e que o controlador passa a atuar quando o veículo está em velocidade nominal. De fato, na implementação, o operador irá posicionar o veículo sobre a trajetória através do controle manual, e o controlador irá entrar em ação quando o veículo estiver em movimento, a uma velocidade que será inicialmente determinada através da simulação do sistema.

A trajetória adotada, definida por dois segmentos de reta, sendo um paralelo ao eixo x e o outro ao eixo y , unidos por um arco de circunferência, é considerada complexa por englobar as situações de entrada e saída de uma curva.

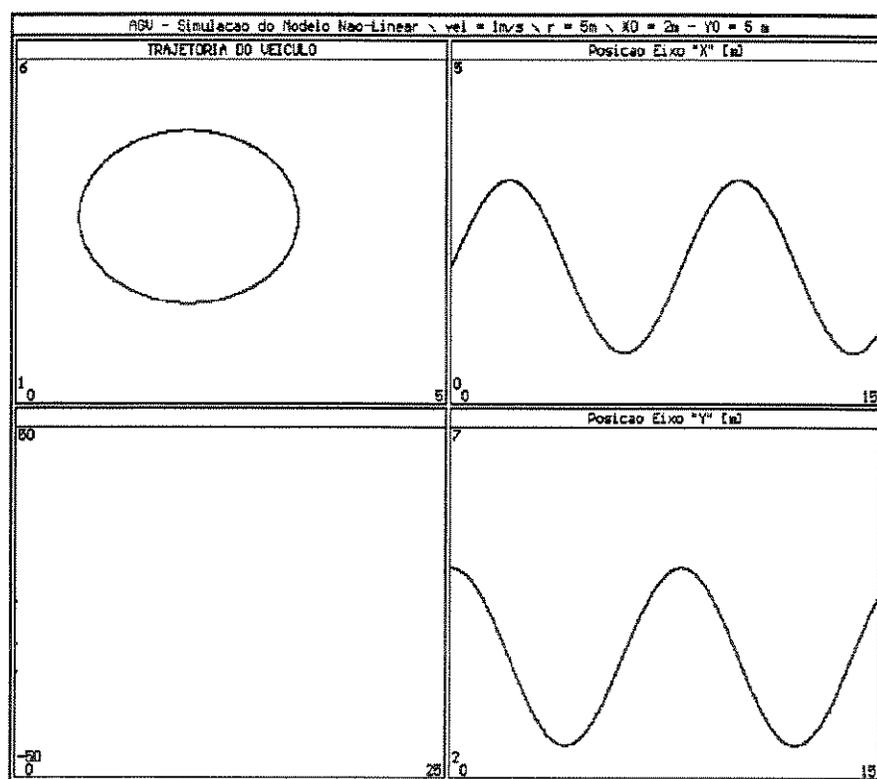


fig.4.14 - simulação do modelo não-linear do AGV

Nesta seção, são apresentados resultados de simulações em que foram variados os valores de velocidade (v), ganho do controlador (K_{cont}), raio de curvatura da trajetória (R) e tempo de amostragem (T), para se observar o comportamento do sistema sob diversas condições.

Foram impostas as seguintes restrições ao comportamento do veículo:

- nas entradas de curva, o veículo deve estabilizar as oscilações em relação à trajetória em até um quarto do comprimento da curva;
- nas saídas de curva, o carro deve estabilizar as oscilações em um comprimento máximo equivalente a um quarto da curva;
- o ângulo da roda de direção nunca pode ser superior à 90° .

Em todas as simulações, os resultados são mostrados em um quadro dividido em quatro partes, sendo que na parte superior esquerda é apresentada a trajetória descrita pelo veículo, na parte superior direita o erro $D(t)$ na entrada da curva, na parte inferior direita o erro $D(t)$ na saída da curva e na parte inferior esquerda a variação do ângulo θ do bloco de direção.

As velocidades consideradas foram 0.25 m/s, 0.50 m/s e 1.00 m/s, que serão utilizadas na implementação.

Foram feitas simulações com um raio para a curva de 5.00 m, que pelo fato de ser muito maior do que o comprimento do veículo (que é 1.00 m) não é considerado crítico e procurou-se, também através de simulações, obter um raio mínimo, onde um valor menor que o crítico implica na não satisfação das restrições.

Os ganhos nas diversas situações foram calculados de acordo com a equação (4.29):

$$K_{\text{cont}} = \frac{1}{K} = \frac{1}{K_{\text{atu}} K_{\text{mod}} K_{\text{dscr}}} \quad (4.29)$$

O valor de K_{atu} foi considerado igual à unidade (no capítulo 5 é determinado seu valor), de K_{dscr} igual a $0.2083 \cdot 10^{-7}$ para um período de amostragem de 5.00 ms e K_{mod} calculado por (4.26).

A maioria das simulações foi feita considerando-se um período de amostragem de 5.00 ms, sendo o tempo de 1.00 ms também utilizado em algumas simulações.

Para justificar o valor constante da equação que calcula o ganho do modelo do veículo apresentado em (4.26), são apresentadas simulações para as três velocidades, com raio de curvatura igual a 5.00 m, $T = 5.00$ ms e com o ganho sendo calculado de acordo com (4.25) e (4.29).

Assim, para a velocidade igual a 1.00 m/s,

$$K_{\text{mod}} = 0.9 \frac{v^2}{l} = 0.9 \quad (4.30)$$

e sendo o valor de K_{dscr} dado em (4.27), tem-se:

$$K_{\text{cont}} = \frac{1}{K_{\text{atu}} K_{\text{mod}} K_{\text{dscr}}} = \frac{1}{1 \cdot 0.9 \cdot 0.2083 \cdot 10^{-7}} = 53341868 \quad (4.31)$$

O resultado da simulação é mostrado na figura 4.15.

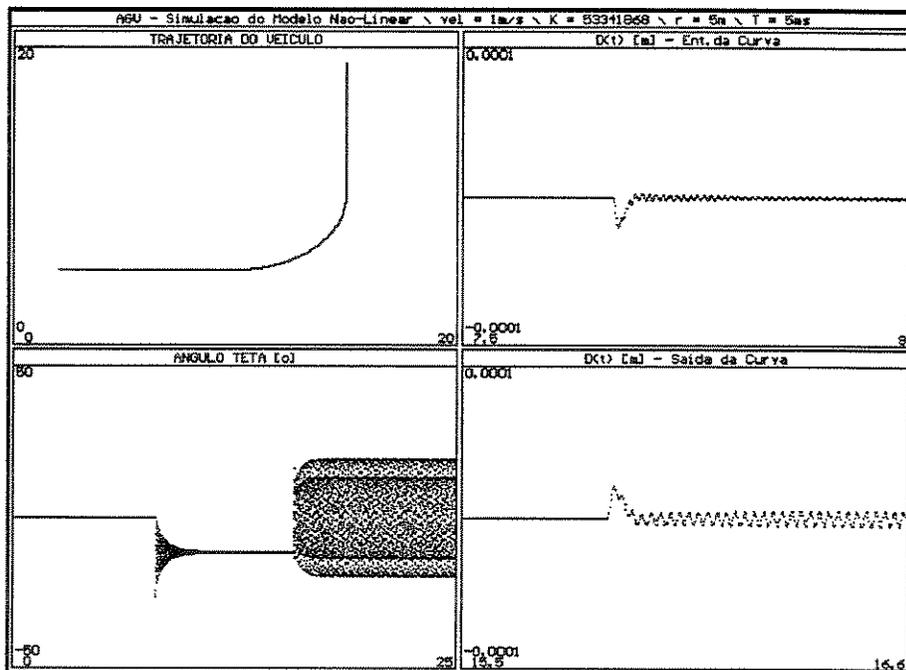


fig.4.15 - simulação do AGV com ganho calculado por (4.25), $v=1.00$ m/s

Na fig.4.16 é apresentada simulação para o veículo com velocidade de 0.5 m/s, quando $K_{\text{mod}} = 0.225$ e $K_{\text{cont}} = 213367472$.

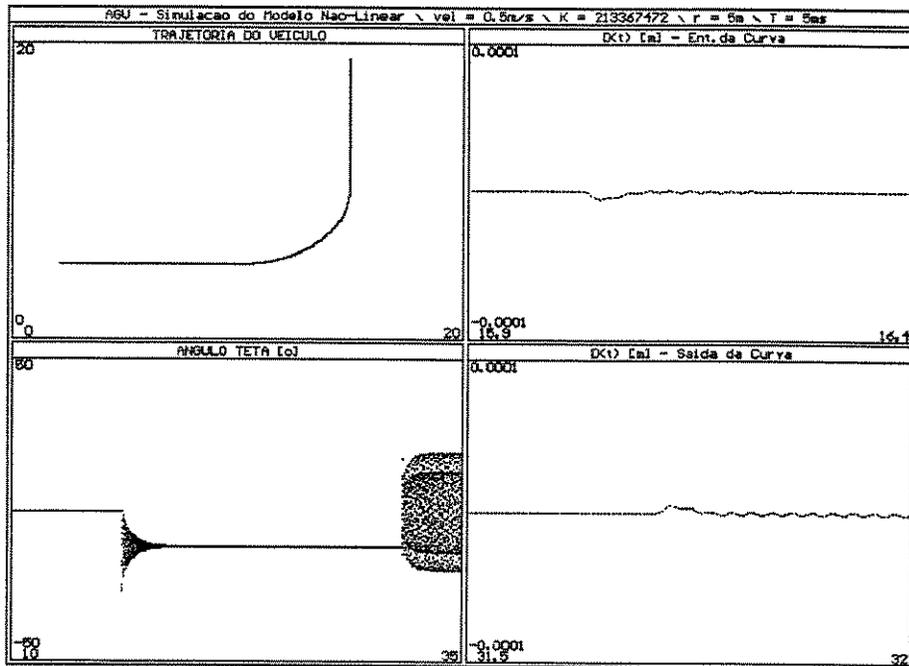


fig.4.16 - simulação do AGV com ganho calculado por (4.25), $v=0.50\text{m/s}$

Na fig.4.17, a velocidade é de 0.25 m/s , $K_{\text{mod}} = 0.05625$ e $K_{\text{cont}} = 853469888$.

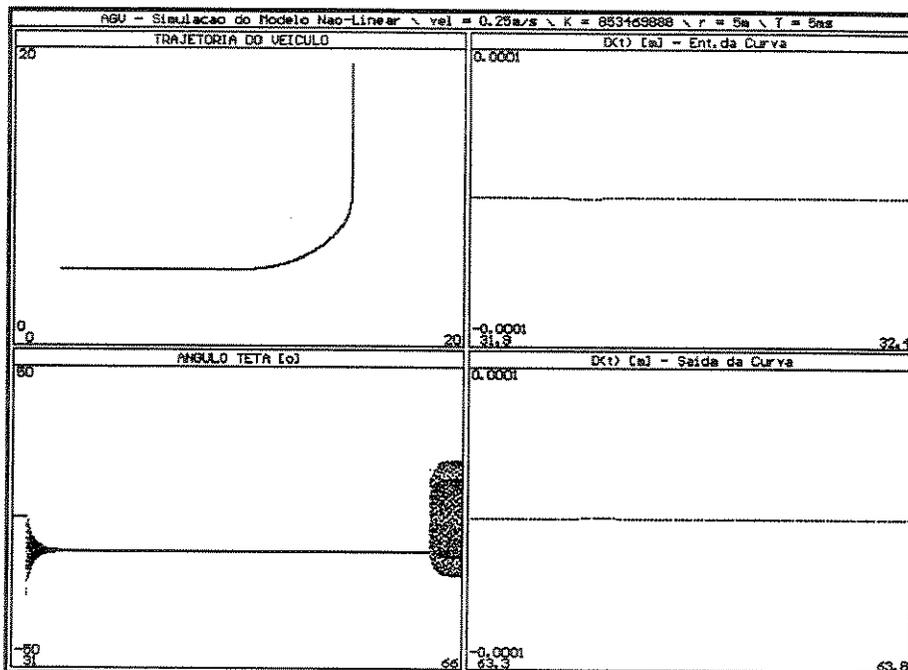


fig.4.17 - simulação do AGV com ganho calculado por (4.25), $v=0.25\text{m/s}$

As figuras 4.15 a 4.17 mostram a instabilidade do sistema nas saídas de curva. A partir desses resultados, foi-se variando o ganho do controlador até se obter respostas mais satisfatórias, de onde se chegou à equação (4.26).

Nas figuras 4.18 a 4.20 são mostradas simulações em que o veículo é submetido às mesmas condições das simulações apresentadas nas figuras 4.15 a 4.17, respectivamente, apenas com a diferença que o ganho do modelo é agora calculado através de (4.26).

Os ganhos do controlador obtidos através das equações (4.26) e (4.29), para as três velocidades, serão chamados de ganhos nominais.

Assim, na figura 4.18, $v = 1.00$ m/s, $K_{mod} = 1.25$, $K_{cont} = 38406144$ (ganho nominal).

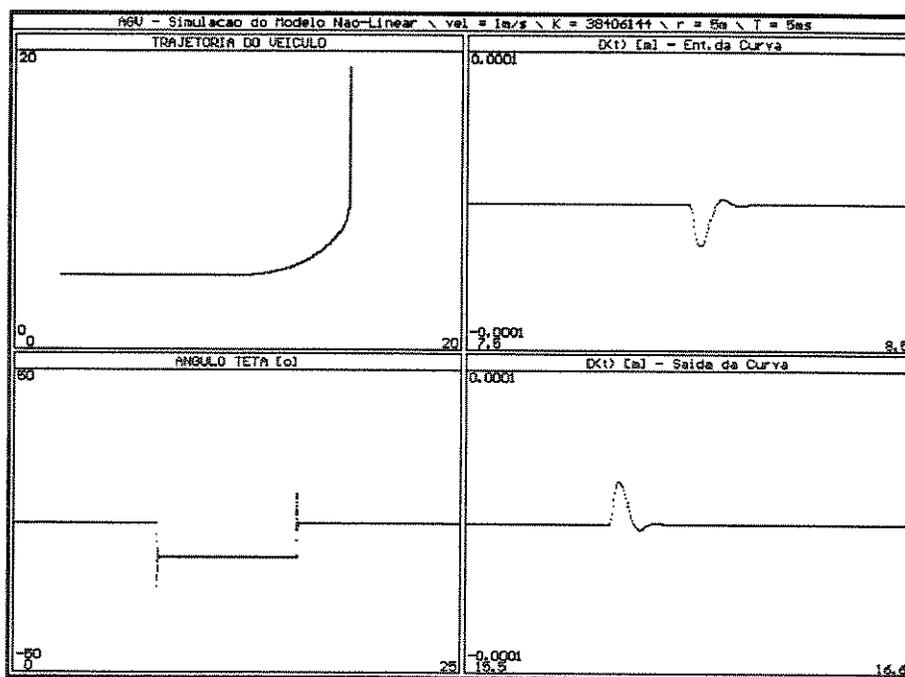


fig.4.18 - simulação do AGV com ganho calculado por (4.26), $v=1.00$ m/s

Na fig.4.19, $v = 0.50$ m/s, $K_{mod} = 0.3125$, $K_{cont} = 153624579$ (ganho nominal).

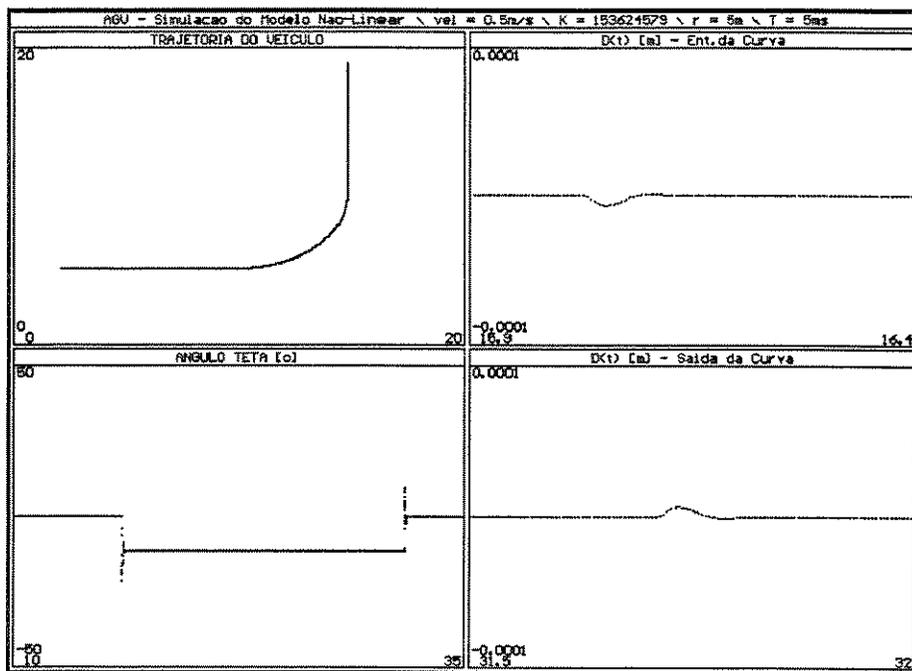


fig.4.19 - simulação do AGV com ganho calculado por (4.26), $v=0.50\text{m/s}$

Na fig.4.20, $v = 0.25 \text{ m/s}$, $K_{\text{mod}} = 0.7812$ e $K_{\text{cont}} = 614498319$ (ganho nominal).

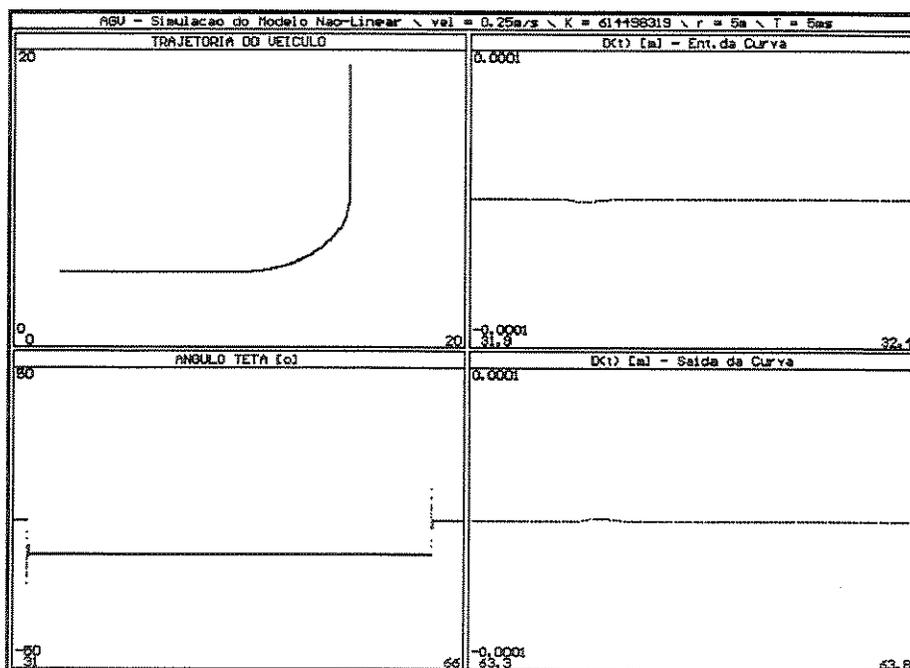


fig.4.20 - simulação do AGV com ganho calculado por (4.26), $v=0.25\text{m/s}$

Nas figs.4.18 a 4.20 fica evidente o melhor desempenho do sistema com o ganho do modelo calculado por (4.26).

Para se definir o raio mínimo da trajetória a ser seguida pelo AGV foram feitas diversas simulações, com $T = 5.00$ ms, K_{mod} dado por (4.27) e para as três velocidades.

Mantendo o ganho do controlador igual a 38406144 e a velocidade em 1.00 m/s, foi sendo diminuído o raio de curvatura, a partir de 5.00 m, até que se chegasse a uma situação limite onde as condições de operação não fossem mais atendidas.

Para um raio mínimo obtido, passou-se a variar o ganho do controlador, com velocidade constante, e obteve-se, assim, os limites superior e inferior do ganho para uma dada velocidade.

O mesmo procedimento foi repetido para as velocidades de 0.50 m/s e 0.25 m/s.

Para $v = 1.00$ m/s, $K_{cont} = 38406144$, $T = 5.00$ ms, chegou-se a um raio mínimo de 1.6m, conforme mostra a fig.4.21.

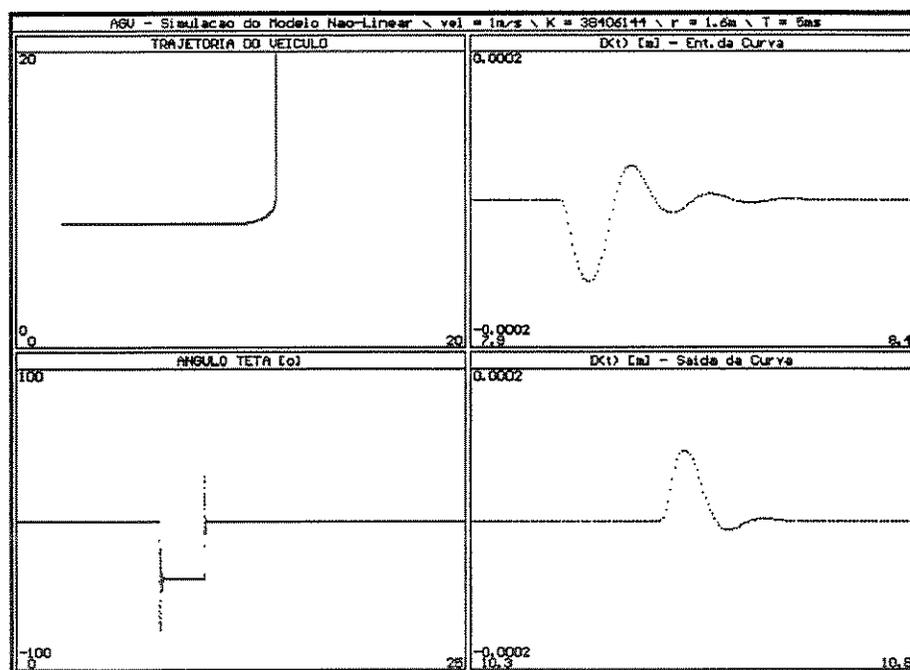


fig.4.21 - raio mínimo = 1.6m, $K_{cont} = 38406144$, $T = 5.00$ ms, $v = 1.00$ m/s

É importante notar que as oscilações aumentaram em tempo e amplitude, devido à condição mais adversa ao movimento do veículo imposta pelo raio de menor valor.

Obtido o raio mínimo e mantendo a velocidade constante (1.00 m/s), foi-se diminuindo o valor do ganho do controlador até um valor em que a resposta do sistema ainda atendesse às condições de operação, onde chegou-se $K_{cont} = 26884300$.

A resposta do sistema é mostrada na fig.4.22.

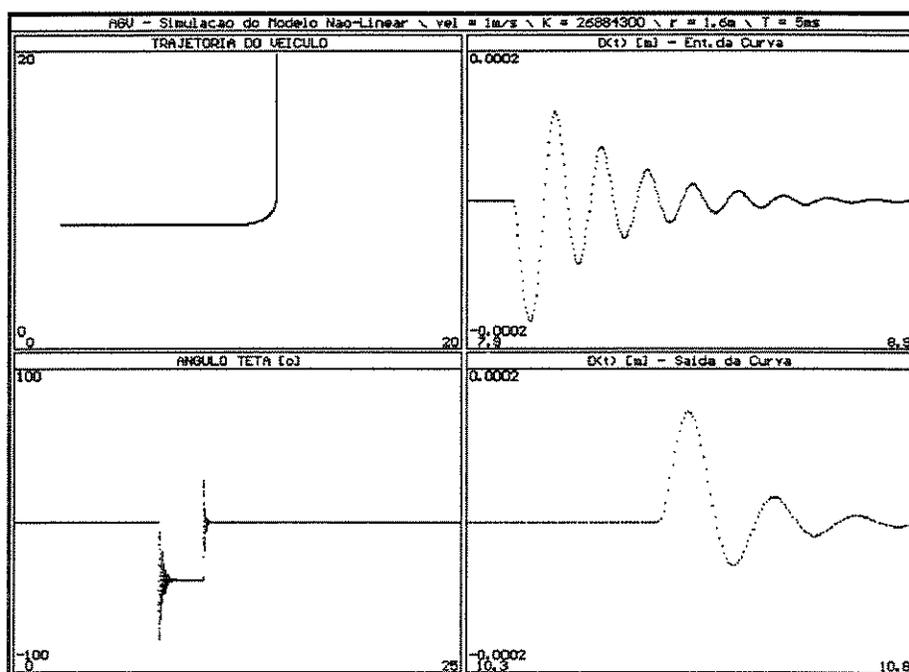


fig.4.22 - raio mínimo = 1.6m, $K_{cont} = 26884300$, $T = 5.00$ ms, $v = 1.00$ m/s

Da mesma forma, foi-se aumentando o ganho do controlador até que se encontrou o valor máximo $K_{cont} = 49927987$ (fig.4.23).

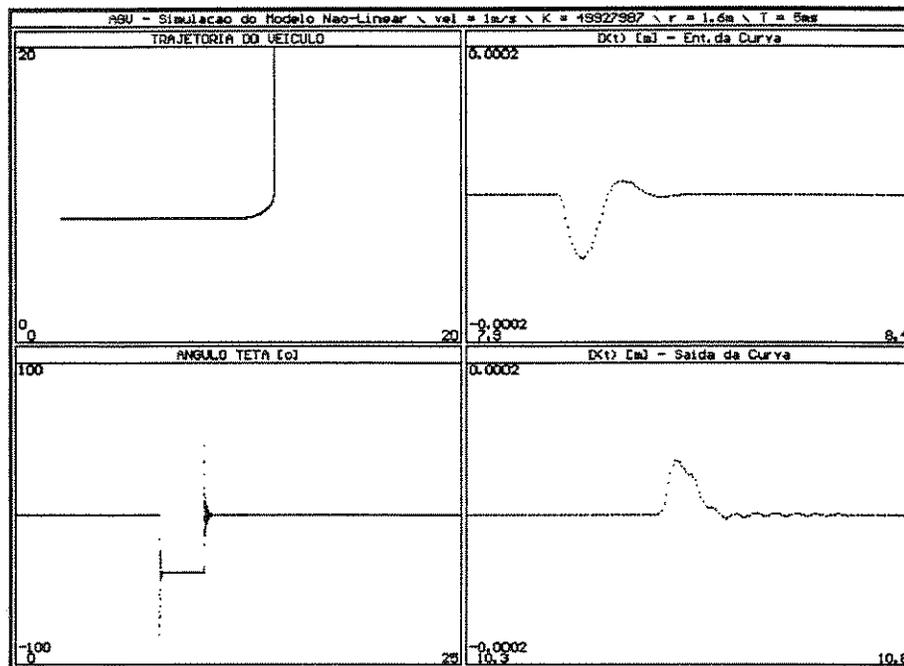


fig.4.23 - raio mínimo = 1.6m, $K_{cont} = 49927987$, $T = 5.00$ ms, $v = 1.00$ m/s

Os valores de ganho nas simulações mostradas nas figs.4.22 e 4.23 correspondem, respectivamente, à 70% e 130% do valor nominal de K_{cont} e ainda garantem as condições de operação.

Na fig.4.24 é repetida a simulação com velocidade 1.00 m/s, sendo que o valor do ganho considerado é 60% do valor nominal, ou seja, $K_{cont} = 23043686$.

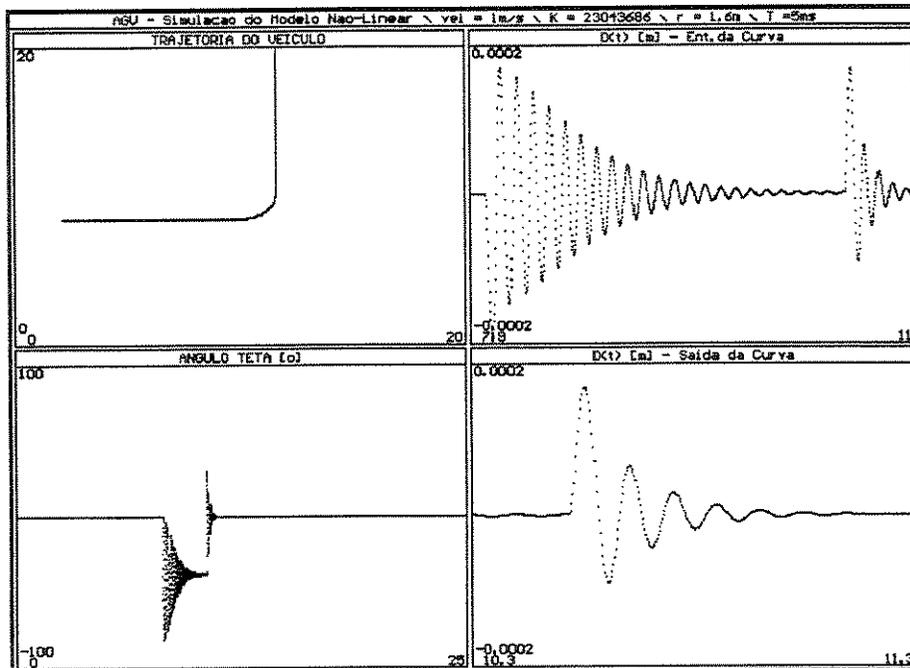


fig.4.24 - raio mínimo = 1.6m, $K_{cont} = 23043686$, $T = 5.00$ ms, $v = 1.00$ m/s

Na simulação anterior, vemos que a condição de que o carro deve estabilizar o seu movimento em até um quarto do percurso circular não foi atendida.

Na fig.4.25, o ganho é $K_{cont} = 53768601$, 140% o valor de nominal de K_{cont} para $v = 1.00$ m/s.

Através da figura 4.25, verifica-se que o veículo não estabiliza seu movimento ao sair da curva.

Assim, ficam definidos os limites $\pm 30\%$ do valor de K_{cont} nominal como os limites mínimo e máximo para a variação do ganho a uma certa velocidade.

Com o ganho $K_{cont} = 38406144$, na realidade, obtém-se como raio mínimo 1.5 m, sendo o valor 1.6 m considerado em função das condições mais adversas criadas pelas variações de ganho.

São mostradas simulações considerando-se velocidades de 0.50 m/s e 0.25 m/s, onde se verifica que os erros com relação à trajetória diminuem conforme a velocidade diminui, e que confirmam os limites acima como válidos para toda faixa de variação de velocidade do AGV.

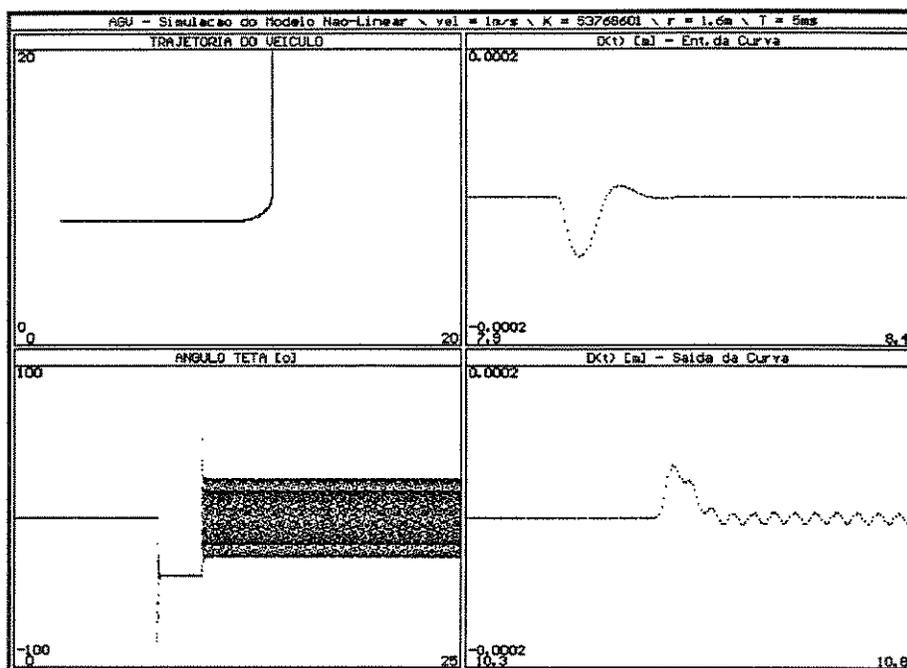


fig.4.25 - raio mínimo = 1.6m, $K_{cont} = 53768601$, $T = 5.00$ ms, $v = 1.00$ m/s

Na fig.4.26, para $v = 1.00$ m/s e $K_{cont} = 38406144$, é mostrada simulação em que o raio é igual a 1.4 m.

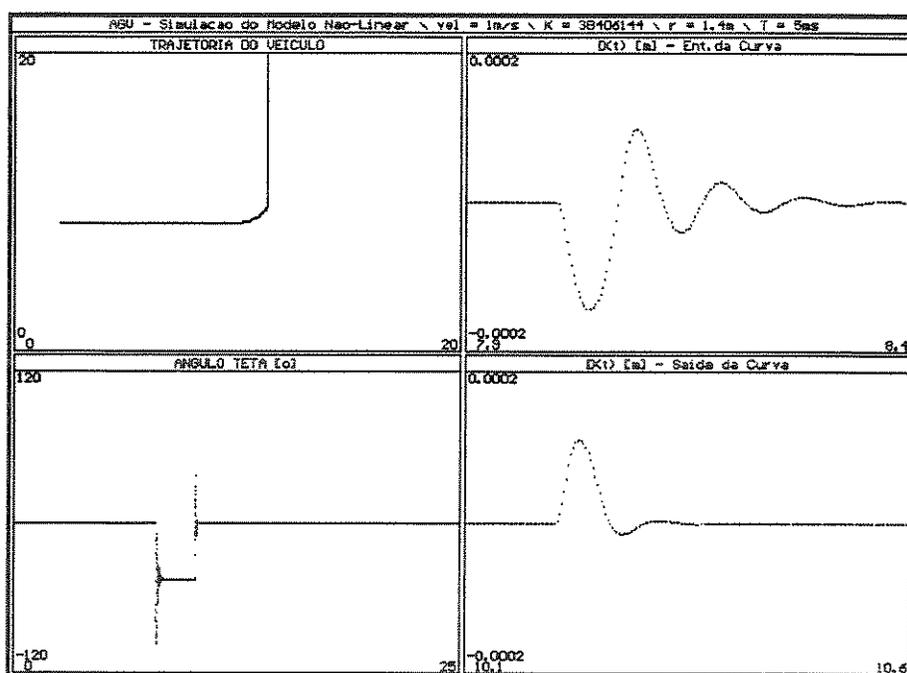


fig.4.26 - raio = 1.4m, $K_{cont} = 38406144$, $T = 5.00$ ms, $v = 1.00$ m/s

Neste caso, não foi obedecida a condição de que o ângulo da direção não pode ser superior à 90°.

As mesmas condições das simulações apresentadas nas figuras 4.21 a 4.26 foram impostas ao sistema com velocidade de translação igual a 0.50 m/s.

Na fig.4.27, é mostrada a simulação onde $v = 0.50$ m/s, $T = 5.00$ ms, $R = 1.6$ m e $K_{cont} = 153624579$.

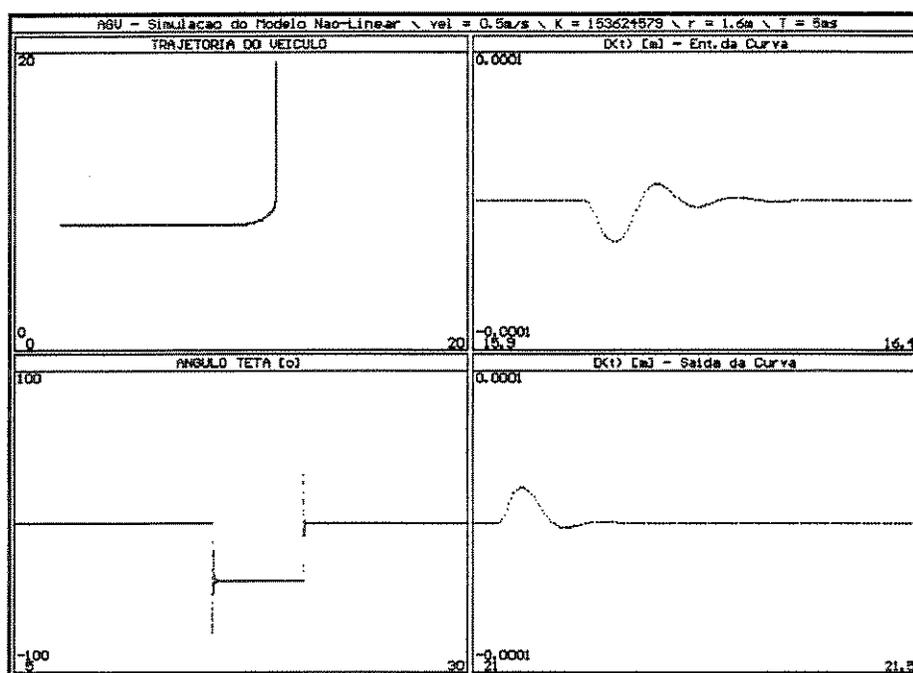


fig.4.27 - raio mínimo = 1.6m, $K_{cont} = 153624579$, $T = 5.00$ ms, $v = 0.50$ m/s

Na fig.4.28, para as mesmas condições anteriores, faz-se $K_{cont} = 107537205$, que corresponde a 70% do valor nominal.

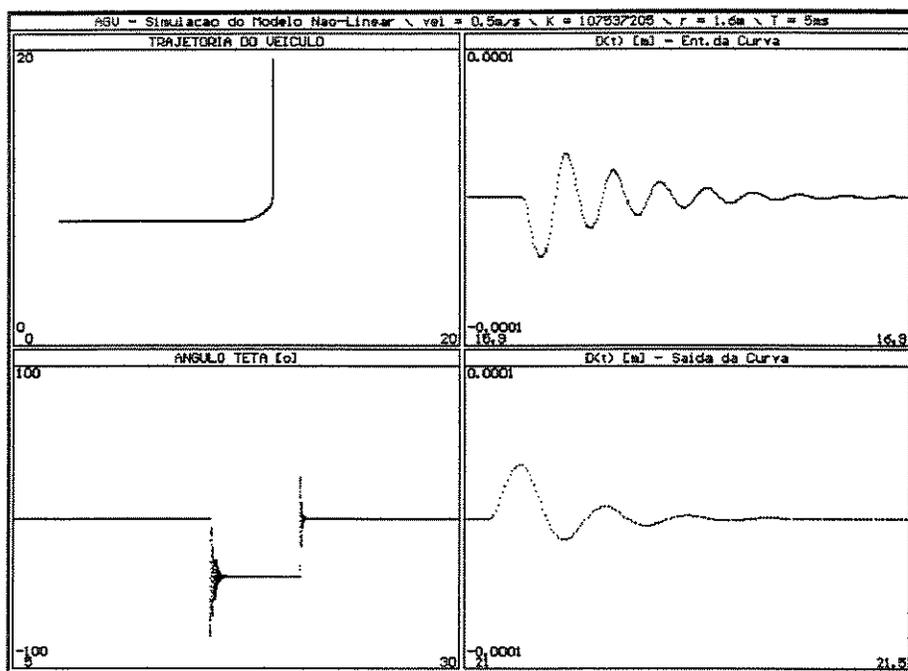


fig.4.28 - raio mínimo = 1.6m, Kcont = 107537205, T = 5.00 ms, v = 0.50 m/s

Na fig.4.29, fazendo $K_{cont} = 199711952$, que corresponde a 130% do valor nominal, tem-se:

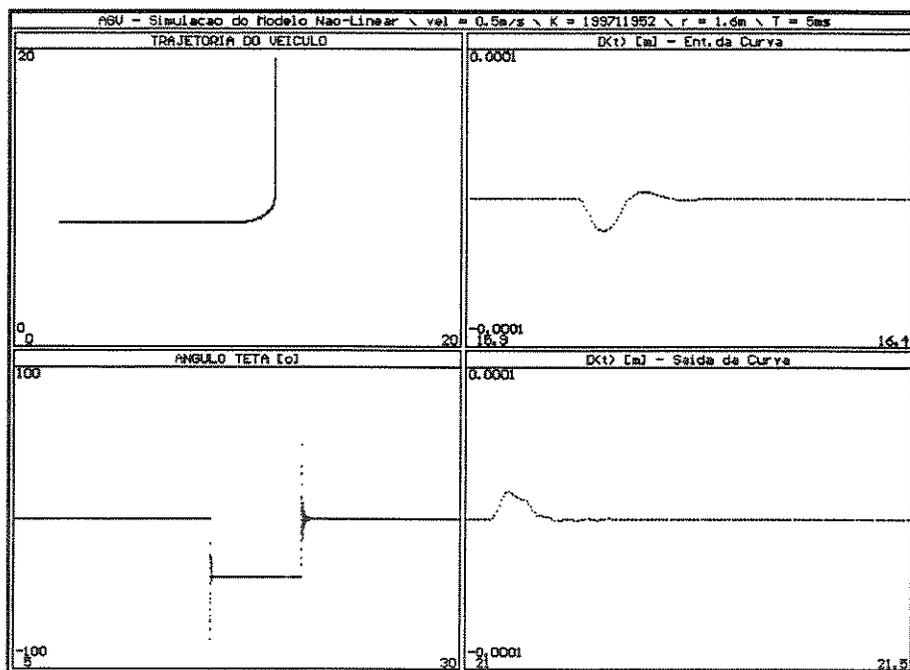


fig.4.29 - raio mínimo = 1.6m, Kcont = 199711952, T = 5.00 ms, v = 0.50 m/s

Através das figuras 4.28 e 4.29, confirma-se que os limites de ganho ± 30 do valor nominal são válidos também para a velocidade de 0.50 m/s.

Na fig.4.30, o ganho é $K_{cont} = 92174747$, que corresponde a 60% do valor nominal.

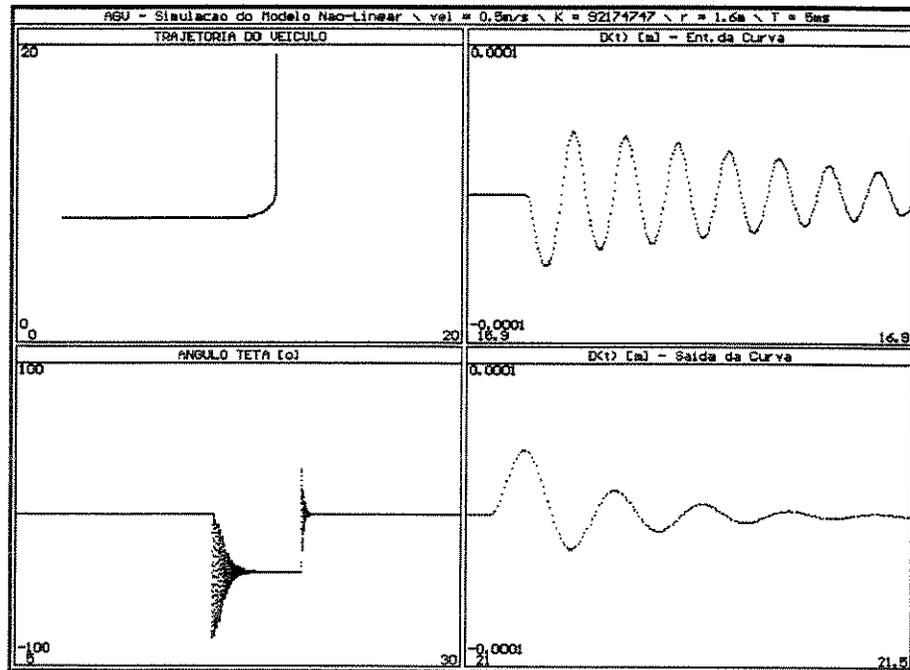


fig.4.30 - raio mínimo = 1.6m, $K_{cont} = 92174747$, $T = 5.00$ ms, $v = 0.50$ m/s

Fazendo o valor do ganho 140% , $K_{cont} = 215074410$ (fig.4.31).

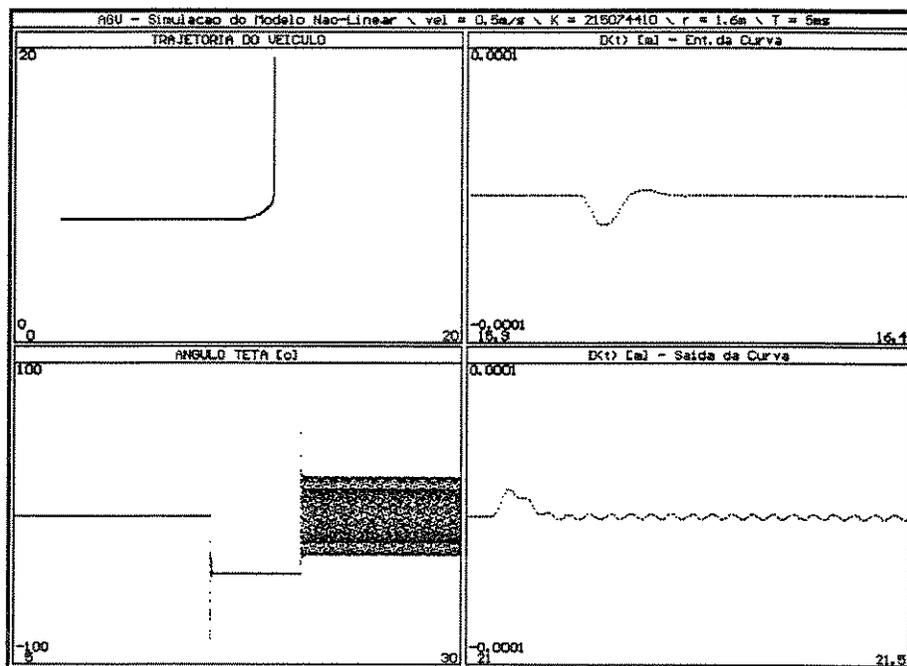


fig.4.31 - raio mínimo = 1.6m, $K_{cont} = 215074410$, $T = 5.00$ ms, $v = 0.50$ m/s

As últimas duas simulações mostram que para limites superiores a $\pm 30\%$ do valor de K_{cont} nominal o sistema fica instável.

Na fig.4.32 é mostrado, para $K_{cont} = 153634570$, o comportamento do veículo para $R = 1.4$ m, situação semelhante à apresentada na fig.4.26.

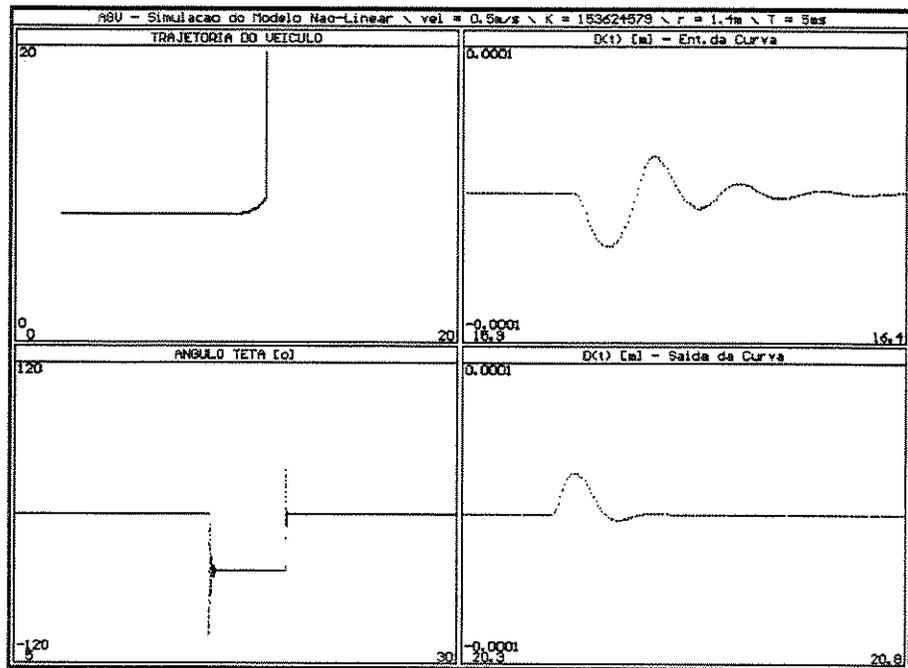


fig.4.32 - raio = 1.4m, $K_{cont} = 153624579$, $T = 5.00$ ms, $v = 0.50$ m/s

Novamente não foi obedecida a condição de que o ângulo da direção não seja superior à 90° .

Para $v = 0.25$ m/s, $T = 5.00$ ms, $R = 1.6$ m e $K_{cont} = 614498319$, tem-se (fig.4.33):

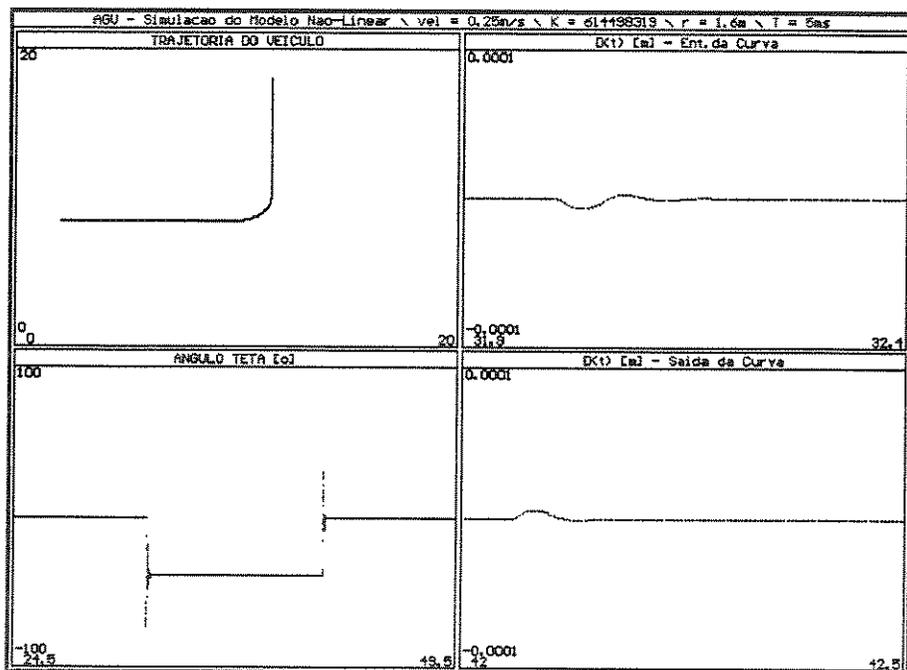


fig.4.33 - raio mínimo = 1.6m, $K_{cont} = 614498319$, $T = 5.00$ ms, $v = 0.25$ m/s

Fazendo K_{cont} 30% menor que o valor da fig.4.33, $K_{cont} = 430148823$ (fig.4.34).

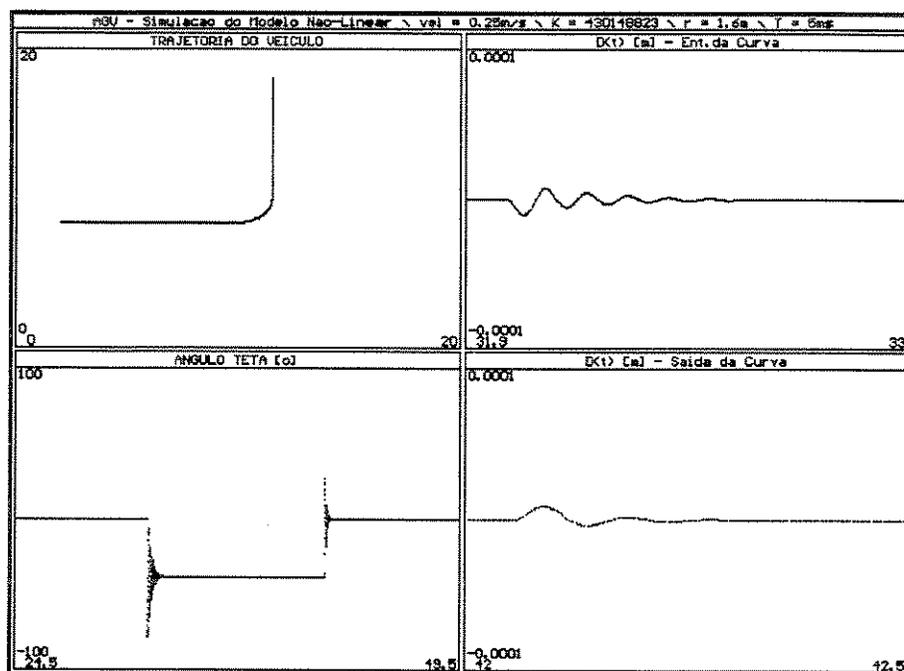


fig.4.34 - raio mínimo = 1.6m, $K_{cont} = 430148823$, $T = 5.00$ ms, $v = 0.25$ m/s

Aumentando o ganho para o limite de 130% do valor nominal, $K_{cont} = 798847814$ (fig.4.35).

Novamente dentro dos limites de $\pm 30\%$ do valor de K_{cont} dado por (4.27) e (4.29), o sistema permanece estável.

Apresenta-se nas figuras 4.36 e 4.37 a resposta do sistema para valores de ganho do controlador iguais a 60% e 140% do valor nominal, respectivamente.

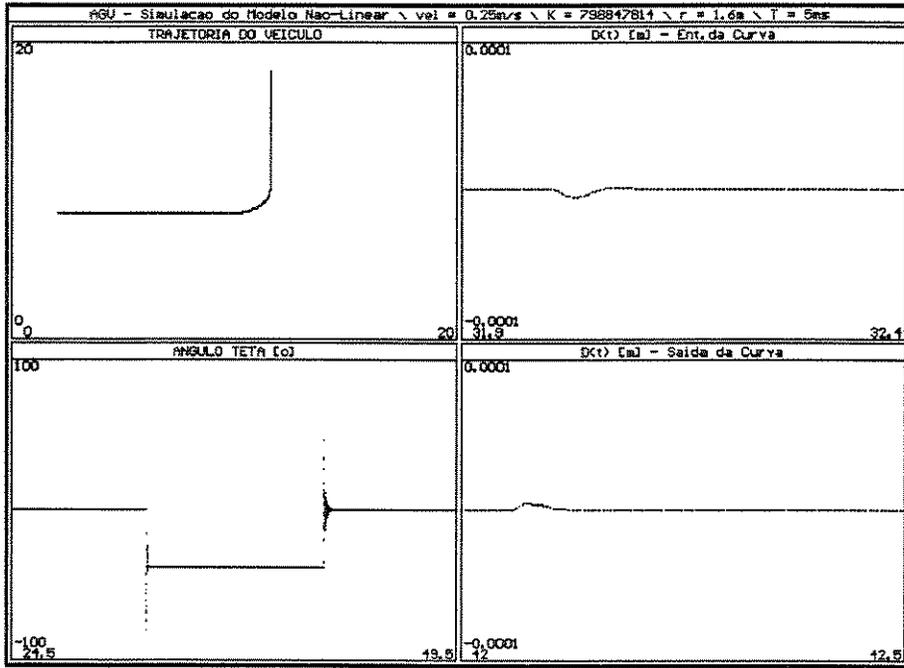


fig.4.35 - raio mínimo = 1.6m, Kcont = 798847814 = 5.00 ms, v = 0.25 m/s

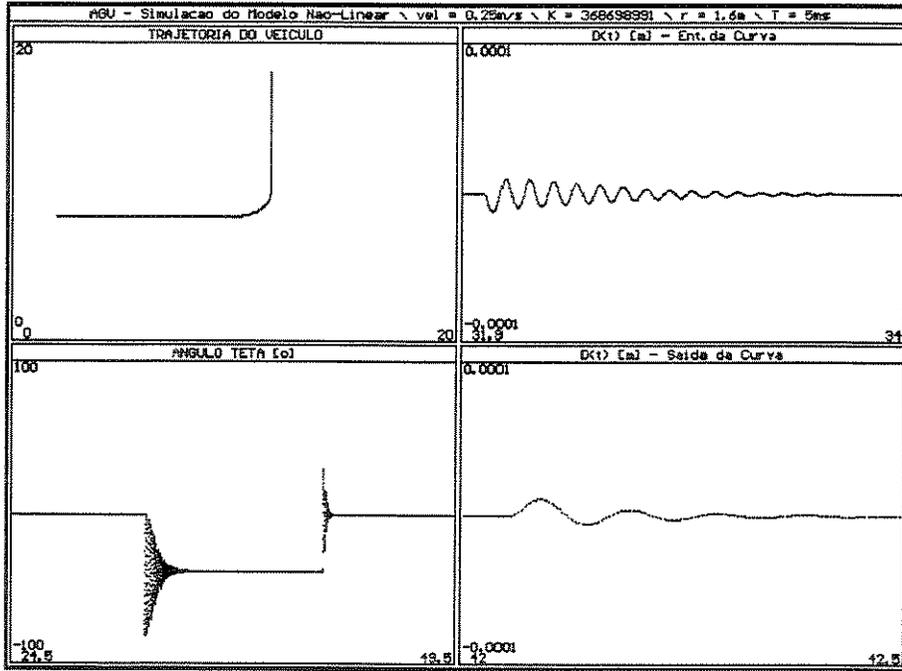


fig.4.36 - raio mínimo = 1.6m, Kcont = 368698991, T = 5.00 ms, v = 0.25 m/s

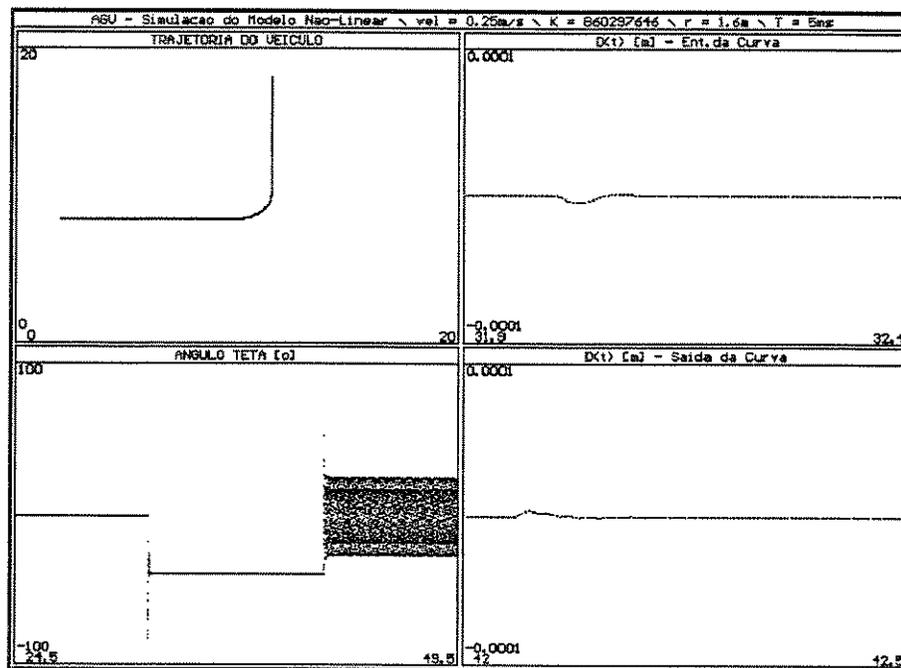


fig.4.37 - raio mínimo = 1.6m, Kcont = 860297646, T = 5.00 ms, v = 0.25 m/s

Pela fig.4.36, observa-se que o sistema responde dentro das restrições impostas, o que não ocorre na fig.4.37.

De fato, pode-se observar que as oscilações da resposta do sistema são menores em tempo e em amplitude para velocidades mais baixas de deslocamento, o que é natural, uma vez que para cada situação de mudança de direção o veículo desloca-se por uma distância menor até que o sistema de direção receba outro comando do sistema de controle.

É importante notar que quanto menor a velocidade, maior o ganho do controlador, pois o veículo desloca-se por uma distância menor sob uma ação do controlador ou, inversamente, sendo maior a velocidade o ganho do controlador deve ser menor, pois o veículo desloca-se por uma distância maior e assim a ação de controle "integra-se" neste espaço.

Novamente, para um raio de 1.4 m não é atendida a restrição do ângulo da direção (fig.4.38).

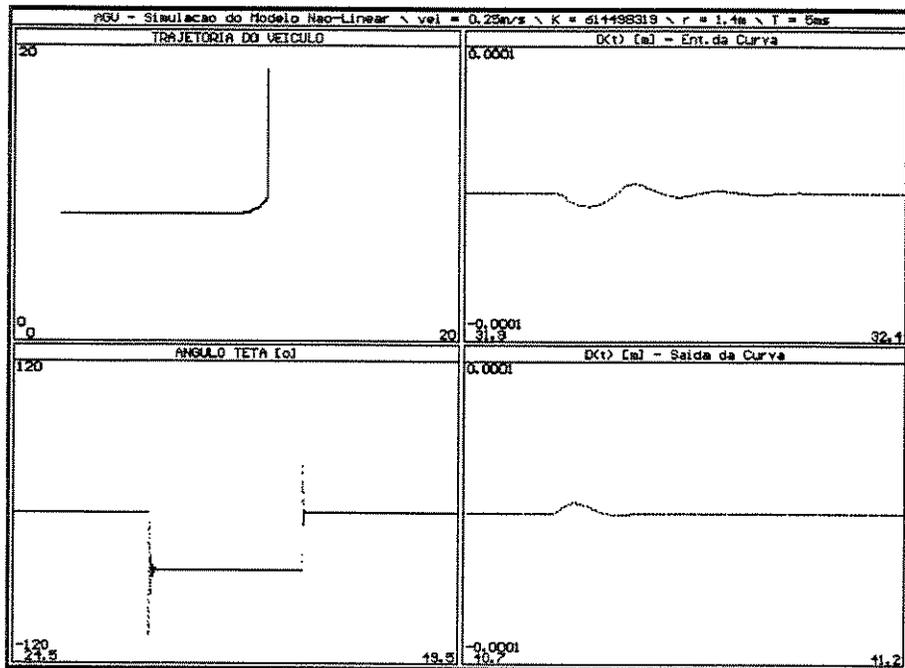


fig.4.38 - raio = 1.4m, $K_{cont} = 614498319$, $T = 5.00$ ms, $v = 0.25$ m/s

Através das simulações apresentadas nas figuras 4.27 a 4.38, obteve-se os limites para o raio de curvatura da trajetória e de variação do ganho do controlador, dada uma velocidade.

Para confirmar estes limites de ganho apresenta-se a seguir, para as três velocidades, simulações considerando um raio de 5.00 m, para os mesmos limites de $\pm 30\%$ dos valores de K_{cont} e também para $\pm 40\%$ de K_{cont} nominais para cada uma das velocidades .

Na fig.4.39, $T = 5.00$ ms, $v = 1.00$ m/s, $R = 5.00$ m e $K_{cont} = 26884300$ (-30%).

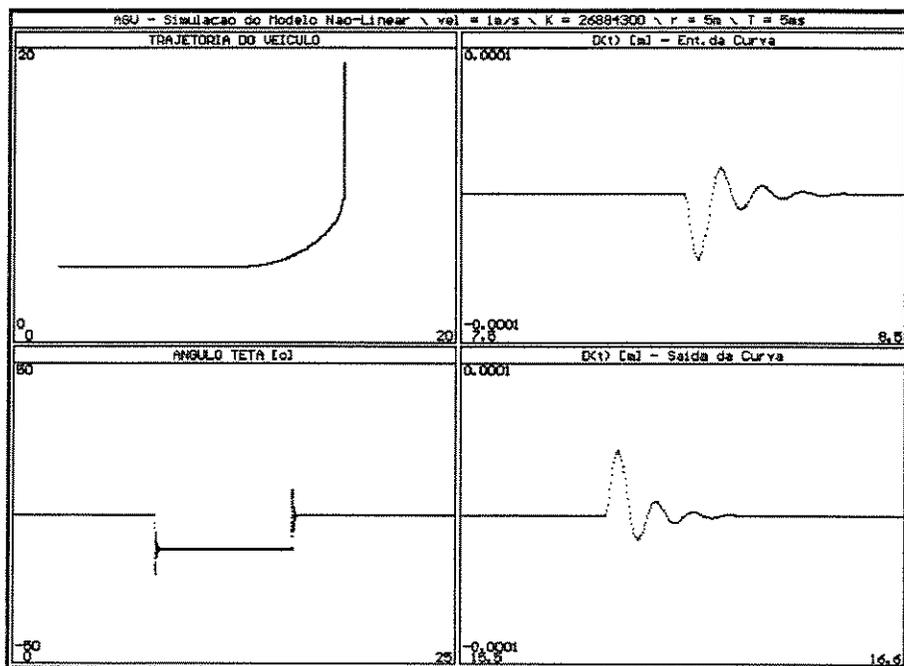


fig.4.39 - raio = 5.00 m, Kcont = 26884300, T = 5.00 ms, v = 1.00 m/s

Para $K_{cont} = 49927987$, temos (fig.4.40) (+30%):

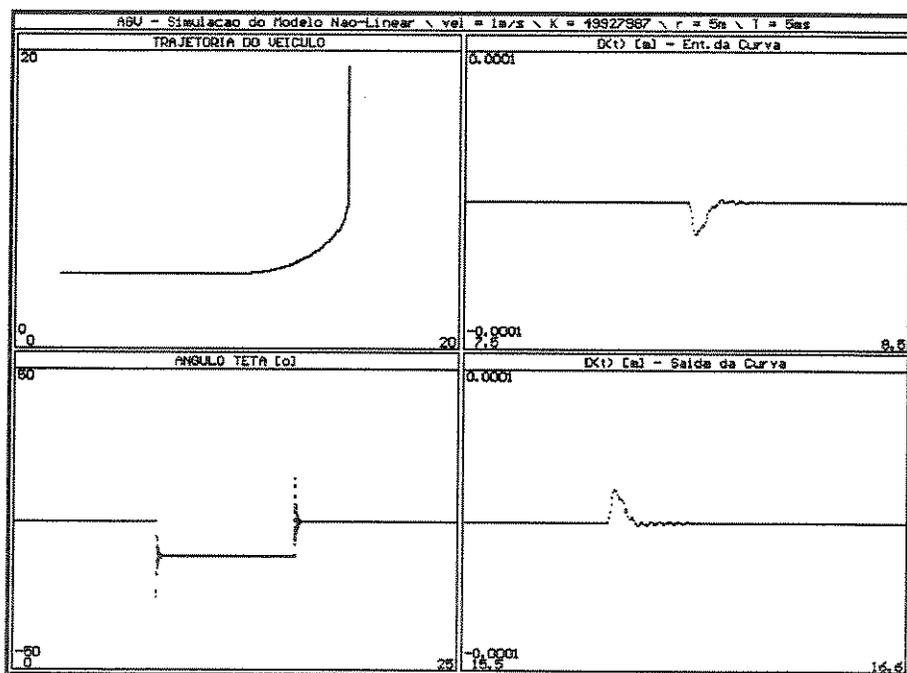


fig.4.40 - raio = 5.00 m, Kcont = 49927987, T = 5.00 ms, v = 1.00 m/s

Agora, considerando $\pm 40\%$ de K_{cont} nominal para 1.00 m/s, tem-se $K_{cont} = 23043686$ e $K_{cont} = 53768601$, nas figs.4.41 e 4.42, respectivamente.

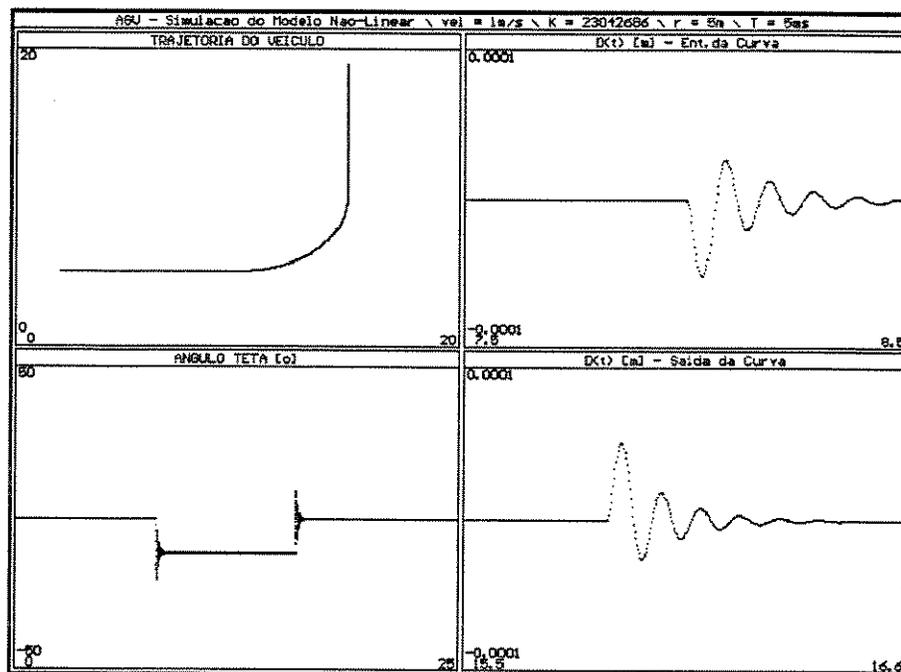


fig.4.41 - raio = 5.00 m, $K_{cont} = 23043686$, $T = 5.00$ ms, $v = 1.00$ m/s

Os limites de $\pm 30\%$ do valor de K_{cont} são novamente verificados. Na fig.4.41 as restrições foram satisfeitas, porém mantêm-se os limites impostos pela simulação com o raio mínimo.

Para $v = 0.50$ m/s, $T = 5.00$ ms e $R = 5.00$ m, tem-se na fig.4.43 $K_{cont} = 107537205$, que corresponde ao limite mínimo de K_{cont} para aquela velocidade.

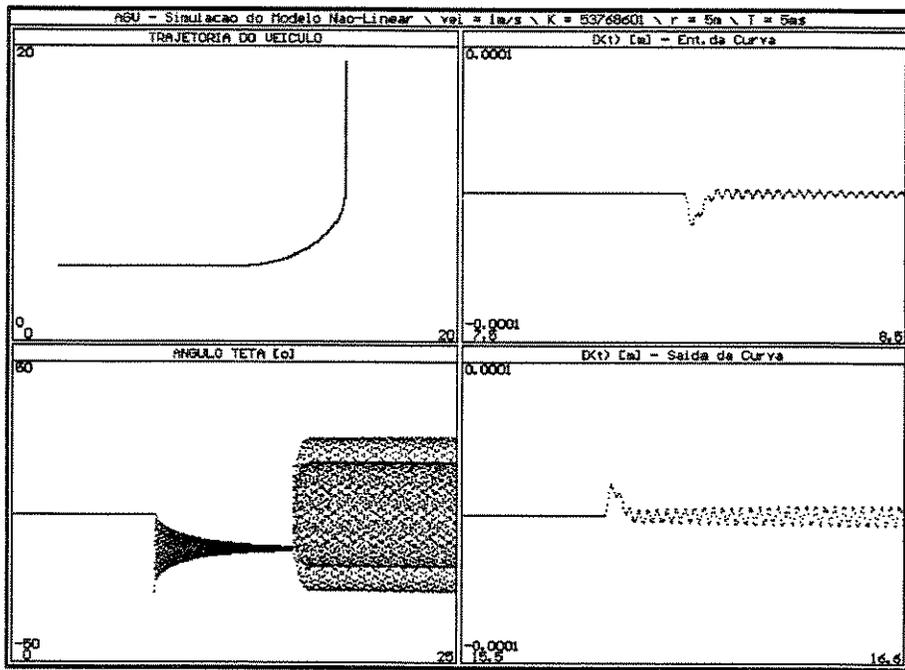


fig.4.42 - raio = 5.00 m, Kcont = 53768601, T = 5.00 ms, v = 1.00 m/s

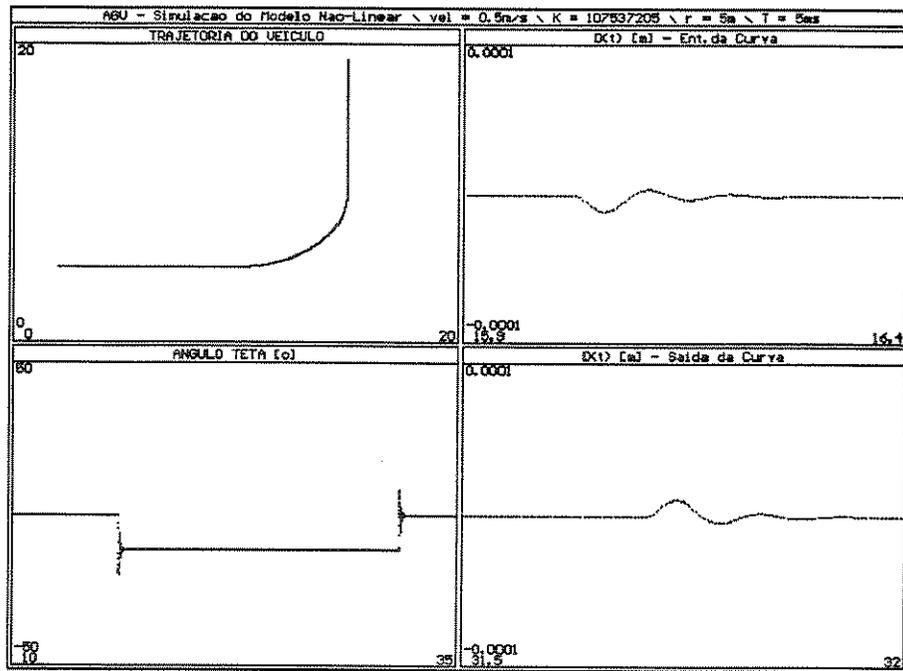


fig.4.43 - raio = 5.00 m, Kcont = 107537205, T = 5.00 ms, v = 0.50 m/s

Para o limite máximo do ganho, $K_{cont} = 199711952$ (fig.4.44).

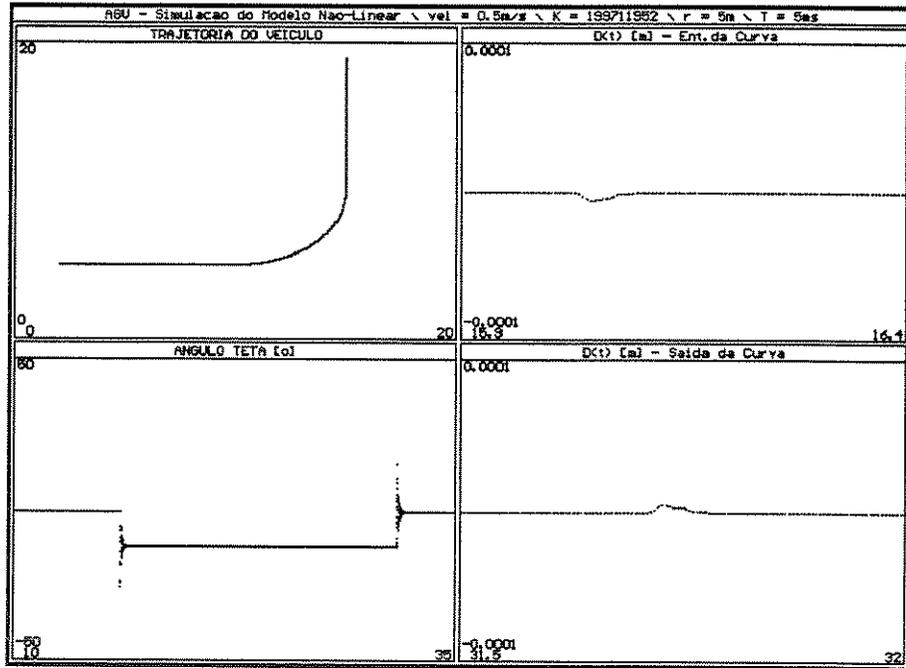


fig.4.44 - raio = 5.00 m, $K_{cont} = 19971952$, $T = 5.00$ ms, $v = 0.50$ m/s

Novamente, extrapolando aos limites máximos, com $K_{cont} = 92174747$ tem-se (fig.4.45):

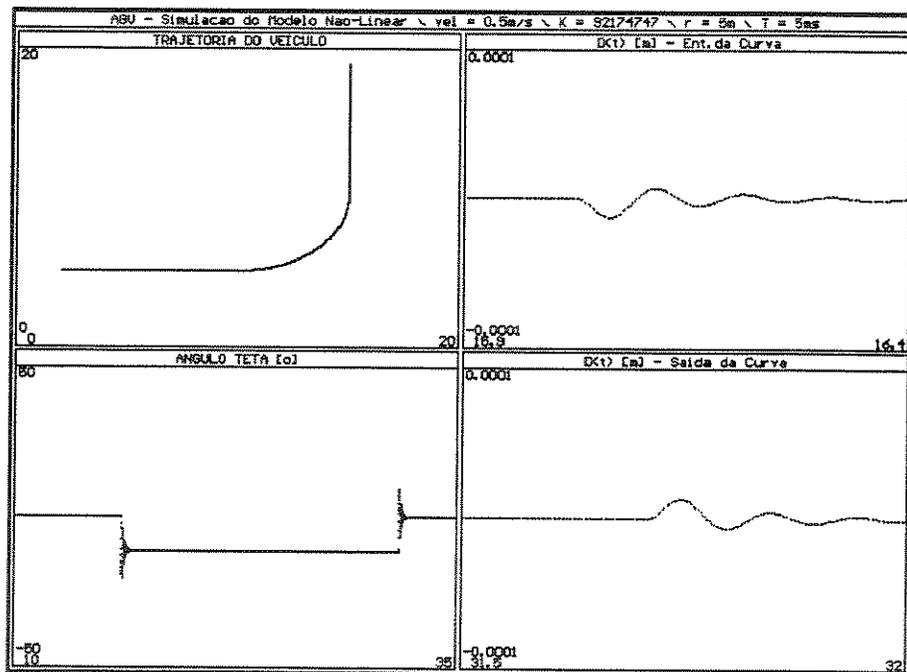


fig.4.45 - raio = 5.00 m, $K_{cont} = 92174747$, $T = 5.00$ ms, $v = 0.50$ m/s

Da mesma forma que na fig.4.41, as condições são satisfeitas na simulação anterior, sendo o limite inferior do ganho do controlador definido pela condição de raio mínimo.

Com relação ao limite superior, tem-se:

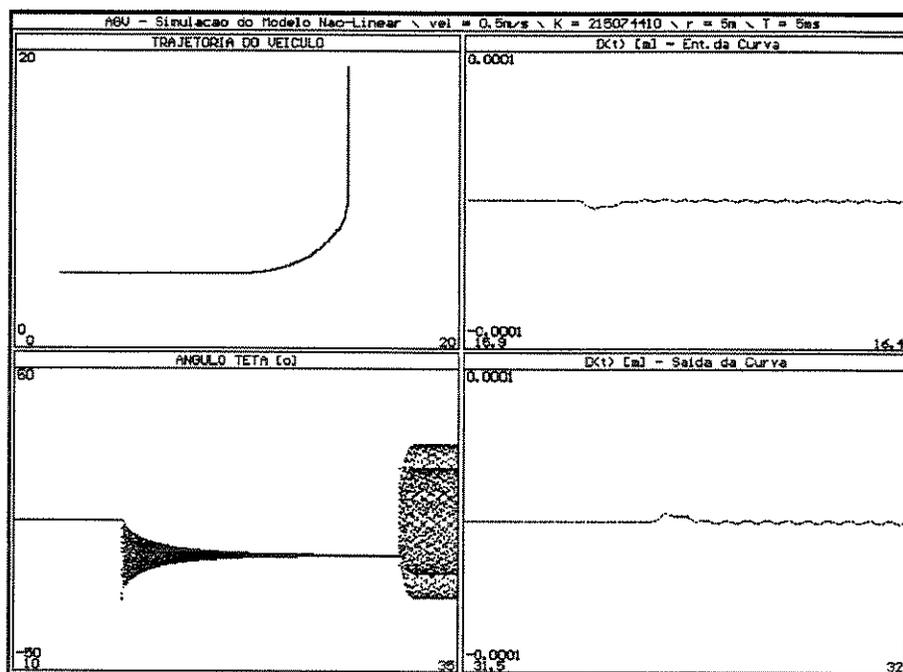


fig.4.46 - raio = 5.00 m, $K_{cont} = 215074410$, $T = 5.00$ ms, $v = 0.50$ m/s

Para a velocidade de 0.25 m/s tem-se um desempenho ainda melhor do sistema, pelos motivos já expostos.

Mostra-se na fig.4.47 a simulação do sistema para $K_{cont} = 430148823$, $T = 5.00$ ms, $R = 5.00$ m e velocidade de deslocamento de 0.25 m/s.

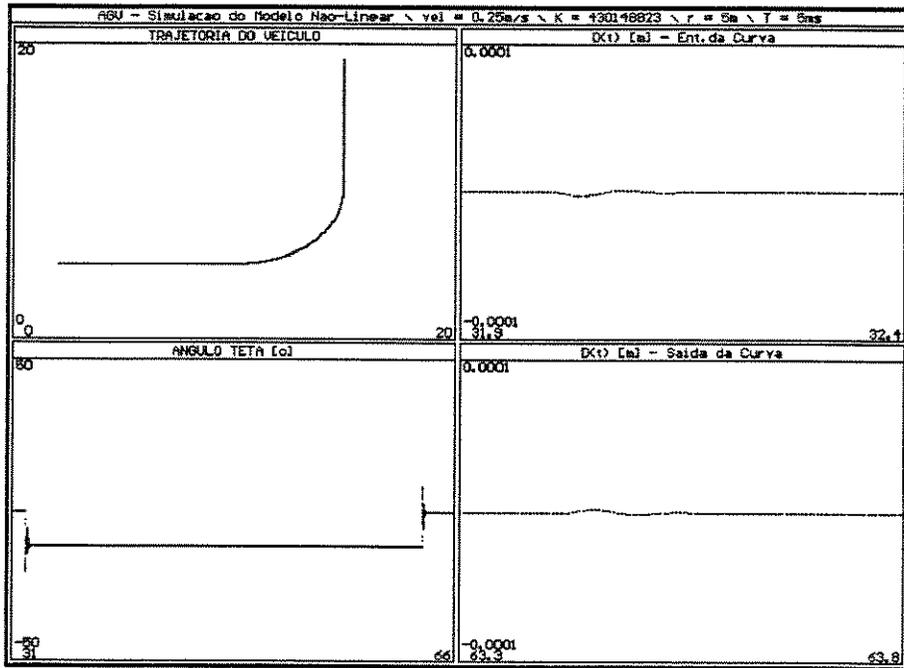


fig.4.47 - raio = 5.00 m, $K_{cont} = 430148823$, $T = 5.00$ ms, $v = 0.25$ m/s

Para o limite superior do ganho do controlador, $K_{cont} = 798847814$ (fig.4.48).

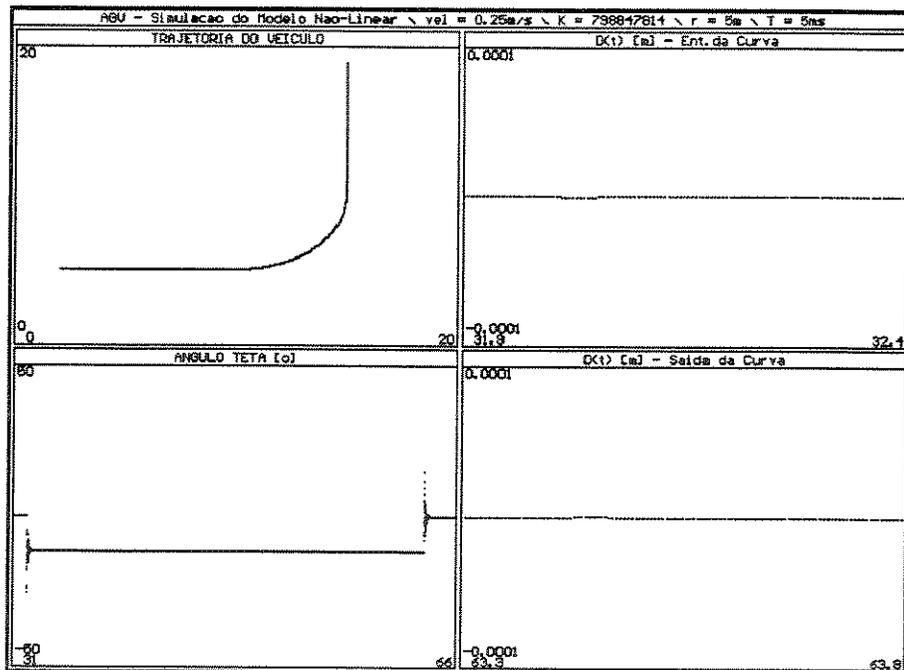


fig.4.48 - raio = 5.00 m, $K_{cont} = 798847814$, $T = 5.00$ ms, $v = 0.25$ m/s

É interessante observar nas duas últimas figuras o pequeno valor do erro, em função da velocidade ser mais baixa.

Com o ganho do controlador igual a 60% do valor nominal, $K_{cont} = 368698991$ (fig.4.49).

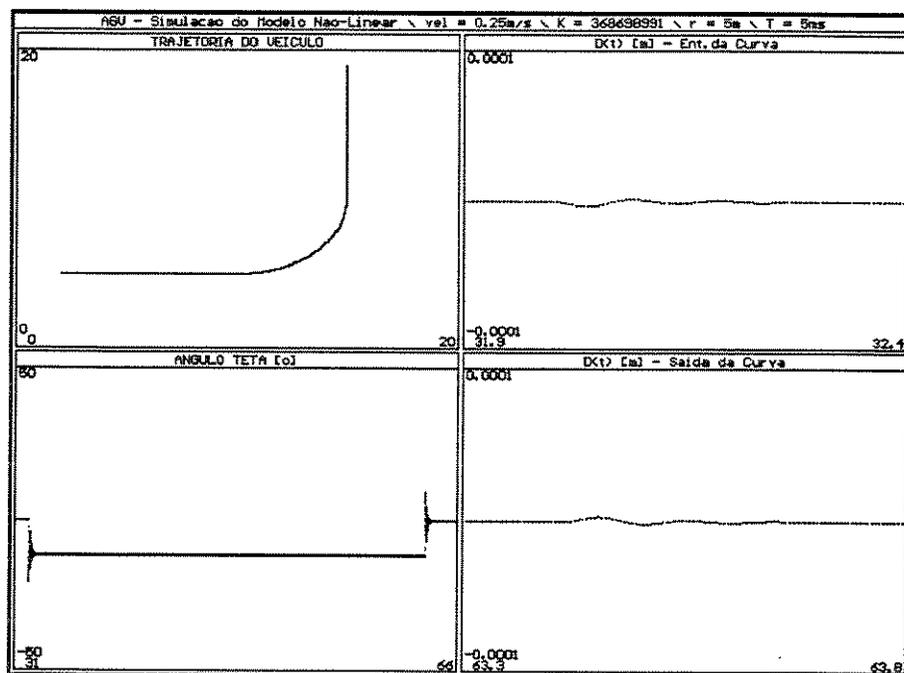


fig.4.49 - raio = 5.00 m, $K_{cont} = 368698991$, $T = 5.00$ ms, $v = 0.25$ m/s

E, para $K_{cont} = 860297646$, que corresponde a 140% do valor nominal, tem-se (fig.4.50):

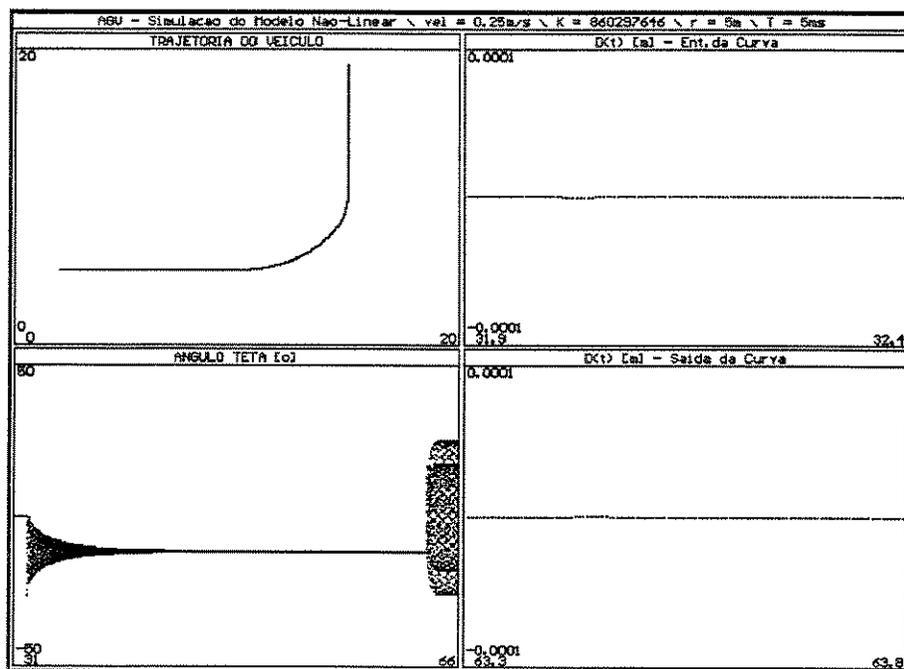


fig.4.50 - raio = 5.00 m, Kcont = 860297646, T = 5.00 ms, v = 0.25 m/s

Valem as mesmas observações feitas para as simulações apresentadas nas figuras 4.41 e 4.42, 4.45 e 4.46.

Com as simulações mostradas nas figuras 4.15 a 4.50, pode-se determinar, para um período de amostragem de 5.00 ms e velocidades de 1.00 m/s, 0.50 m/s e 0.25 m/s, o valor do raio mínimo da trajetória, o ganho nominal do controlador e os limites inferior e superior para a variação do ganho.

Uma vez que os valores do ganho do controlador e da velocidade de deslocamento do veículo estão interligados por meio do ganho do modelo do carro, pode-se fazer o caminho inverso, ou seja, a partir da velocidade de deslocamento e dos limites de ganho, chegar à faixa de variação da velocidade, dado um certo ganho.

De (4.26), (4.27) e (4.29) pode-se escrever para o valor de K_{cont} nominal:

$$K_{cont\ nom} = \frac{1}{1.25 \frac{v_{nom}^2}{l} 0.2083 \cdot 10^{-7}} \quad (4.32)$$

E para o valor do limite mínimo do ganho do controlador:

$$K_{\text{cont min}} = \frac{1}{1.25 \frac{v^2}{l} 0.2083 10^{-7}} \quad (4.33)$$

Sendo:

$$\frac{K_{\text{cont min}}}{K_{\text{cont nom}}} = 0.70, \quad (4.34)$$

tem-se que:

$$\frac{K_{\text{cont min}}}{K_{\text{cont nom}}} = 0.70 \left(\frac{v_{\text{nom}}}{v} \right)^2 \quad (4.35)$$

De onde tira-se que:

$$v_{\text{max}} = v = 1.195 v_{\text{nom}} \quad (4.36)$$

Da mesma forma, sabendo que:

$$\frac{K_{\text{cont max}}}{K_{\text{cont nom}}} = 1.30, \quad (4.37)$$

pode-se escrever:

$$\frac{K_{\text{cont max}}}{K_{\text{cont nom}}} = 1.30 \left(\frac{v_{\text{nom}}}{l} \right)^2 \quad (4.38)$$

De (4.38), tira-se que:

$$v_{\text{min}} = v = 0.877 v_{\text{nom}} \quad (4.39)$$

A partir dos valores obtidos em (4.36) e (4.39), são feitas simulações para comprovar os limites máximo e mínimo para a variação da velocidade, para um determinado ganho do controlador.

Assim, para a velocidade de 1.00 m/s, $T = 5.00$ ms, $K_{\text{cont nominal}}$ (38406144) e raio mínimo (1.6 m), a fig.4.51 mostra a simulação do sistema com a velocidade de 1.195 m/s, dada por (4.36).

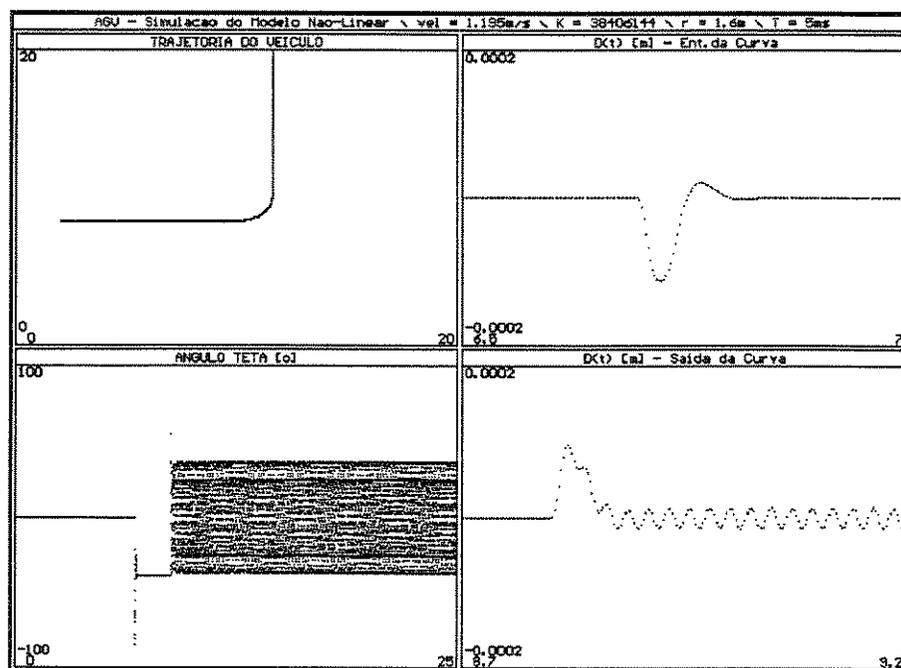


fig.4.51 - raio mínimo = 1.6 m, Kcont = 38406144, T = 5.00 ms, v = 1.195 m/s

Na figura 4.51 observa-se que o sistema não permanece estável no limite de velocidade dado por (4.36). A partir deste resultado, foi-se diminuindo o valor de velocidade até chegar a um valor em que o sistema respondesse de forma estável.

Obteve-se como limite superior:

$$v_{\max} = 1.15 v_{\text{nom}} \quad (4.40)$$

Portanto, fazendo $v = 1.15 \text{ m/s}$, tem-se:

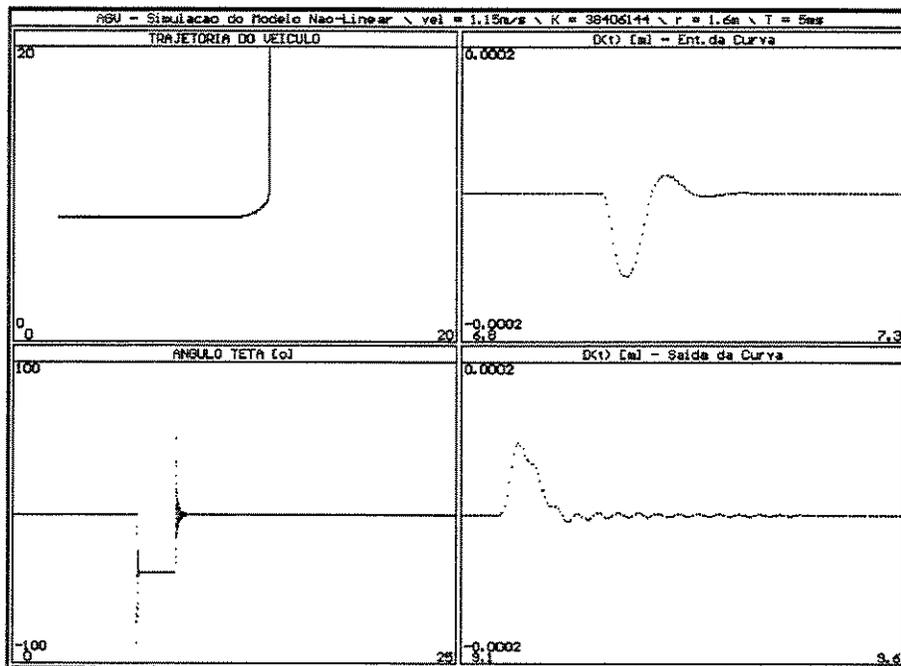


fig.4.52 - raio mínimo = 1.6 m, Kcont = 38406144, T = 5.00 ms, v = 1.15 m/s

Usando a mesma variação para o limite inferior de velocidade,

$$v_{\min} = 0.85 v_{\text{nom}} \quad (4.41)$$

Fazendo $v = 0.85$ m/s para as mesmas condições das duas figuras anteriores, tem-se (fig 4.53):

Considerando que com a variação de $\pm 15\%$ da velocidade a resposta do sistema atendeu às restrições de operação, adotou-se estes limites para as velocidades máxima e mínima, com ganho constante.

O mesmo foi feito para a velocidade de 0.50 m/s.

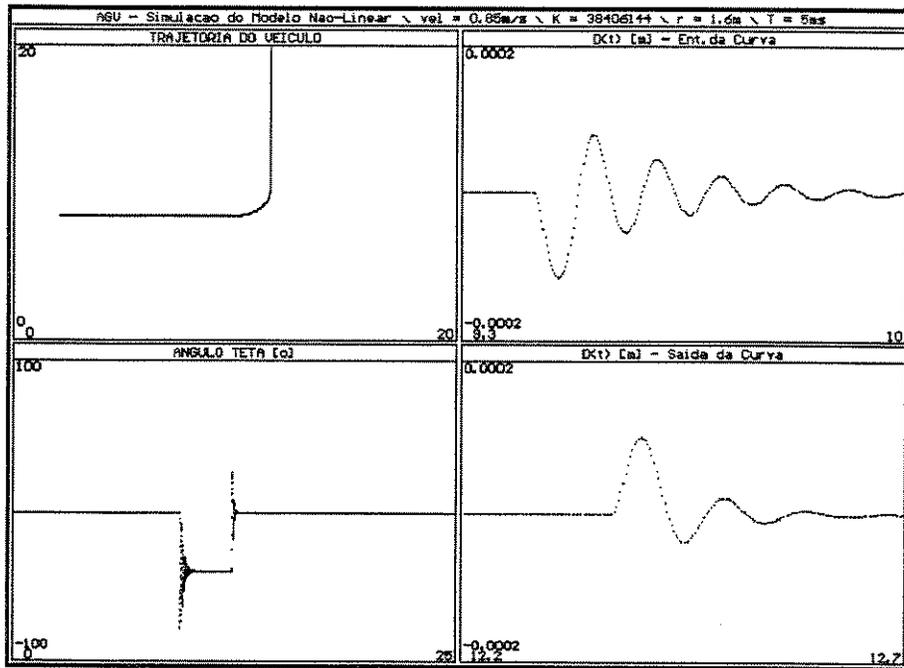


fig.4.53 - raio mínimo = 1.6 m, $K_{cont} = 38406144$, $T = 5.00$ ms, $v = 0.85$ m/s

Primeiramente, na fig.4.54 apresenta-se a simulação do sistema com velocidade dada por (4.36), ou seja, $v = 0.5975$, $K_{cont} = 153624579$, $T = 5.00$ ms e raio = 1.6 m.

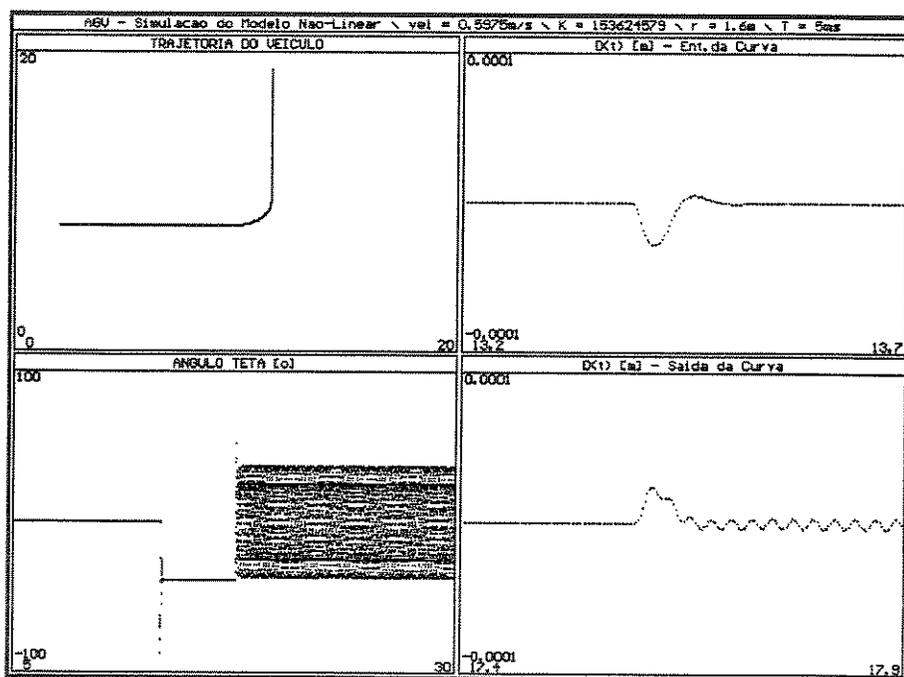


fig.4.54 - raio mínimo = 1.6 m, $K_{cont} = 153624579$, $T = 5.00$ ms, $v = 0.5975$ m/s

Novamente, para o limite dado por (4.36) o sistema não é estável.

Considerando agora o limite máximo de velocidade dado por (4.40), $v = 0.575$ m/s (fig.4.55).

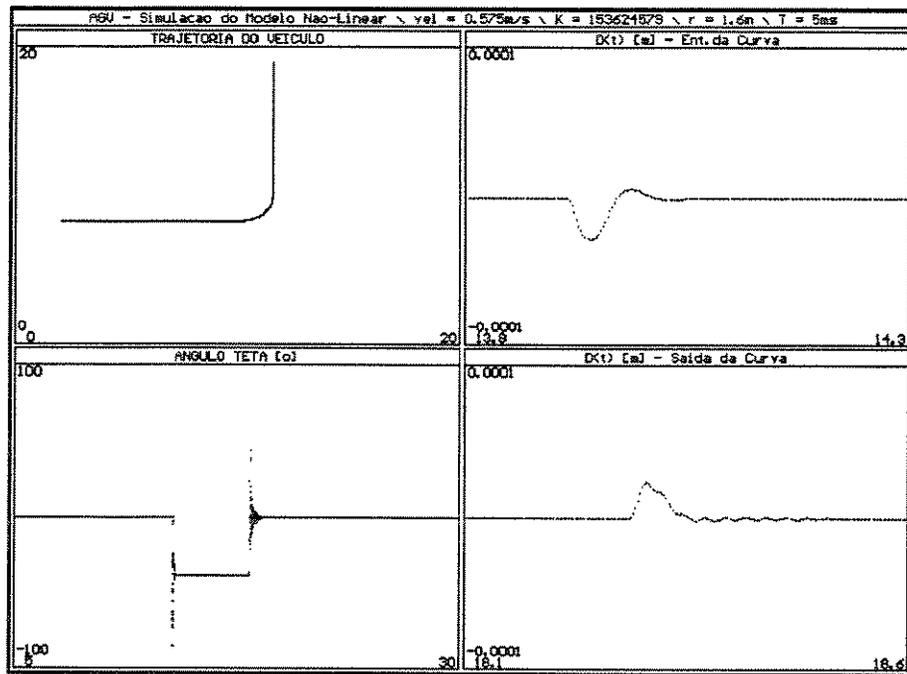


fig.4.55 - raio mínimo = 1.6 m, Kcont = 153624579, T = 5.00 ms, v = 0.575 m/s

E considerando o limite mínimo de velocidade dado por (4.41), $v = 0.425$ m/s (fig.4.56).

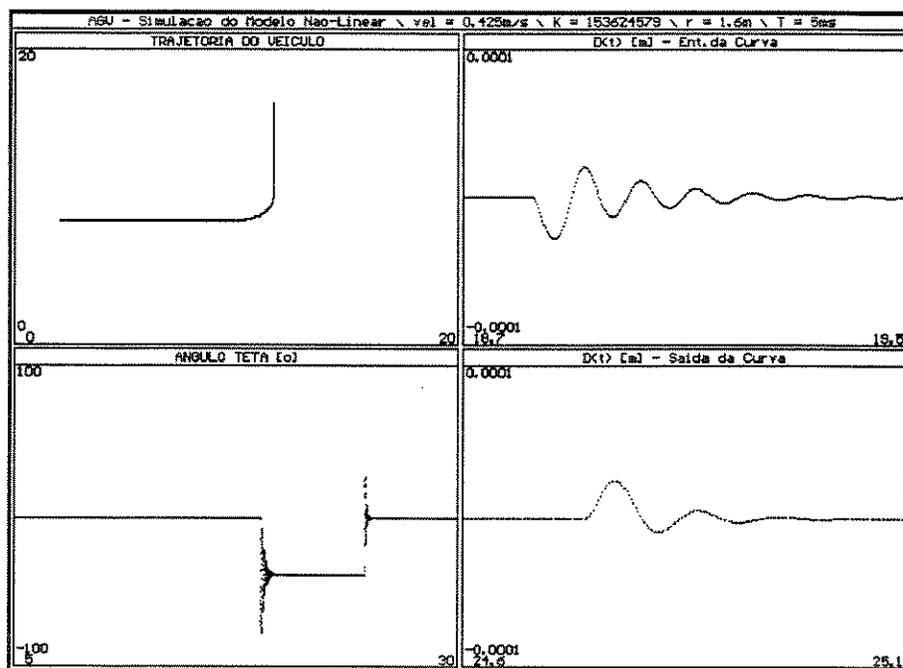


fig.4.56 - raio mínimo = 1.6 m, $K_{cont} = 153624579$, $T = 5.00$ ms, $v = 0.425$ m/s

Novamente, os limites de velocidade dados por (4.40) e (4.41) atendem às restrições de operação do sistema.

Com referência à velocidade de deslocamento de 0.25 m/s, de (4.36) $v = 0.2987$ m/s, e para $T = 5.00$ ms, $R = 1.6$ m e $K_{cont} = 614498319$, tem-se (fig.4.57):

Da mesma forma que para as velocidades de 1.00 m/s e 0.50 m/s, o carro com velocidade limitada por (4.36) oscila em torno da trajetória retilínea ao sair da curva.

Para o valor de velocidade dada por (4.40), $v = 0.2875$ m/s e tem-se:

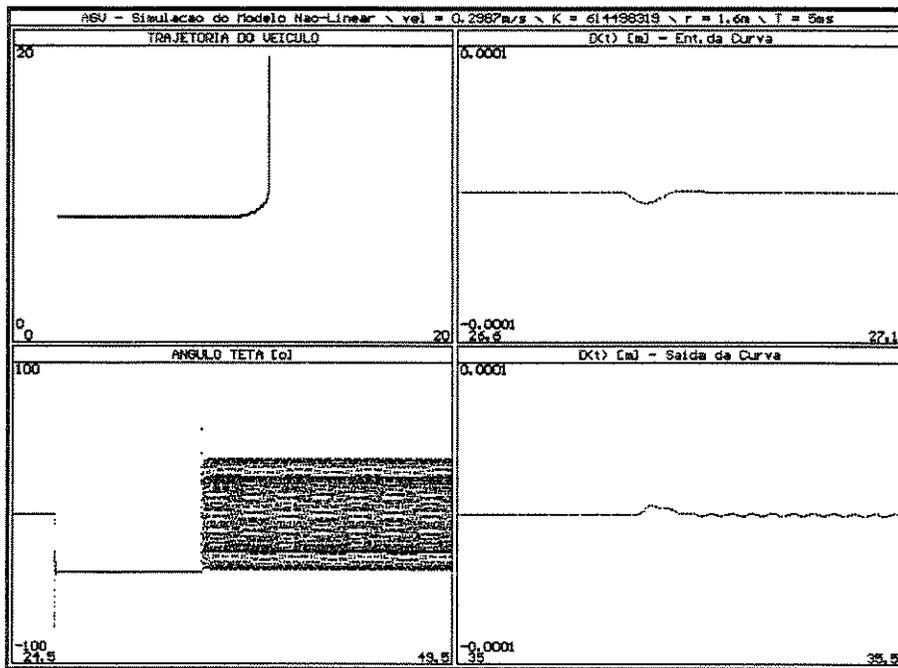


fig.4.57 - raio mínimo = 1.6 m, Kcont = 614498319, T = 5.00 ms, v = 0.2987 m/s

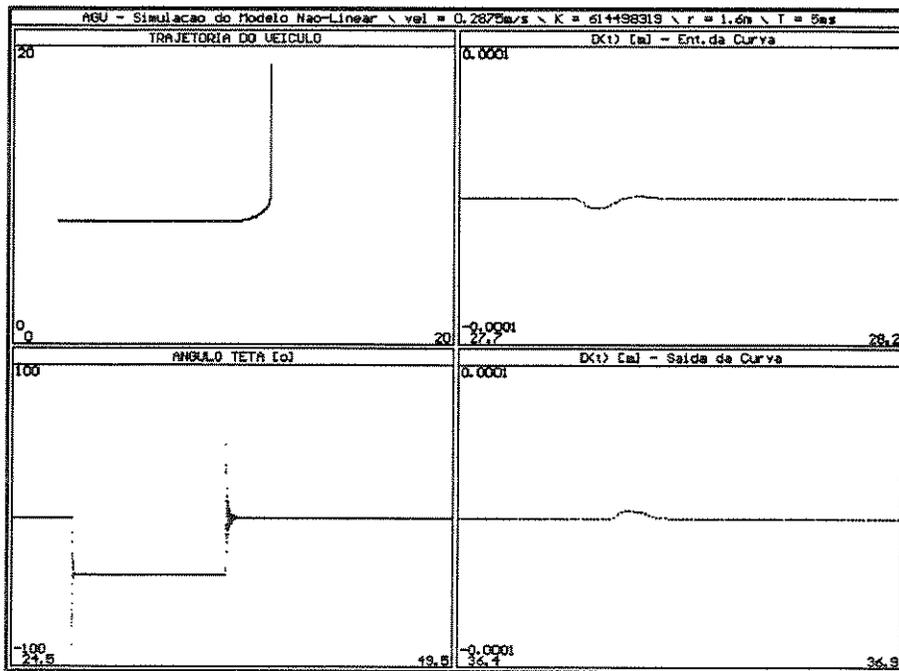


fig.4.58 - raio mínimo = 1.6 m, Kcont = 614498319, T = 5.00 ms, v = 0.2875 m/s

E para o limite mínimo dado por (4.41), $v = 0.2125$ m/s (fig 4.59).

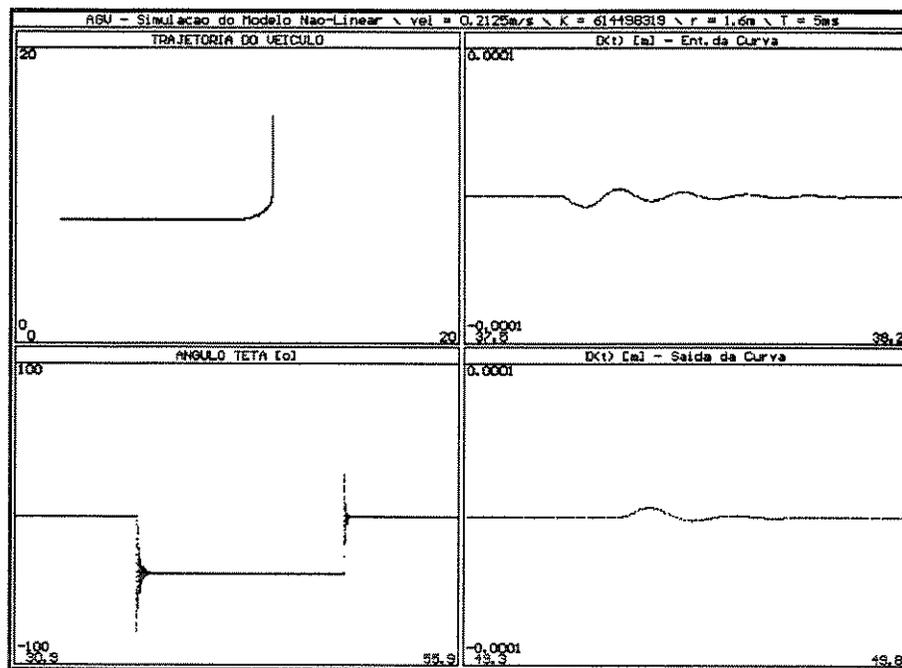


fig.4.59 - raio mínimo = 1.6 m, Kcont = 614498319, T = 5.00 ms, v = 0.2125 m/s

Novamente são confirmados os limites de velocidade de deslocamento com ganho do controlador constante, dados por (4.40) e (4.41).

A partir das velocidades limites, pode-se criar uma estratégia para definir com que velocidade de deslocamento o controlador será ligado, nos casos em que o veículo estiver acelerando.

Como se conhece a variação de velocidade permitida para cada valor de ganho, pode-se, por exemplo, definir ganhos para certas faixas de velocidade e o ganho ser alterado à medida que a velocidade vá atingindo cada uma das faixas até que se chegue à velocidade de operação.

Para finalizar os estudos de simulação, são apresentados resultados para as três velocidades e raio de curvatura igual a 5.00 m, sendo agora o período de amostragem igual a 1.00 ms.

O ganho do controlador é diferente nestes casos, uma vez que o ganho oriundo da discretização do modelo muda com o tempo de amostragem.

$$\text{Para } T = 1.00 \text{ ms, } K_{\text{dscr}} = 0.1667 \cdot 10^{-9}.$$

Assim, para velocidade igual a 1.00 m/s, $K_{\text{cont}} = 4799040192$ (fig.4.60).

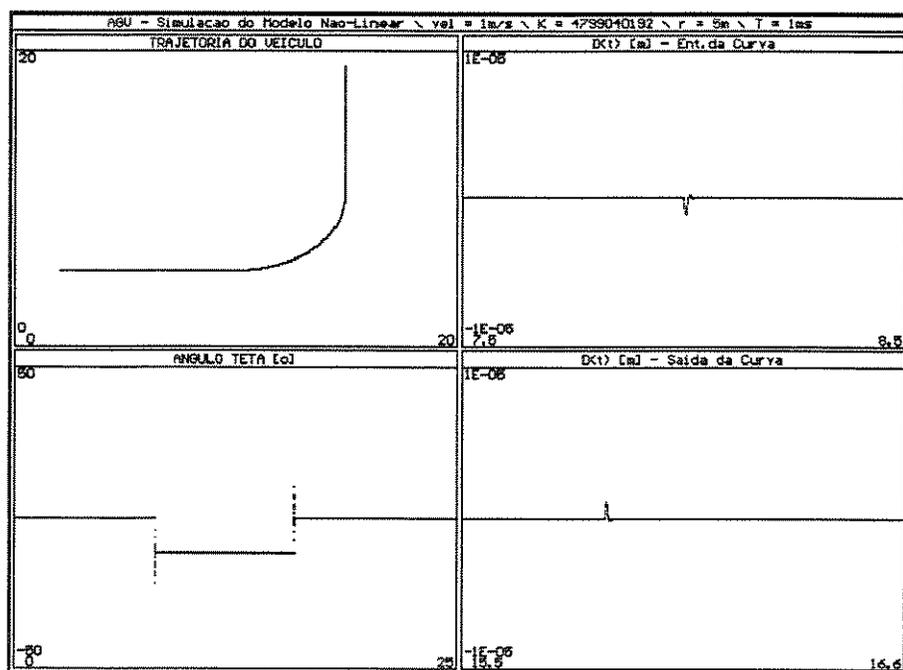


fig.4.60 - raio mínimo = 1.6 m, $K_{cont} = 4799040192$, $T = 1.00$ ms, $v = 1.00$ m/s

Na fig.4.61 é mostrada a simulação para a velocidade de 0.50 m/s, onde K_{cont} vale 19196160770.

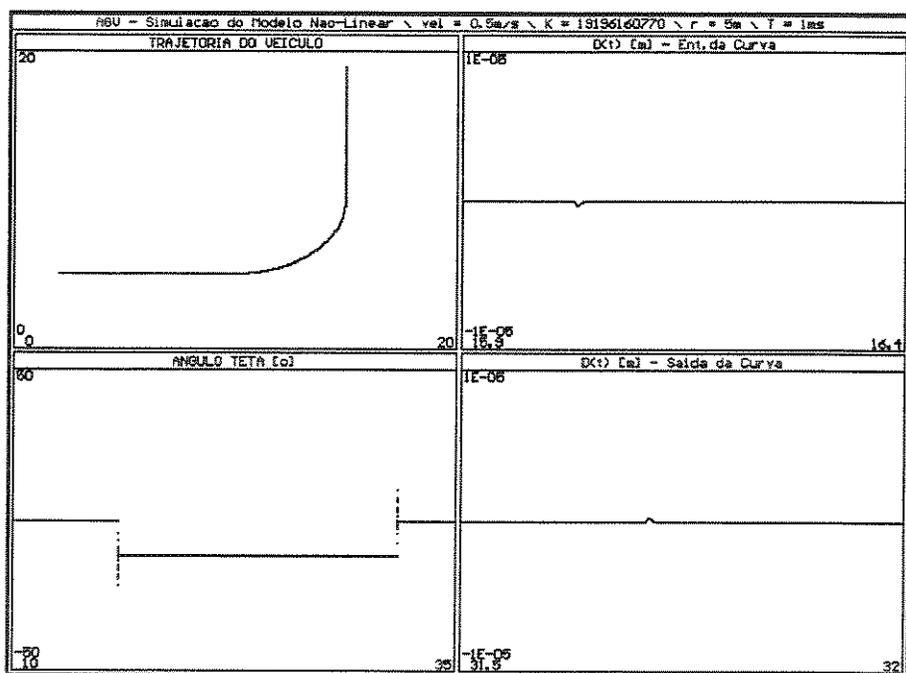


fig.4.61 - raio mínimo = 1.6 m, $K_{cont} = 19196160770$, $T = 1.00$ ms, $v = 0.50$ m/s

E, finalmente, para $v = 0.25$ m/s, $K_{cont} = 76784643070$ (fig.4.62).

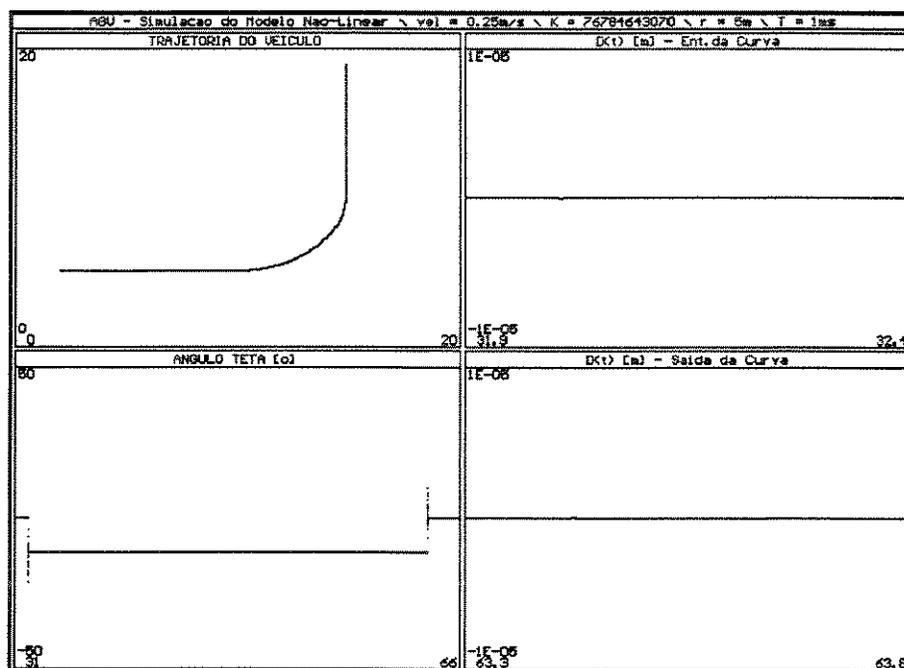


fig.4.62 - raio mínimo = 1.6 m, $K_{cont} = 76784643070$, $T = 1.00$ ms, $v = 0.25$ m/s

Das figuras 4.60 a 4.62 fica evidente o melhor desempenho do sistema com um tempo de amostragem menor, o que poderia ser esperado, uma vez que o controlador vai atuar sobre o sistema a intervalos menores.

Por este motivo é que com um maior tempo de amostragem o ganho foi menor, pois a ação de controle se "integra" no tempo, ou seja, o sistema fica sujeito à mesma ação de controle por um maior período de tempo.

4.5 - Referências Bibliográficas

- [1] Bottura, C.P., (1982). "Análise Linear de Sistemas", Rio de Janeiro, Editora Guanabara Dois.
- [2] Engelke, A., Buseti, M.A., (1992). "Transient - Ein Werkzeug zur Verteilten Simulation Mechatronischer Systeme unter Echtzeitbedingungen", in "Parallele Datenverarbeitung mit dem Transputer", Berlin, Springer-Verlag: 362 - 379.
- [3] Costa, S.E.G. ...[et alii], (1992). "Sistema de Controle de Direção para um Veículo Auto-Guiado", 9º Congresso Brasileiro de Automática, Vitória - ES, UFES, vol.1:390 - 394.
- [4] Martinelli, G.A. ...[et alii], (1992). "Projeto de um Veículo Auto-Guiado", (relatório), Campinas, FEE/UNICAMP.
- [5] Hervella, C., (1990). "Modelamento Dinâmico e Implementação de um Veículo Auto-Guiado (AGV) por Fita Refletiva via Simulação em Computador", Estágio em Iniciação Científica I, Campinas, FEE/UNICAMP.
- [6] Jury, E.I., (1958). "Sampled-Data Control Systems", New York, John Wiley and Sons.
- [7] Chen, C.T., (1984). "Linear System Theory and Design", New York, Holt, Rinehart and Winston.
- [8] Cordeiro, L.E.C., (1990). "SSA : Sistema de Simulação Analógica (versão 1.5) - Manual do Usuário e Referência". Laboratório de Engenharia de Computação e Automação Industrial / Faculdade de Engenharia Elétrica / UNICAMP.
- [9] Ogata, K., (1970). "Engenharia de Controle Moderno", Rio de Janeiro, Prentice Hall do Brasil.
- [10] Ogata, K., (1987). "Discrete-Time Control Systems", New Jersey, Prentice Hall Inc.
- [11] Higdon, A. ...[et alii], (1984). "Mecânica (Dinâmica)", Rio de Janeiro, Prentice Hall do Brasil, vol.2, 2ª edição.

5 - IMPLEMENTAÇÃO

5.1 - O Programa de Controle das Operações do AGV

Dados os subsistemas descritos no capítulo 3 (Unidade de Aquisição de Sinais, com respectivos sensores, Interface Controladora dos Inversores **PWM** e *Drives* de Potência), é parte deste trabalho o desenvolvimento de um programa que faça a integração entre as diversas partes do projeto e que garanta condições de operação ao veículo em desenvolvimento.

O programa foi chamado de PCOAGV - Programa de Controle das Operações do AGV - e foi desenvolvido na Linguagem C (*Microsoft* - versão 5.0), devido à característica de modularidade que a linguagem oferece [1,2,3].

A implementação foi feita de forma sequencial, sendo que ela futuramente deverá ser de forma concorrente, operando então os módulos do programa sob um Núcleo de Tempo Real. Para tanto, na fase de definição e desenvolvimento dos módulos foi feito contato com especialistas em programação concorrente, de maneira que a migração do programa desenvolvido para a forma concorrente seja possível.

Sendo visto o AGV como um sistema, foram identificadas e agrupadas em módulos funções que interagem para uma determinada finalidade, como mostra a fig.5.1 (onde repete-se a fig.3.3).

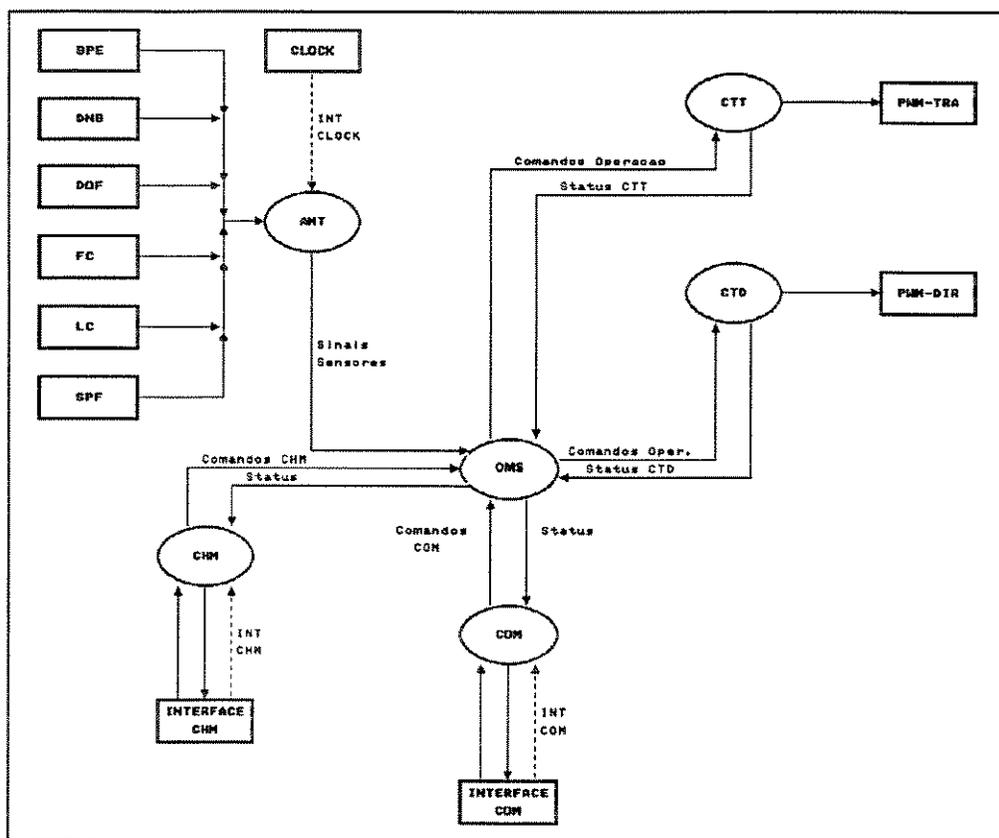


fig.5.1 - módulos do PCOAGV

Assim, os módulos de *software* são Operação e Manutenção do Sistema, Amostrador, Comunicação Homem-Máquina, Comunicação, Controle de Tração e Controle de Direção. Apenas o módulo de Comunicação não foi desenvolvido nesta fase do projeto.

Como o PCOAGV deve garantir a operação do veículo tanto nos modos manual como automático, o algoritmo de controle de direção é executado pelo CTD, o que impõe restrições ao tempo de execução do programa, uma vez que o controlador foi projetado considerando um período de amostragem de 5.00 ms. O tempo de 5.00 ms é suficiente, conforme medições prévias realizadas por *hardware*.

O veículo já operou no modo manual com sucesso, tendo sido testados os comandos que são mostrados na seção 5.1.3.

A seguir, de forma simplificada, são descritos os módulos que foram desenvolvidos.

5.1.1 - Módulo de Operação e Manutenção do Sistema - OMS

Na implementação sequencial do programa, o módulo OMS é bastante simples, sendo na realidade o programa principal, que faz a chamada dos outros módulos, conforme o pseudo-código mostrado na fig.5.2.

```

Se (loop_1 = 1)
{
    AMT
    CHM
    CTT
    CTD
ajusta - ciclo(5ms)
}

```

fig.5.2 - pseudo-código do programa principal

Na fig.5.2, a variável *loop_1* é controlada pelos demais módulos do programa e determina a finalização do PCOAGV. A função "ajusta-ciclo(5.00 ms)" faz o controle das interrupções do relógio do computador e garante que cada ciclo descrito acima possua o tempo de 5.00 ms, exigido pelo sistema de controle automático.

Os módulos são chamados na sequência mostrada pela figura 5.2 e as variáveis globais estão no OMS.

5.1.2 - Módulo Amostrador - AMT

O módulo Amostrador é responsável pela interação com o meio e manuseia as informações obtidas pela Unidade de Aquisição de Sinais.

A cada novo ciclo são solicitadas leituras dos sensores e atualizadas as variáveis respectivas.

A fig.5.3 mostra cada ciclo do AMT.

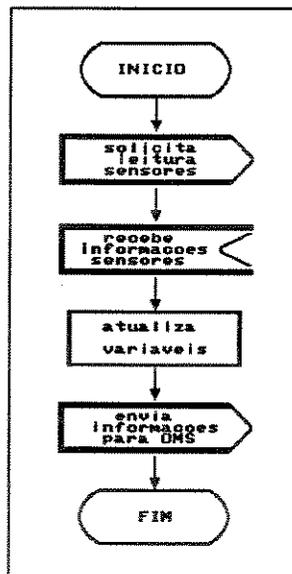


fig.5.3 - módulo AMT

5.1.3 - Módulo de Comunicação Homem-Máquina - CHM

O CHM possibilita a comunicação de um operador com o veículo. A comunicação se dá através de um teclado ou de um *mouse* e o estado do sistema é mostrado por um monitor de vídeo, colocado sobre o computador na fase de desenvolvimento.

Na fig.5.4 é mostrada a tela do PCOAGV.

```

PROJETO AGV/LCA                PCOAGV - Programa de Controle das Operacoes do AGV
-----
ESTADO DO SISTEMA-----EM EXECUCAO
MENSAGEM (INICIALIZACAO)----AUTOMATICO DESABILITADO
MENSAGEM (EXECUCAO)-----
MODO DE OPERACAO-----
SENTIDO-----
PATAMAR DE VELOCIDADE-----

** RESULTADOS DA INICIALIZACAO **

LUZ_DIRECAO    =OK                SENSOR_FIM_CURSO(ESQ)=DEFEITO
LUZ_TRACAO(ESQ)=OK                SENSOR_FIM_CURSO(DIR)=DEFEITO
LUZ_TRACAO(DIR)=OK                RODA CENTRALIZADA    =NAO

APERTE ALGUMA TECLA PARA PROSSEGUIR
-----

```

fig.5.4 - tela do PCOAGV após inicialização

A tela do PCOAGV é constituída de dois campos, com as seguintes informações:

- campo superior:

aparece durante toda a execução do programa.

ESTADO DO SISTEMA: INICIALIZAÇÃO, EM EXECUÇÃO, FIM DO PROGRAMA

MENSAGEM (INICIALIZAÇÃO): INICIALIZAÇÃO "OK", AUTOMÁTICO DESABILITADO

MENSAGEM (EXECUÇÃO): AUTOMÁTICO DESABILITADO

MODO DE OPERAÇÃO: MANUAL, AUTOMÁTICO

SENTIDO: FRENTE, TRÁS

PATAMAR DE VELOCIDADE: 0.25 m/s, 0.50 m/s, 1.00 m/s

- campo inferior:

é composto de duas telas, sendo que uma aparece durante a inicialização e a outra durante a execução do programa.

- durante a inicialização:

LUZ_DIREÇÃO: "OK", DEFEITO

LUZ_TRAÇÃO (ESQ): "OK", DEFEITO

LUZ_TRAÇÃO (DIR): "OK", DEFEITO

SENSOR_FIM_CURSO (ESQ): "OK", DEFEITO

SENSOR_FIM_CURSO (DIR): "OK", DEFEITO

RODA CENTRALIZADA: SIM, NÃO

- durante a execução:

F1: FINALIZA PARADA

F2: INICIALIZAÇÃO

F3: FIM DO PROGRAMA

F4: MODO MANUAL

F5: MODO AUTOMÁTICO

F6: FRENTE

F7: TRÁS

F8: 0.25 m/s

F9: 0.50 m/s

F10: 1.00 m/s

BARRA DE ESPAÇO: EMERGÊNCIA

Na fig.5.4 está representada a situação em que a inicialização foi concluída e, tendo havido defeito nos fins-de-curso direito e esquerdo, não foi feita a centralização da roda e assim dada a mensagem da inicialização que o modo automático foi desabilitado.

```

PROJETO AGV/LCA                PCOAGV - Programa de Controle das Operacoes do AGV
-----
ESTADO DO SISTEMA-----EM EXECUCAO
MENSAGEM (INICIALIZACAO)---AUTOMATICO DESABILITADO
MENSAGEM (EXECUCAO)-----
MODO DE OPERACAO-----MANUAL
SENTIDO-----FRENTE
PATAMAR DE VELOCIDADE-----1.00 m/s
-----

** OPCOES DURANTE A EXECUCAO **

F1 =FINALIZA PARADA           F6 =FRENTE
F2 =INICIALIZACAO            F7 =TRAS
F3 =FIM DO PROGRAMA          F8 =0.25 m/s
F4 =MODO MANUAL               F9 =0.50 m/s
F5 =MODO AUTOMATICO          F10=1.00 m/s

BARRA DE ESPACO = EMERGENCIA
-----

```

fig.5.5 - tela do PCOAGV durante execução do programa

Na fig.5.5 é mostrada a tela durante a execução do programa, tendo sido solicitado o modo manual de operação do veículo, com sentido de deslocamento para frente e velocidade de regime de 1.00 m/s. Na parte inferior da tela são mostradas as opções de operação, com as teclas respectivas.

No modo manual, o AGV/LCA tem o seu controle de tração e direção feito por um *mouse* de três botões, sendo que os botões da esquerda e central comandam a roda de direção para o lado esquerdo e direito, respectivamente, e o botão da direita o motor de tração.

Na fig.5.6 é mostrado o ciclo do CHM.

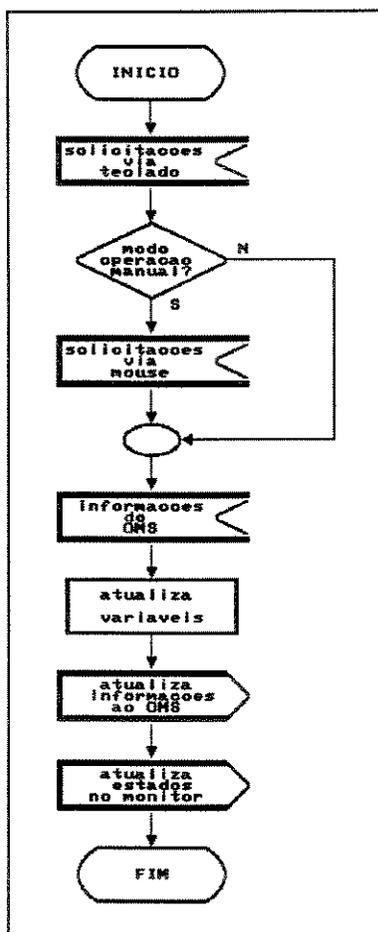


fig.5.6 - módulo CHM

5.1.4 - Módulo de Controle de Tração - CTT

Os módulos de Controle de Tração e Direção, dada a complexidade, foram divididos em sub-módulos com funções específicas, conforme mostra a fig.5.7.

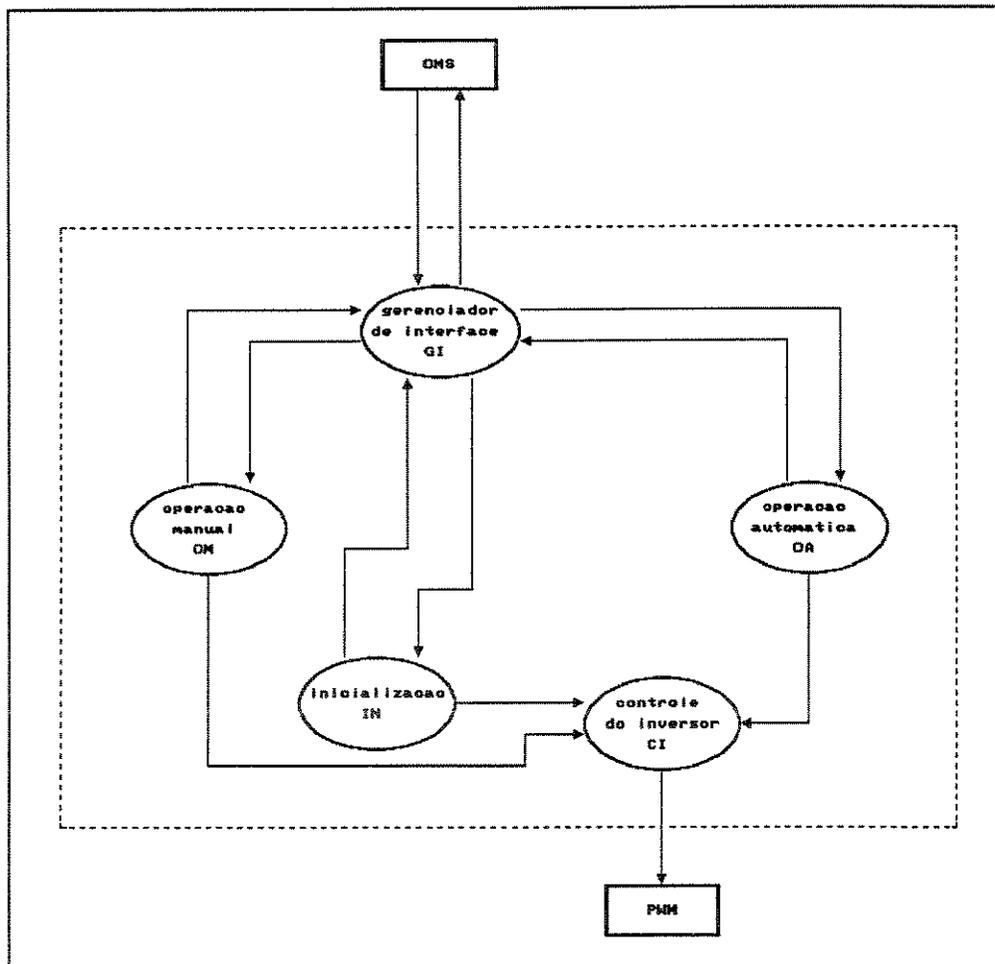


fig.5.7 - estrutura dos módulos CTT e CTD

Tanto CTT como CTD são constituídos por:

- GI: Gerenciador de Interfaces. É responsável pela comunicação com o meio externo e com os demais módulos do CTT e do CTD.
- IN: Inicialização. Tem como objetivo a inicialização das variáveis utilizadas pelos módulos.
- OM: Operação Manual. Tem como objetivo permitir que o veículo seja guiado manualmente por um operador.
- OA: Operação Automática. É responsável por garantir as ações para que o veículo opere no modo automático, o que inclui o controle das paradas em estações no CTT e o algoritmo de controle de direção no CTD.

- CI: Controle do Inversor. Envia comandos para a Interface Controladora dos Inversores **PWM**, bem como executa os algoritmos para a compensação de tensão dos motores quando eles operam em baixas frequências.

A fig.5.8 mostra o ciclo do Gerenciador de Interfaces do CTT e CTD.

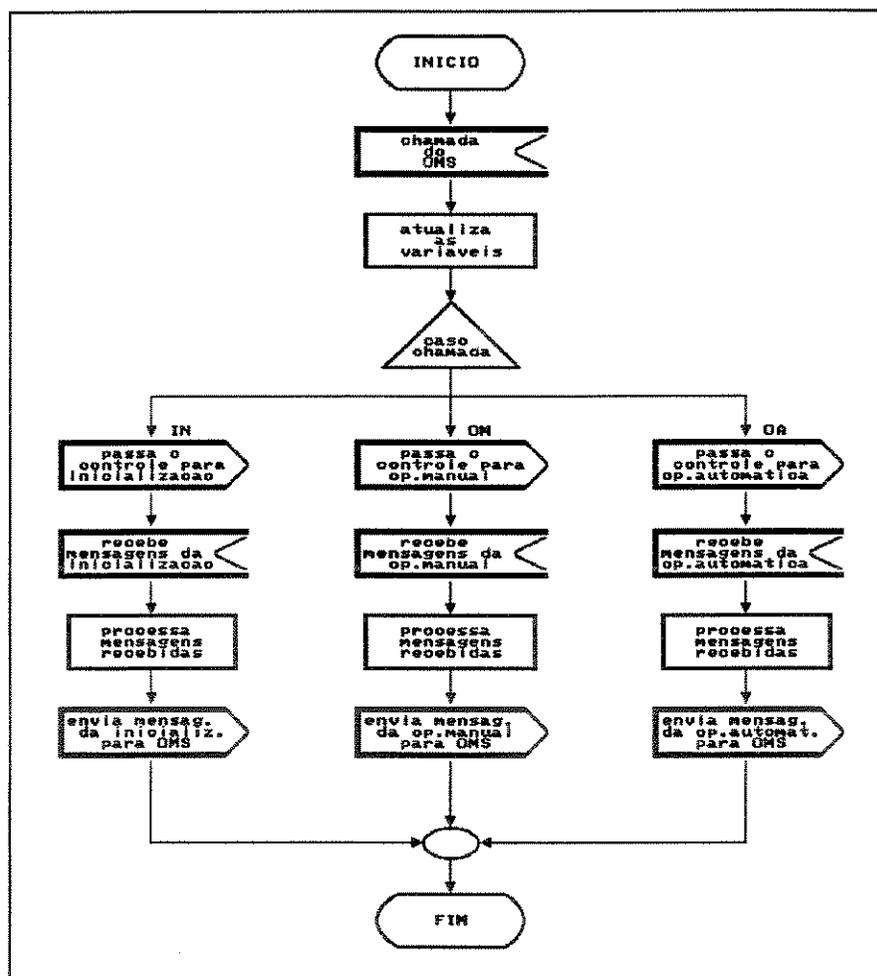


fig.5.8 - Gerenciador de Interfaces dos módulos CTT e CTD

Na fig.5.9 é mostrado o ciclo do módulo de inicialização do CTT.

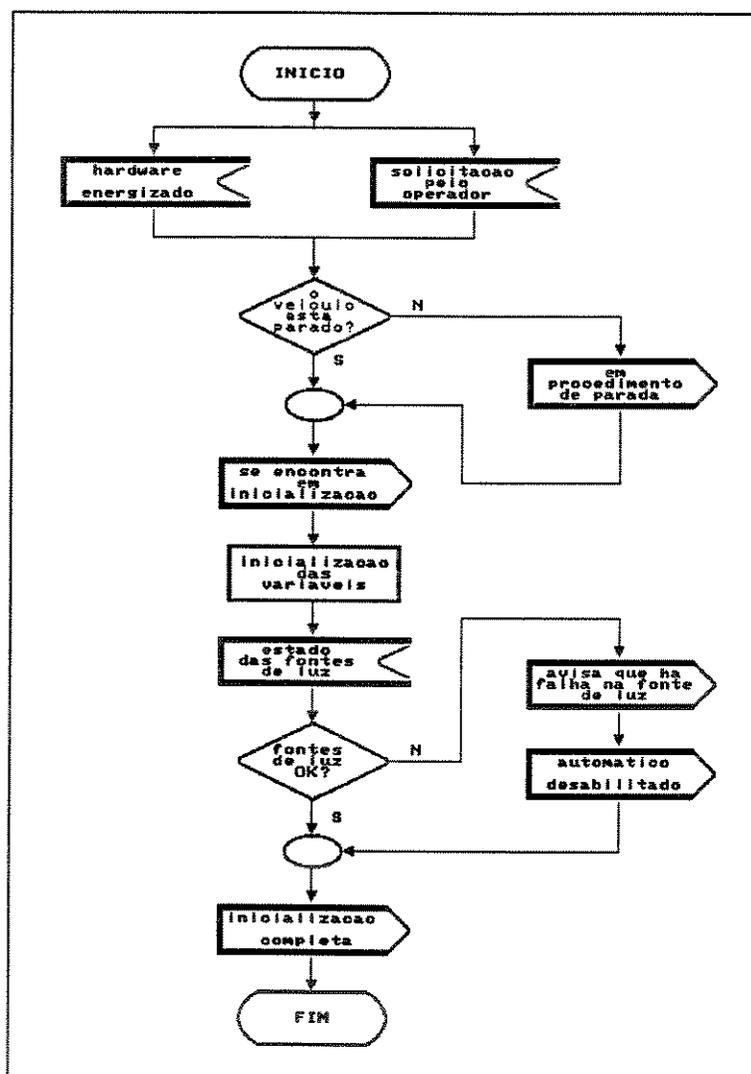


fig.5.9 - módulo de Inicialização do CTT

A inicialização sempre é feita quando o sistema começa a operar, ou seja, quando o veículo é energizado. Pode, também, ser solicitada a qualquer momento por um operador.

Caso seja identificado defeito na fonte de luz dos sensores de ponto de parada (Leitor de Códigos), o modo de operação automático é desabilitado.

Na fig.5.10 é mostrado o ciclo do módulo de Operação Manual do CTT.

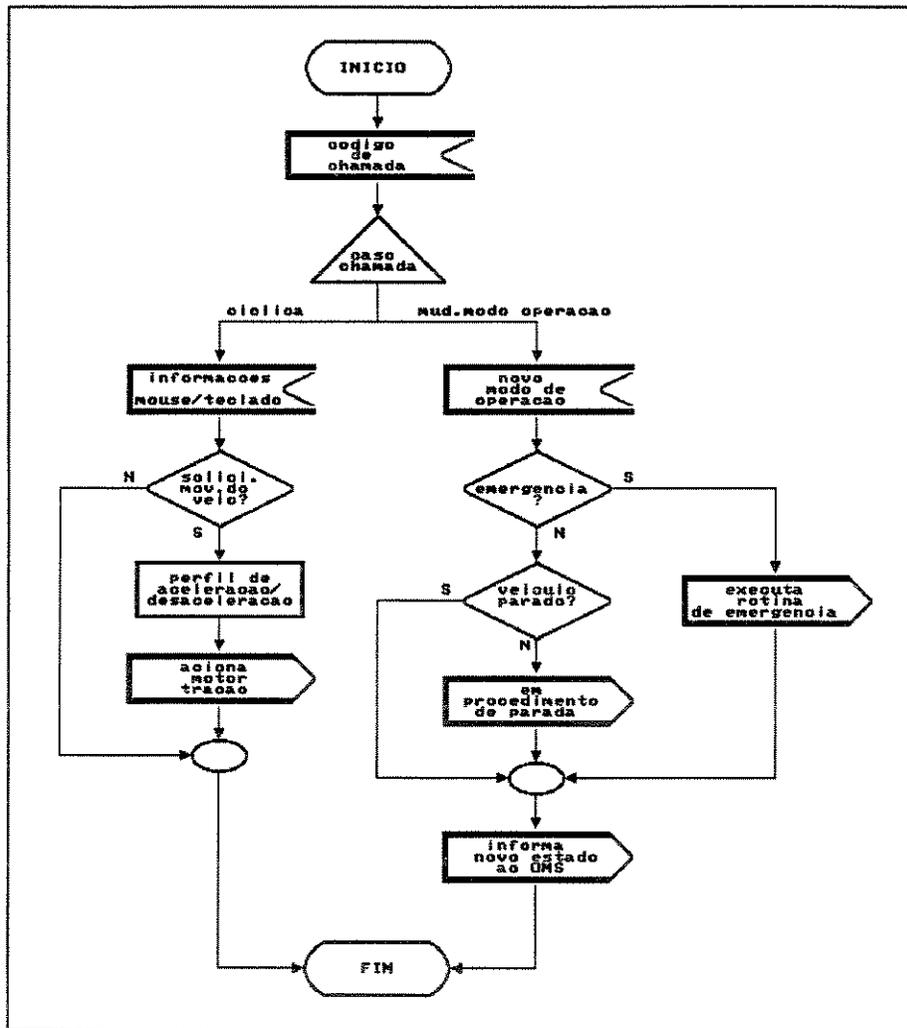


fig.5.10 - módulo de Operação Manual do CTT

A Operação Manual pode ser chamada de forma cíclica, a cada 5.00 ms, ou quando é solicitado novo modo de operação, que pode ser a passagem do modo automático para o manual ou que o veículo seja colocado em estado de emergência, quando é executada uma rotina que faz a parada rápida do carro. O estado de emergência pode ser solicitado por um operador, tanto na operação automática quanto manual, ou como resultado da leitura de algum sensor, que indique falha no sistema ou na sua operação.

No caso da chamada cíclica, o veículo pode ser acelerado, desacelerado ou pode ser mantido o seu estado parado ou de movimento, sendo possível também a passagem de um patamar de velocidade para outro.

A possibilidade de variação da velocidade com o veículo em movimento é importante na aplicação prática do AGV, como por exemplo numa situação em que o veículo faça a interligação entre dois ambientes distantes. Evidentemente devem ser consideradas questões como a forma da trajetória e o acesso de pedestres através do caminho seguido pelo carro.

A aceleração e desaceleração são feitas de acordo com um perfil suave, para evitar variações bruscas de velocidade. Na seção 5.2 são feitas considerações sobre essa característica.

Na fig.5.11 é mostrado o ciclo do módulo de Operação Automática do CTT.

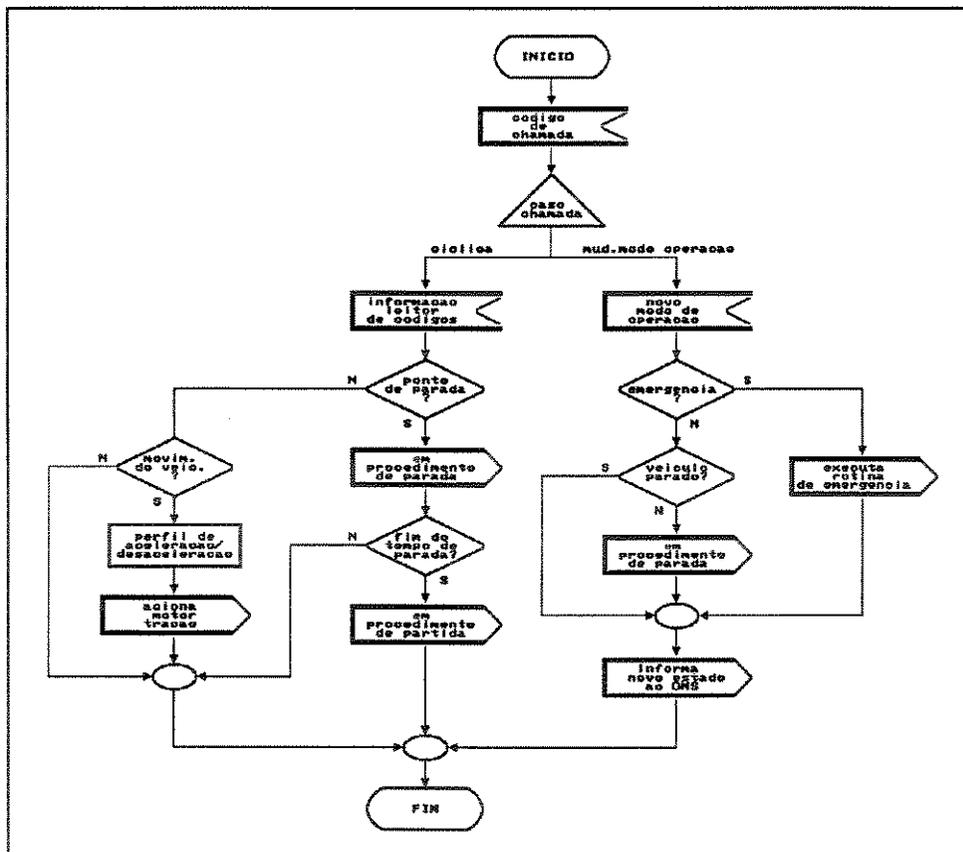


fig.5.11 - módulo de Operação Automática do CTT

Da mesma forma que no caso anterior, o módulo OA pode ter chamada cíclica ou para a mudança do modo de operação.

No caso da chamada cíclica, se for solicitada a movimentação do veículo, são determinados os comandos de aceleração ou desaceleração. Caso contrário, o sistema de tração permanece no mesmo estado.

Controla-se, também, as paradas em estações de trabalho que são identificadas pelo Leitor de Códigos, e cessado o tempo previsto para a parada (ou dado um comando via teclado), o veículo é colocado em movimento novamente.

Na fig.5.12 é mostrado o ciclo do módulo de Controle do Inversor do CTT.

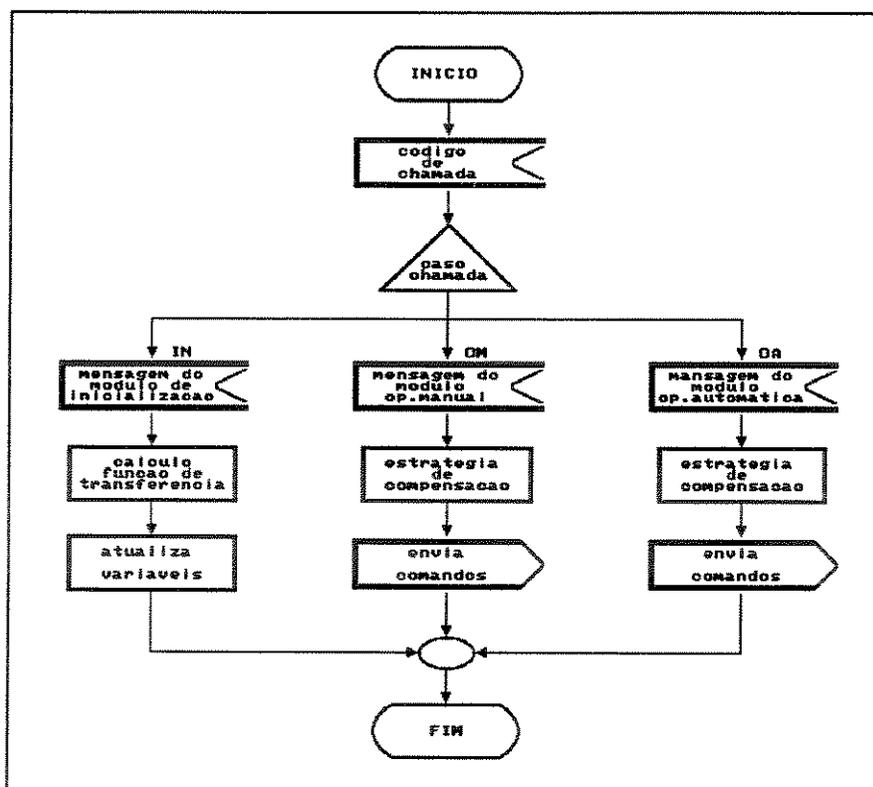


fig.5.12 - módulo de Controle do Inversor do CTT

Neste módulo é executada a estratégia de compensação de tensão (que é mostrada na seção 5.3) bem como o cálculo da "função de transferência" dos VCOs da Interface Controladora dos Inversores PWM (seção 5.4).

5.1.5 - Módulo de Controle de Direção - CTD

O módulo CTD tem a mesma estrutura do CTT, mostrada na fig.5.7.

O módulo GI do CTD também tem o ciclo mostrado na figura 5.8.

O módulo Inicialização é mais complexo, pois durante a inicialização do CTD, são feitos os testes na lâmpada do Sensor de Posicionamento sobre a Faixa, nos sensores de fim-de-curso e a centralização da roda, caso os sensores de fim-de-curso não apresentem defeito.

O ciclo da Inicialização é mostrado nas figuras 5.13 a 5.15.

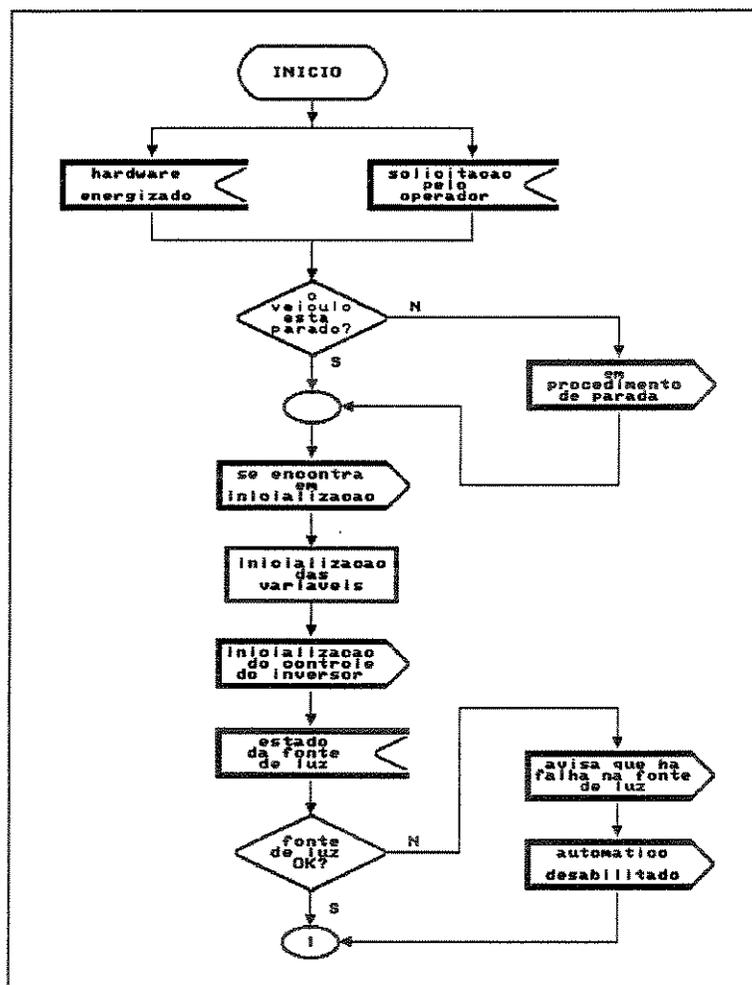


fig.5.13 - módulo de Inicialização do CTD

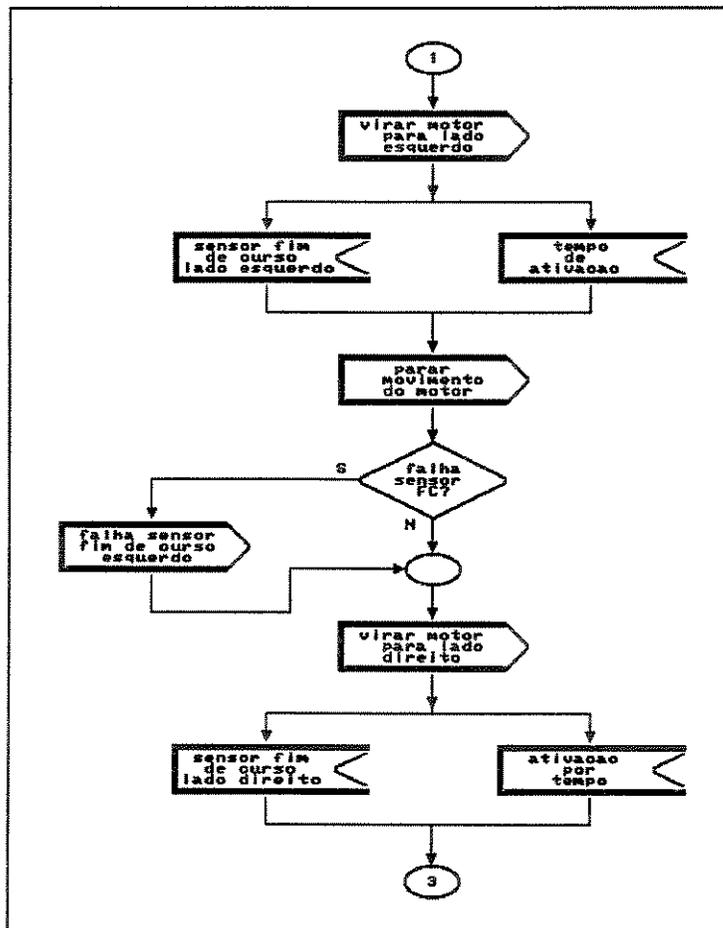


fig.5.14 - módulo de Inicialização do CTD (continuação)

Como na Inicialização do CTT, caso haja defeito na lâmpada do Sensor de Posicionamento sobre a Faixa, o modo automático é desabilitado.

Se não houver defeito em algum fim-de-curso, a roda de direção é centralizada ao final da Inicialização. Caso contrário, não é feita a centralização da roda e o modo de operação automático é desabilitado.

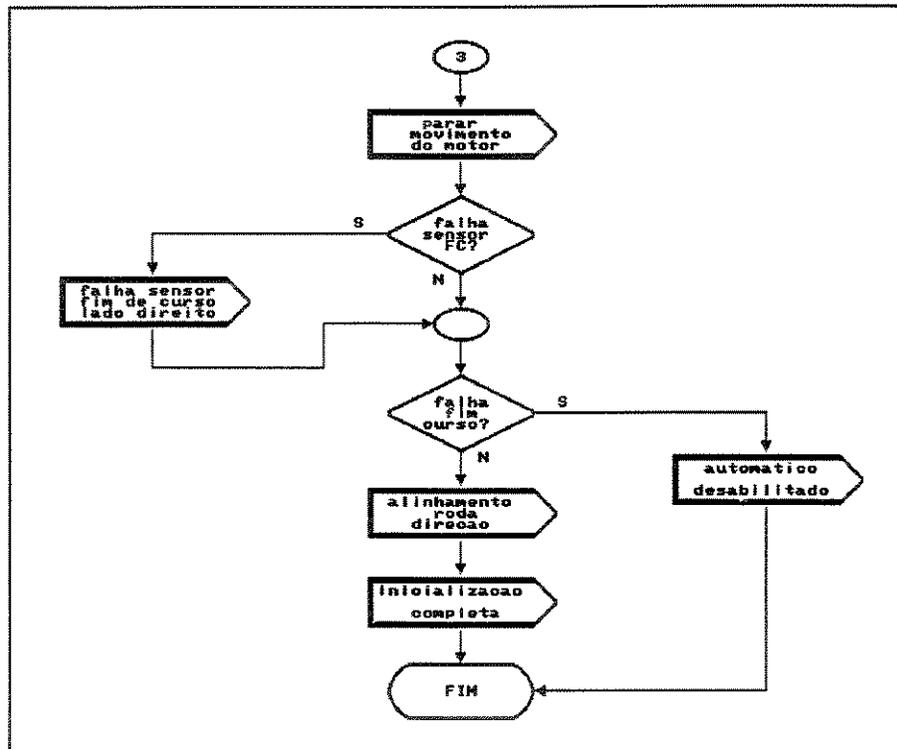


fig.5.15 - módulo de Inicialização do CTD (continuação)

O módulo Operação Manual do CTD é apresentado na fig.5.16.

O OM do CTD é bastante parecido com o do CTT, sendo que as informações são oriundas apenas do *mouse* e não há um perfil de variação suave de velocidade para o caso do motor de direção.

Da mesma forma, o OM pode ser chamado de forma cíclica ou para a mudança do modo de operação.

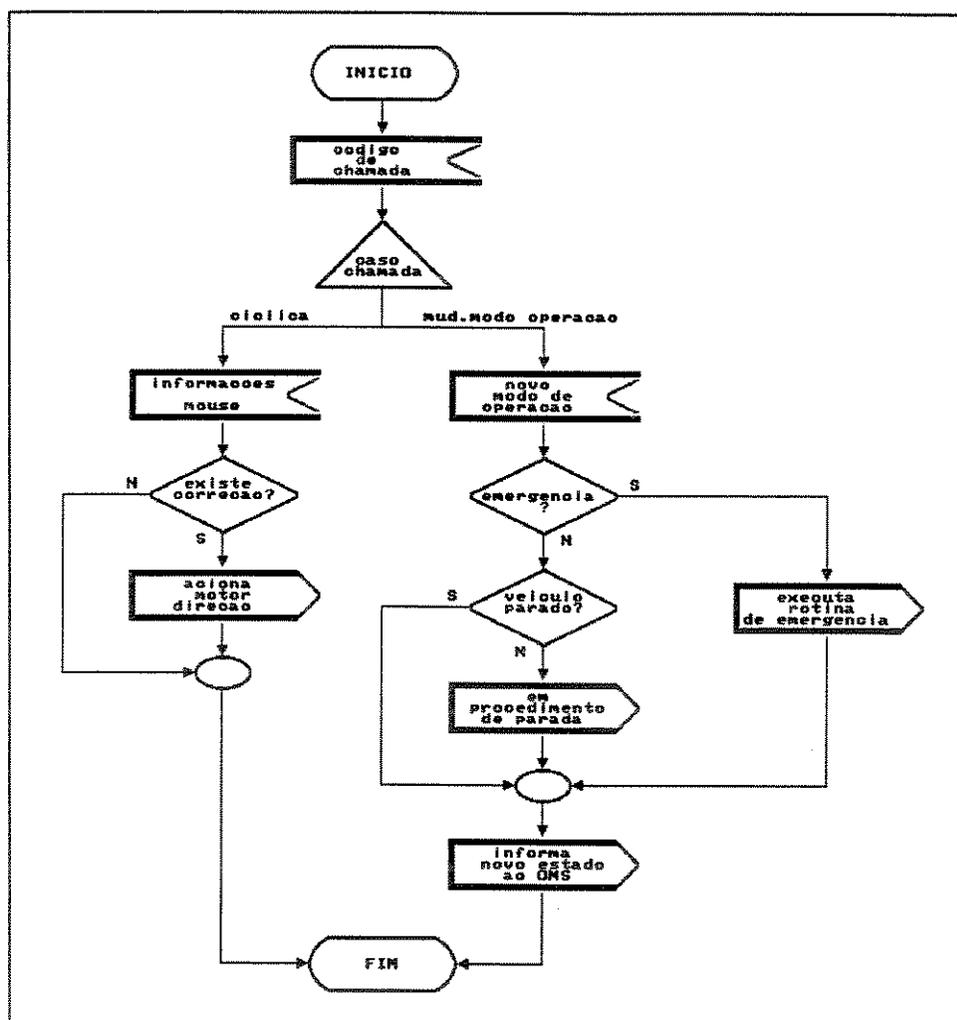


fig.5.16 - módulo de Operação Manual do CTD

A fig.5.17 mostra o módulo de Operação Automática do CTD.

Dado o erro lido pelo Sensor de Posicionamento sobre a Faixa, é executado o algoritmo de controle de direção, quando a ação do controlador é imposta sobre o sistema.

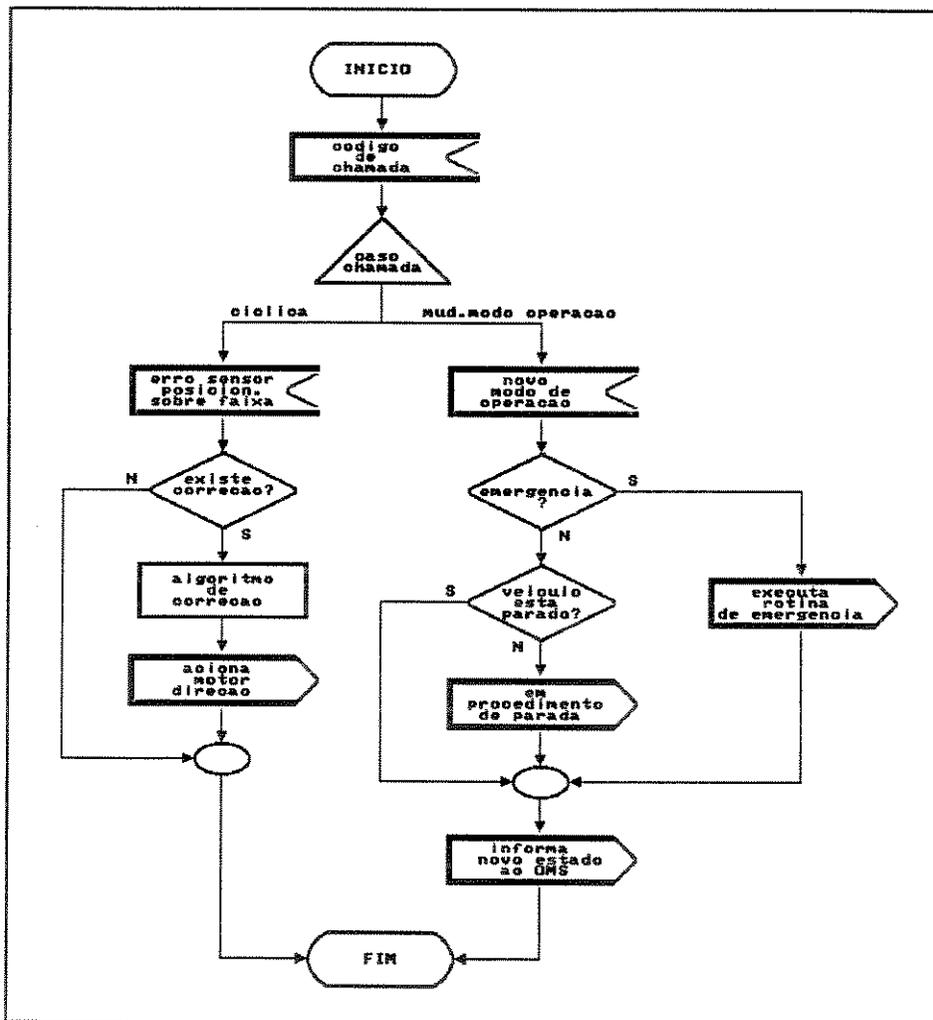


fig.5.17 - módulo de Operação Automática do CTD

Finalizando o Módulo CTD, a fig 5.18 mostra o ciclo do módulo de Controle do Inversor do CTD.

A diferença deste módulo para o similar do CTT ocorre no caso do CI ser chamado pelo IN, quando num primeiro ciclo é determinada a "função de transferência" dos DACs da Interface Controladora dos Inversores PWM e nos demais são enviados comandos para os motores, para o teste dos fins-de-curso e a centralização da roda.

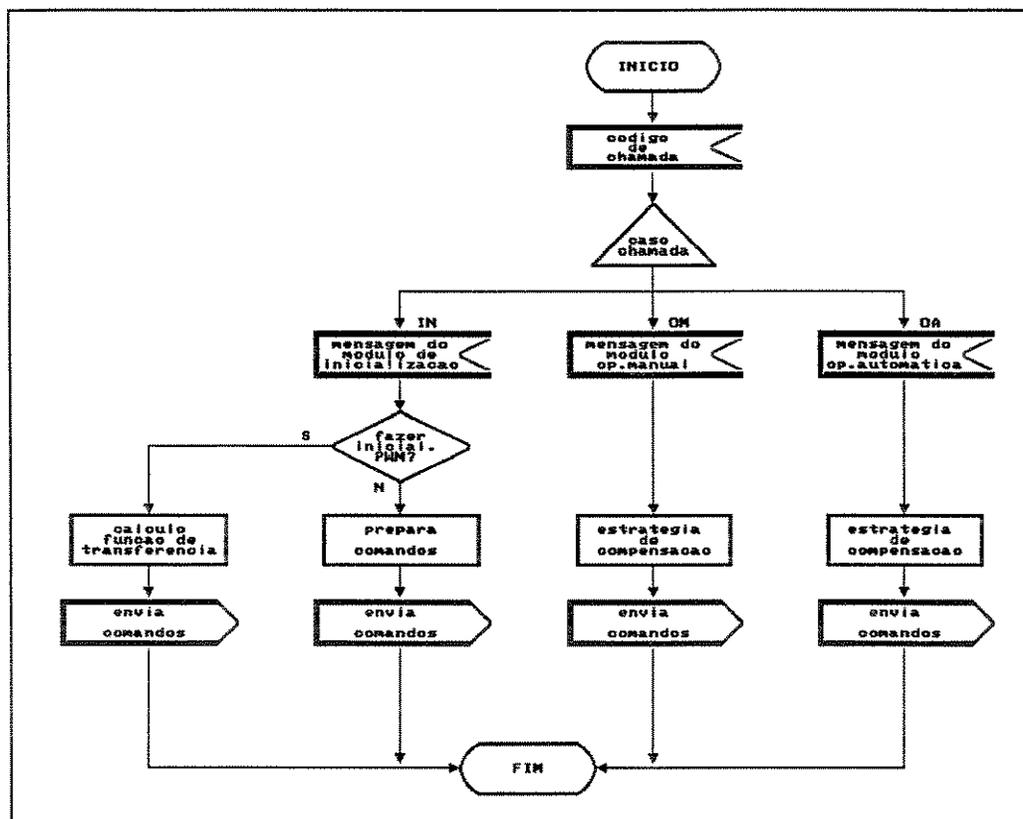


fig.5.18 - módulo de Controle do Inversor do CTD

5.1.6 - Estrutura de Dados

Foi adotada a estrutura de dados mostrada a seguir, com a finalidade de servir como documento de padronização e referência dos dados usados pelo PCOAGV.

Na fig.5.19 é dado um exemplo para a variável que indica o estado de mobilidade do veículo.

<p><i>Nome: EST_MOBIL</i></p> <p><i>Descrição. Indica o estado de mobilidade do veículo</i></p> <p><i>Formata CHAR</i></p> <p><i>Faixa de valores P; M; " B"</i></p> <p><i>(X)ENTRADA ()SAÍDA ()LOCAL</i></p> <p><i>Utilizada por: todos os módulos</i></p> <p><i>Obs: P – estado PARADO</i></p> <p><i> M – estado MOVIMENTO</i></p> <p><i> " B" – estado INDEFINIDO</i></p>
--

fig.5.19 - estrutura de dados do PCOAGV

5.2 - Perfil Suave de Variação de Velocidade

Sendo o AGV/LCA concebido para aplicações no meio industrial, a variação da sua velocidade deve ser suave para que, por exemplo, uma peça sobre o carro não mude a sua posição nas situações de partida ou parada do veículo. Esta precaução deve ser tomada tendo-se em vista que o AGV poderá fazer parte de um sistema automatizado, portanto, deverá ter condições de interagir com outros elementos deste sistema, *e.g.* um manipulador robótico.

Para evitar o problema do *jerk* - que dá a medida da taxa de variação da aceleração [4] e é o responsável por um movimento brusco do veículo - foi adotada uma função cossenoidal para a variação da velocidade do carro.

Na implementação feita, o carro pode operar nas velocidades de 0.25 m/s, 0.50 m/s e 1.00 m/s. Para estes três casos, tanto nas situações de partida, parada e mudança do patamar de velocidade, foi adotada uma aceleração média de 1.00 m/s^2 , ou seja, o perfil de variação de velocidade é concluído em 0.25 s, 0.50 s e 1.00 s, respectivamente.

O perfil cossenoidal foi gerado por um programa e então criado um arquivo com os seus valores. Quando o PCOAGV é colocado em operação, o arquivo é lido e é gerado um vetor que é usado pelo módulo de Controle do Inversor do CTT.

A opção pela utilização do vetor, e não pelo cálculo direto da função cossenoidal, se deu com o intuito de garantir o ciclo de 5.00 ms exigido pelo sistema de controle de direção.

5.3 - Compensação de Tensão dos Motores Operando em Baixas Frequências

Os motores de indução, operando em baixas frequências, necessitam que a tensão de alimentação seja aumentada, para compensar a queda de tensão nos enrolamentos [5].

Como deve-se garantir que o AGV opere em baixas velocidades, foram feitos estudos para a compensação da tensão dos motores de tração e direção em baixas frequências.

A fig.5.20 mostra a simulação do comportamento do motor de tração (representado através do modelo dinâmico dqo [6]), onde foi aplicado um perfil cossenoidal de variação de velocidade, e observa-se a velocidade do rotor da máquina.

Na fig.5.20, VQS representa a tensão do estator (eixo q), EQS a tensão induzida (eixo q), ω_r a velocidade do rotor e ω_e a frequência da fonte de alimentação.

Observa-se que nas frequências mais baixas o motor não consegue acompanhar o perfil de velocidade imposto. Na prática, o motor não conseguia partir, uma vez que já possuía como carga o próprio veículo.

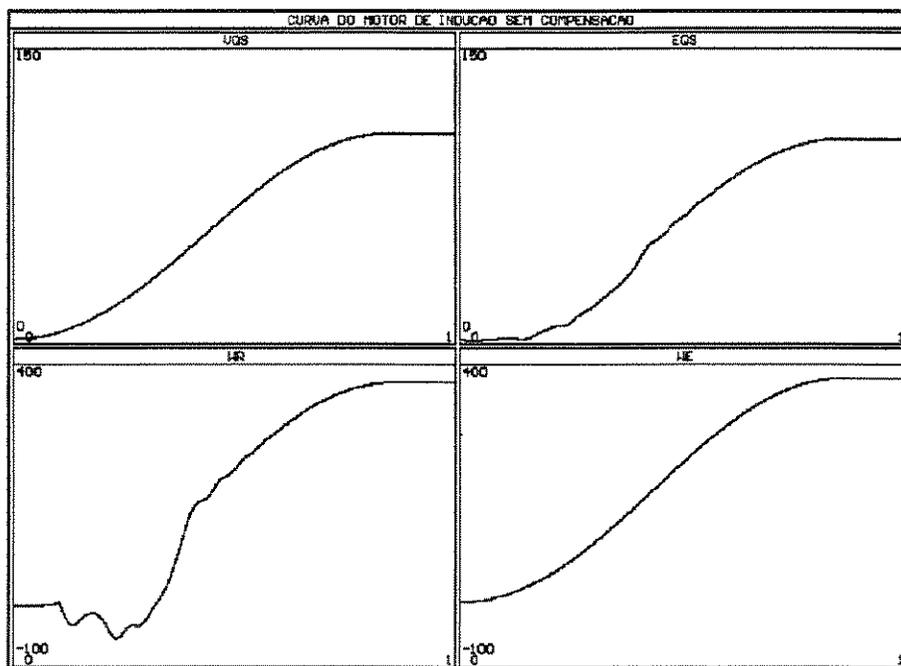


fig.5.20 - comportamento do motor de tração excitação por função cossenoidal

Os parâmetros das máquinas, para simulação, foram obtidos através de ensaios, segundo [7].

O controle de velocidade foi baseado no método do fluxo constante, onde a relação entre tensão e frequência de alimentação é mantida constante [5].

Na compensação de tensão, esta relação é alterada durante uma faixa de frequência.

Foram utilizados dois HEF 4752V [8], um para o sistema de tração e o outro para o de direção. Cada HEF 4752V possui dois sinais de comando, que são as frequências "ffct" e "fvct", que controlam a frequência e o valor eficaz da tensão da senóide sintetizada, respectivamente.

Fixando-se a frequência "fvct" no seu valor nominal, para alterações no valor de "ffct", a relação entre a tensão e a frequência de saída mantém-se constante, e o controle de velocidade se faz através da variação de "ffct". Desta forma, deve-se alterar o valor de "fvct" no intervalo de frequência em que se faz a compensação de tensão.

Assim, procurou-se, num processo de tentativa e erro, o menor valor de tensão para que o motor partisse e a tensão passou a ser reduzida até que a relação entre a tensão e a frequência da máquina voltasse a ser constante.

A fig.5.21 mostra a simulação do comportamento do motor de tração em que a estratégia de compensação foi aplicada.

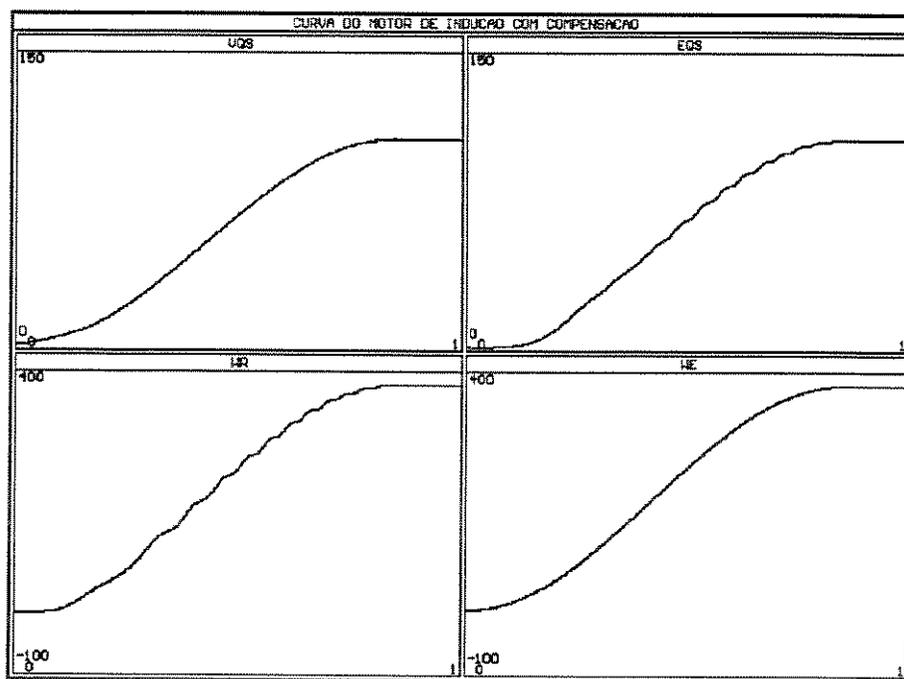


fig.5.21 - comportamento do motor de tração, sendo aplicada a estratégia de compensação de tensão

Observa-se que a velocidade do rotor acompanha o perfil da frequência da fonte de alimentação.

Utilizando como referência os valores encontrados através da simulação, foram realizados ensaios com o motor de tração e conseguiu-se que ele operasse com carga durante todo o intervalo de variação de velocidade do AGV, o que foi confirmado na operação manual do veículo.

Para o motor de direção foi utilizada a mesma metodologia.

5.4 - Relação entre o Valor Digital aplicado aos DACs e a Frequência de Saída dos VCOs

Chamou-se de "Função de Transferência dos VCOs" a relação existente entre o valor digital aplicado aos **DACs** e a frequência de saída dos **VCOs** da Interface Controladora dos Inversores **PWM**, descrita no item 3.4.2.

Os valores de entrada do CI HEF 4752V, que gera os sinais de **PWM** para controle dos inversores, são oriundos dos **VCOs** que têm como entrada os sinais que vêm dos **DACs**.

A obtenção de uma relação experimental foi importante, uma vez que a resposta dos **VCOs** não é linear para toda a faixa de valores possível dos **DACs**.

Deu-se os nomes de **VCO1** e **VCO2** para o controle de frequência e tensão da tração, respectivamente e de **VCOs 3** e **4** para a frequência e tensão do sistema de direção, respectivamente.

Sendo os **DACs** de 12 *bits*, para cada conjunto **DCA+VCO** aplicou-se valores de 100 a 4000, com passo igual a 100, e os valores de saída eram lidos por um osciloscópio e anotados.

Para cada **VCO** montou-se um arquivo com a relação entre o número digital aplicado à entrada do **DAC** e a frequência de saída do **VCO**, que é mostrada a seguir:

Na fig.5.22 apresenta-se a "função de transferência" do **VCO1**, cujo sinal de saída corresponde ao "ffct" do HEF 4752V do sistema de tração.

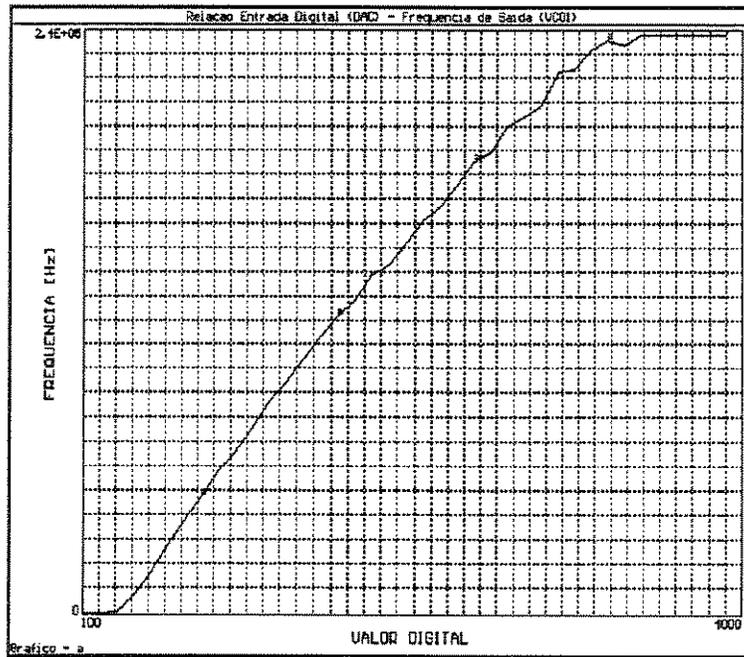


fig.5.22 -"função de transferência" do VCO1

Para o sinal "fvct" do mesmo sistema, a relação é mostrada na fig.5.23.

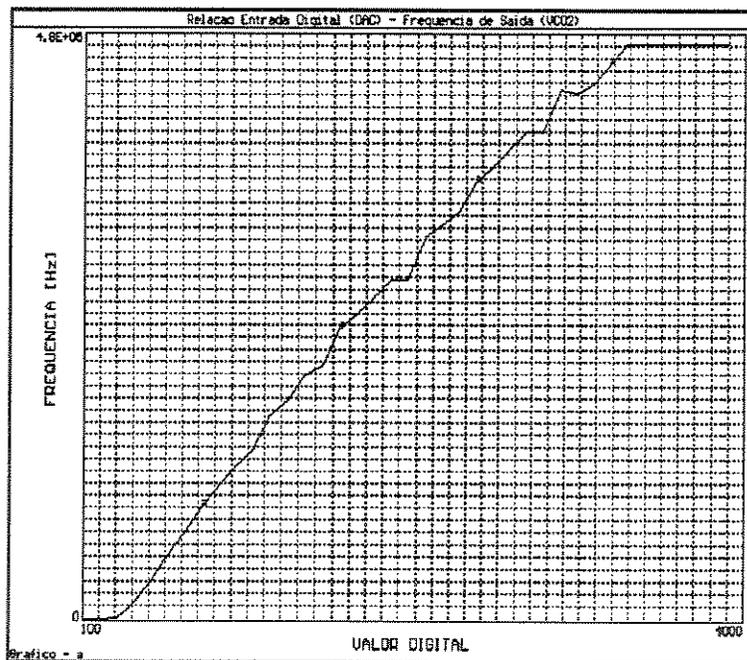


fig.5.23 -"função de transferência" do VCO2

Da mesma forma, para o sistema de direção tem-se as figuras 5.24 e 5.25.

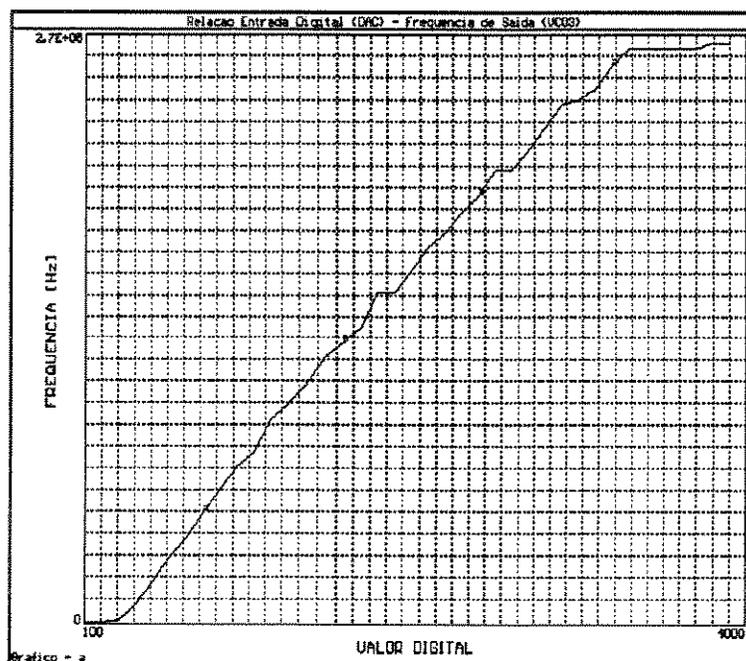


fig.5.24 -"função de transferência" do VCO3

A saída do VCO3 corresponde ao sinal que controla a frequência da onda sintetizada, e a do VCO4 ao valor eficaz de tensão da onda sintetizada.

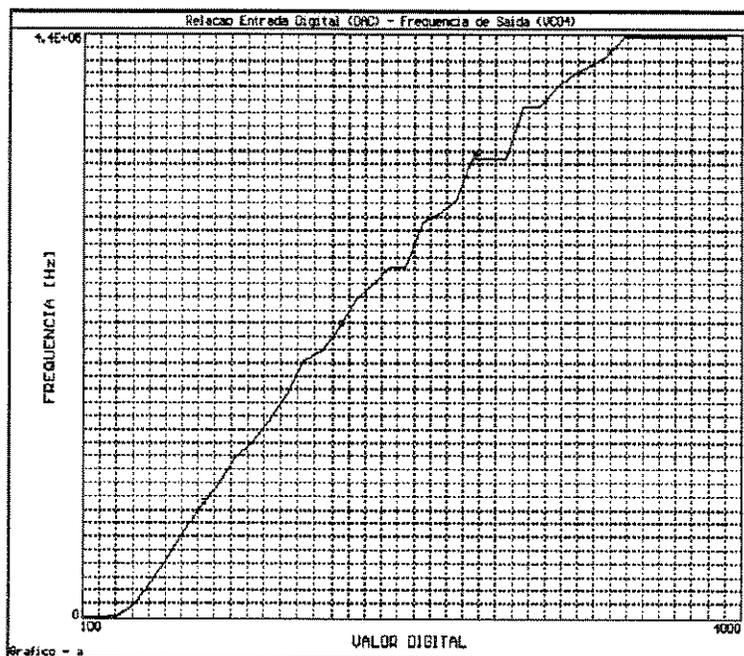


fig.5.25 -"função de transferência" do VCO4

Considerando-se que as faixas de variação dos sinais de "ffct" para os sistemas de tração e direção têm como valor superior 170000, e de "fvct" 330000, e que nestas faixas a relação é aproximadamente linear, as "funções de transferência" de cada VCO foram aproximadas por retas, através do Método dos Mínimos Quadrados [9].

Nas figuras 5.12 e 5.18, que descrevem o ciclo dos módulos de Controle do Inversor do CTT e do CTD, respectivamente, faz-se referência ao cálculo das "funções de transferência" dos VCOs. Isto porque, sendo os DACs bastante sensíveis aos valores de tensão da alimentação, pretende-se que a cada inicialização seja feito o cálculo das "funções de transferência". Isto pode ser feito utilizando-se o frequencímetro citado em 3.4.2 (e descrito em [10]), sendo a reta também calculada pelo Método dos Mínimos Quadrados.

Na implementação feita, considera-se como "função de transferência" as retas obtidas a partir das curvas mostradas nas figuras 5.22 a 5.25.

5.5 - Tratamento dos Sinais Obtidos pelo Sensor de Posicionamento sobre a Faixa

Os Sensores de Posicionamento sobre a Faixa geram um sinal de tensão analógico proporcional à distância do veículo em relação à trajetória definida pela fita refletiva.

A fonte de luz é uma lâmpada de 1 W alimentada por 5 V, e os sensores são fototransistores.

Os sinais são digitalizados por um conversor A/D de 12 bits.

Fez-se necessário, portanto, obter a relação entre o valor da tensão "digital" e o erro medido.

A fita refletiva é de cor amarela, com 2 cm de largura, fixada sobre uma base de cor preta com 10 cm de largura, tentando-se assim diminuir a influência que a cor do piso possa exercer sobre a leitura do erro.

A fig.5.26 representa a fita refletiva utilizada.

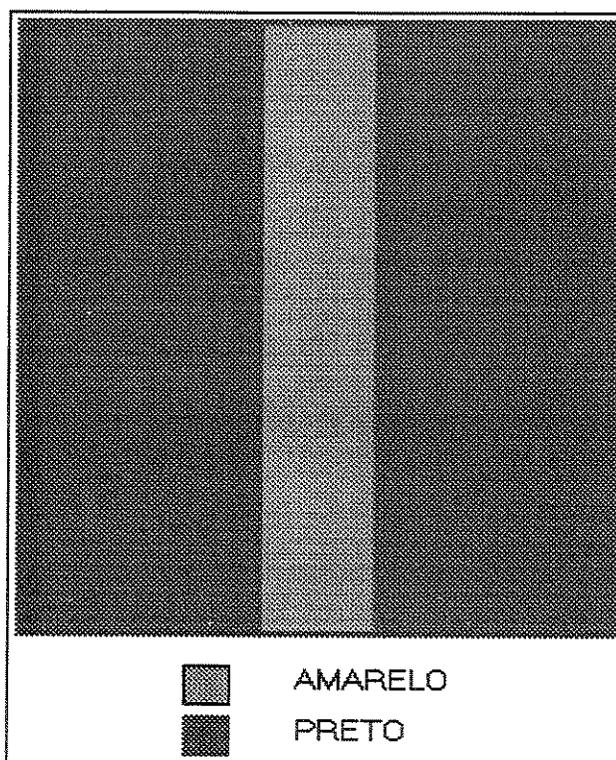


fig.5.26 - fita refletiva utilizada

A fonte de luz e os sensores foram presos à carcaça do veículo, numa posição em que a roda de direção não passe sobre a fita, de forma a não sujá-la.

Na fig.5.27 é mostrada a posição dos Sensores de Posicionamento sobre a Faixa, onde vê-se também a roda de direção do carro.

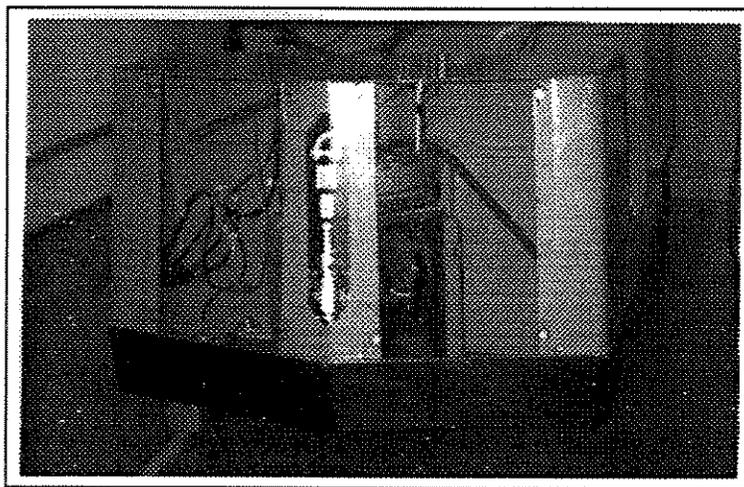


fig.5.27 - Sensores de Posicionamento Sobre a Faixa e roda de direção do veículo

O sensor foi fixado à carcaça através de uma estrutura que permite a movimentação dele nos três eixos, para que sejam possíveis testes referentes à influência que a posição do sensor possa ter em relação ao sistema em malha fechada.

Na fig.5.28 é mostrada a fixação do Sensor de Posicionamento sobre a Faixa no veículo.

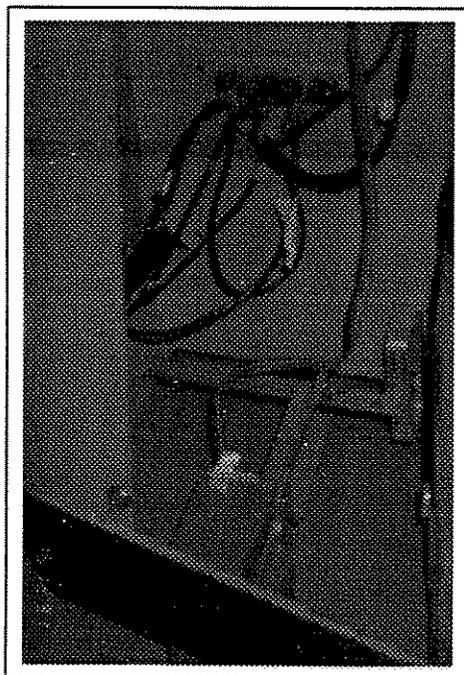


fig.5.28 - detalhe da fixação do SPF na carcaça do *AGV/LCA*

O SPF foi fixado a uma distância de 2 mm do piso e, para uma faixa de valores de 21 mm à esquerda e à direita, em relação ao centro da fita refletiva, foram anotados os correspondentes valores de tensão.

Os pares obtidos são mostrados na fig.5.29.

Observa-se, através da figura, que a curva tem uma forma aproximadamente linear, em particular para valores entre 12 mm à esquerda e à direita, que correspondem a uma largura superior a da faixa.

Obteve-se então, pelo Método dos Mínimos Quadrados [9], a equação da reta que melhor se ajusta à curva, neste intervalo. A partir da equação da reta e da relação entre a tensão analógica e a digital para um conversor de 12 bits, chegou-se à função linear aproximada que relaciona o valor digital obtido para cada valor de erro.

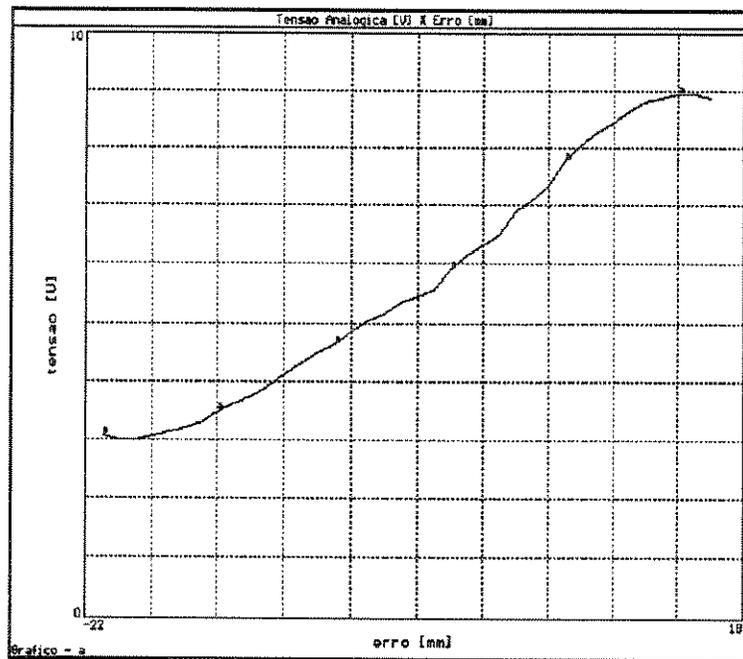


fig.5.29 - relação obtida experimentalmente do valor de tensão em função do erro

A cada ciclo de 5.00 ms são feitas 4 leituras, cuja média aritmética é o valor digital correspondente ao erro do carro em relação à trajetória.

Foi criado um arquivo que contém os pares ordenados obtidos pela aplicação da função linear aproximada e uma rotina que, durante o início do PCOAGV, gera o vetor `LINEARIZA[leitura]`, onde dado um valor digital obtido pela ação do sistema de aquisição de dados, fornece o erro correspondente (em metros).

5.6 - Módulo Controlador

Dada a equação do controlador,

$$\frac{W(z)}{D(z)} = \frac{0.195z^2 - 0.323z + 0.137}{z^2 + 0.405z + 0.181} K_{\text{cont}} \quad (5.1)$$

onde $W(z)$ e $D(z)$ correspondem às transformadas Z [11] da velocidade desejada do motor de direção e o erro medido, respectivamente, obtém-se a equação à diferenças lineares do controlador [12]:

$$w_k = [(0.195d_k - 0.323d_{k-1} + 0.137d_{k-2})K_{\text{cont}}] - (0.405w_{k-1} + 0.181w_{k-2}) \quad (5.2)$$

Na equação (5.2),

$$w_k = w(t_k) = w(t_0 + kT) \quad (5.3)$$

onde T é o período de amostragem e equivale a 5.00 ms. A mesma observação vale para d_k .

A cada ciclo, após a leitura do erro, d_k é atualizado e a ação do controlador é calculada por (5.2).

O ganho do controlador K_{cont} é dado por:

$$K_{\text{cont}} = \frac{1}{K} = \frac{1}{K_{\text{atu}} K_{\text{mod}} K_{\text{dscr}}} \quad (5.4)$$

O valor de K_{dscr} foi determinado na seção 4.3.2 e vale para $T = 5.00$ ms:

$$K_{\text{dscr}} = 0.2083 \cdot 10^{-7} \quad (5.5)$$

O valor do ganho do modelo, K_{mod} , é dado por:

$$K_{\text{mod}} = 1.25 \frac{v^2}{l} \quad (5.6)$$

onde v é a velocidade de deslocamento do veículo e l o comprimento do carro.

Para a obtenção do valor de K_{cont} é necessária, portanto, a determinação do valor do ganho do atuador, K_{atu} , que é o ganho do conjunto acionamento + motor.

A fig.5.30 mostra o diagrama em blocos do sistema em malha fechada.

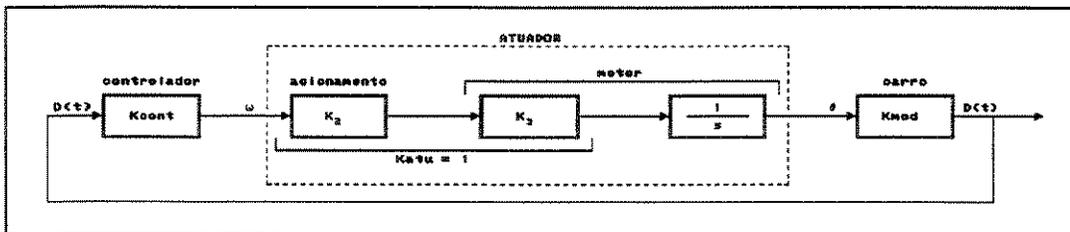


fig.5.30 - diagrama em blocos do sistema em malha fechada, com K_{atu} igual a unidade

Nas simulações mostradas no capítulo 4, o ganho K_{atu} foi considerado igual a unidade.

Dado o ângulo θ desejado, e sendo o motor considerado um integrador, deve-se controlar a sua velocidade, que se traduz no controle da frequência "ffct" da Interface Controladora dos Inversores PWM.

O ganho K_2 do sistema de acionamento é $1/3360$ [8].

Para o ganho K_3 , do motor, deve-se levar em conta o deslizamento, a relação de engrenagens do acoplamento eletromecânico (correia dentada) e o número de polos da máquina.

Na figura 5.31 é mostrado o sistema em malha fechada, com os ganhos indicados.

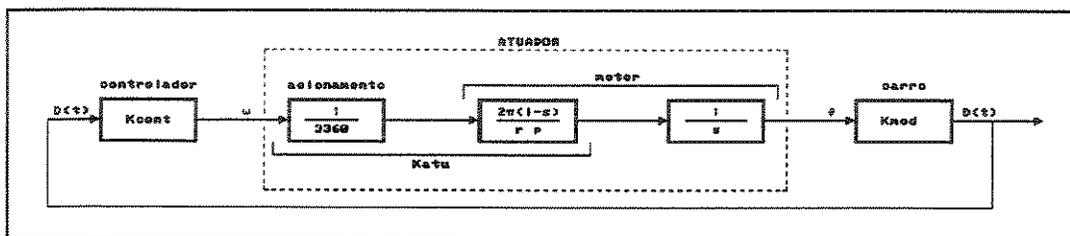


fig.5.31 - sistema em malha fechada

Na figura, s é o deslizamento, que foi considerado fixo e igual a 3%, r é a relação do acoplamento eletromecânico (10:1) e p o número de pares de polos do motor, que é igual a 4.

Assim, tem-se para o ganho do atuador:

$$K_{atu} = \frac{2\pi(1-s)}{rp} \tag{5.7}$$

O ganho do controlador, para $T = 5.00$ ms, é o inverso do produto entre (5.5), (5.6) e (5.7).

$$K_{\text{cont}} = \frac{r p l}{v^2 (1-s) 0.1636 10^{-6}} \quad (5.8)$$

No PCOAGV, a velocidade de deslocamento do veículo é determinada através do teclado do computador de bordo, conforme descrito em 5.1.3.

O veículo é colocado sobre a trajetória através do modo de operação manual, e então é solicitado o modo automático de operação.

O controlador começa a atuar na velocidade de 0.2125 m/s e o ganho vai sendo alterado por faixas, à medida que a velocidade vai aumentando.

A velocidade de 0.2125 m/s foi escolhida pelo fato de ser o limite mínimo de velocidade para o ganho calculado para 0.25 m/s (fig.4.60) e o veículo ter se deslocado por uma pequena distância .

Os ganhos são os seguintes, em função da velocidade, iniciando com o ganho correspondente a 0.25 m/s:

- quando a velocidade chega a 0.2875 m/s, o ganho é mudado para o correspondente a 0.33 m/s;
- velocidade atinge 0.38 m/s, ganho correspondente a 0.437 m/s;
- velocidade atinge 0.50 m/s, ganho correspondente a essa velocidade;
- velocidade atinge 0.575 m/s, ganho correspondente a 0.665 m/s;
- velocidade atinge 0.765 m/s, ganho correspondente a 0.879 m/s;
- velocidade atinge 1.00 m/s, ganho correspondente a essa velocidade.

5.7 - Referências Bibliográficas

- [1] Microsoft Corporation, (1987). "Microsoft C for the MS-DOS Operating Systems, version 5.0".
- [2] Kernighan, B.W., Ritchie, D.M., (1990). "C, a Linguagem de Programação - Padrão ANSI", Rio de Janeiro, Editora Campus.
- [3] Brito, A.A.S., (1990). "Manual do Programador PC - Software e Hardware", São Paulo, Editora Érica.
- [4] Lima, E.P., (1993). "Acionamento de um Motor de Indução com Comandos Suaves de Torque, utilizando a Técnica de Controle Vetorial por Campo Orientado", Dissertação de Mestrado, Campinas, FEE/UNICAMP.
- [5] Bose, B.K., (1989). "Power Electronics and AC Drives", New Jersey, Prentice-Hall.
- [6] Krause, P. C., (1987). "Analysis of Electric Machinery", McGraw-Hill.
- [7] Slemon, G.R., Straughen, A., (1980). "Electric Machines", Reading, Mass., Addison-Wesley.
- [8] Starr, B. G. e Van Loon, J. C. F., (1980). "LSI circuit for AC motor speed control", *Electronic Components and Applications*, vol.2, nº 4: 219-229.
- [9] Wolupec, A., (1988). "Cálculo Numérico e Aplicações", (apostila), Curitiba, CEFET/PR.
- [10] Fontes, I.R., (1993). "Controle de Velocidade de Motor de Indução Trifásico alimentado por Inversor PWM através de Microcomputador", Dissertação de Mestrado, Campinas, FEE/UNICAMP.
- [11] Jury, E.I., (1958). "Sampled-Data Control Systems", New York, John Wiley and Sons.
- [12] Bottura, C.P., (1982). "Análise Linear de Sistemas", Rio de Janeiro, Editora Guanabara Dois.

6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho é desenvolvido um programa para o controle das operações do AGV do LCA da UNICAMP, bem como o projeto do controlador de direção para a operação automática do veículo.

É apresentada uma metodologia para a solução do problema, desde a modelagem do sistema até a implementação do *software* de controle.

O AGV do LCA foi concebido para aplicações no meio industrial, servindo como integrador de matéria-prima e ferramentas (ou como estação de trabalho móvel) dentro de uma fábrica automatizada.

Os seus sistemas de tração e direção são baseados em motores de indução trifásicos, com rotor do tipo gaiola de esquilo, o que é altamente vantajoso sob o ponto de vista de aplicação, uma vez que esse tipo de motor é mais barato e robusto que os de corrente contínua, que são geralmente utilizados em AGVs.

Em contrapartida, o acionamento e o seu controle são mais sofisticados, tendo sido esse tema um dos principais objetivos do Projeto, que culminou em dissertações de mestrado (ver capítulo 3, referências [12,13]), no que se refere ao *hardware* e nas estratégias para o controle do acionamento, via *software*, neste trabalho.

Sendo o objetivo deste trabalho a integração entre os diversos subsistemas que compõem o Projeto, o que inclui a operação automática do AGV, iniciou-se pela modelagem do veículo, obtendo-se um modelo não-linear, que considerou a geometria do carro. Para orientar o projeto do controlador, obteve-se um modelo linear do carro, e através da técnica de alocação de pólos, chegou-se a um controlador que garantisse a satisfação dos critérios de pequeno tempo de resposta e pequena sobre-elevação.

Diversas simulações em computador digital foram feitas, com a intenção de validar o controlador projetado e obter referências para a implementação, como raio de curvatura mínimo da trajetória e faixa de variação de velocidade para um determinado ganho do controlador.

Impondo-se, nas simulações, restrições à operação do carro como as apresentadas na seção 4.4, o controlador foi validado, conforme mostram os resultados das simulações na mesma seção.

Paralelamente foi desenvolvido um programa para o controle das operações do AGV, em que foi feita a integração do sistema. Os comportamentos desejados quando da operação do AGV foram garantidos através de funções dos diversos módulos do programa, e foram feitos testes satisfatórios com o veículo operando sob controle manual, através de um *mouse*.

Nesse modo de operação, foi possível verificar a compensação de tensão dos motores em baixas frequências, a aplicação do perfil suave de variação de velocidade, a mudança de patamar de velocidade, a rotina de inicialização bem como os comandos de emergência, que provocam a parada imediata do veículo.

Infelizmente, dificuldades na obtenção de componentes impediram que o sistema tornasse operacional e que, assim, fossem feitos os testes definitivos, quando seria colocado o AGV sob operação automática.

O Projeto é bastante amplo, e serve como plataforma para diversas pesquisas dentro da Engenharia.

Pode-se buscar o domínio de novos sistemas de orientação, como por exemplo através do reconhecimento de imagens, que é um tema de pesquisa no LCA.

Com relação ao problema de controle, pode-se chegar ao modelo do carro através de técnicas de identificação, *e.g.* dirigindo-se o carro manualmente e obtendo-se assim as relações entre os sinais de entrada e saída do sistema.

Sugere-se estudos também no sentido de determinar a influência da posição dos sensores no comportamento do sistema operando automaticamente. A fixação dos sensores já foi feita através de uma estrutura que permite o movimento deles nos três eixos, conforme mostra a figura 5.28, justamente para propiciar os referidos estudos.

Outra questão importante diz respeito às situações em que o veículo está variando a velocidade, quer na aceleração ou na desaceleração, quer na mudança de patamar de velocidade. Isto porque na modelagem do veículo a velocidade foi considerada constante, e portanto deve-se procurar conhecer o comportamento do sistema nas situações de velocidade variável.

No programa implementado, o ganho é variado por faixas (*gain schedule*), ou seja, a faixa de variação de velocidade é fracionada em partes e o ganho do controlador varia de acordo com elas. As faixas de velocidade e os respectivos ganhos foram obtidos através de simulação, conforme mostrado na seção 4.4.

Alternativamente poder-se-ia testar o ganho adaptativo, quando o ganho varia diretamente com a velocidade.

Estudos podem ser feitos para se determinar a trajetória ótima para o veículo nas entradas e saídas de curvas, de forma que o ângulo da roda de direção tenha a variação mais suave possível.

Propõe-se, também, que seja fechada a malha de realimentação do sistema de tração do veículo, quando ter-se-ia possibilidade de controlar de forma mais precisa o perfil de variação de velocidade bem como de obter informações para o controle do ganho do controlador através dos sensores de velocidade que estariam acoplados à malha de realimentação.

Podem ser feitos estudos para adequar técnicas de controle vetorial para o acionamento das máquinas (capítulo 5, referência [4]), num primeiro momento, no sistema de tração, para o controle da variação da velocidade e posteriormente no sistema de direção, para ter-se um melhor aproveitamento das características dinâmicas da máquina.

Com relação ao *software*, deve-se buscar a implementação de forma concorrente, evitando a chamada sequencial de módulos que eventualmente não estejam operando e possibilitando o atendimento imediato das situações de emergência durante a operação do AGV.

A impossibilidade de se fazer a implementação do sistema operando no modo automático não permitiu a comprovação dos resultados teóricos mas, através da metodologia apresentada, pode-se voltar às fases do processo e assim sucessivamente até que se obtenha o sistema em condições de operação.

Dadas as metas propostas e as restrições que a realidade do país impuseram, o Projeto AGV/LCA atingiu os seus propósitos, gerando trabalhos dentro dos temas propostos (capítulo 3 [12,13,14] e capítulo 5 [4]), que são complementares e que dão condições para que a partir do que foi desenvolvido, sejam feitos trabalhos nas áreas de controle de sistemas, acionamento elétrico, engenharia de *software* e inteligência artificial, entre outros.

7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adamowski, J.C. ...[et alii], (1990). "Desenvolvimento de um Robô Móvel", 8º Congresso Brasileiro de Automática, Belém, UFPA: 513 - 517.
- Architecture Technology Corporation, (1991). "Automated Guided Vehicles", Oxford, Elsevier Advanced Technology.
- Boegli,P., (1987). "A Comparative Evaluation of AGV Navigation Techniques", in Automated Guided Vehicle Systems, chapter 2, Springer-Verlag: 65 -77.
- Bose, B.K., (1989). "Power Electronics and AC Drives", New Jersey, Prentice-Hall.
- Bottura, C.P., (1982). "Análise Linear de Sistemas", Rio de Janeiro, Editora Guanabara Dois.
- Brito,A.A.S., (1990). "Manual do Programador PC - Software e Hardware", São Paulo, Editora Érica.
- Brooks, R.A., (1987). "Autonomous Mobile Robots".
- _____, (1991). "Intelligence without Representation", in Artificial Intelligence, vol 47, Jan1991.
- Chen, C.T., (1984). "Linear System Theory and Design", New York, Holt, Rinehart and Winston.
- Clemente S., Pelly B. R. (1983). "Understanding Power MOSFET, Switching Performance", Solid State Electron, vol.26, nº12: 1133-1141.
- Cordeiro,L.E.C., (1990). "SSA : Sistema de Simulação Analógica (versão 1.5) - Manual do Usuário e Referência". Laboratório de Engenharia de Computação e Automação Industrial / Faculdade de Engenharia Elétrica / UNICAMP.
- Costa, S.E.G. ...[et alii], (1992). "Sistema de Controle de Direção de um Veículo Auto-Guiado", 9º Congresso Brasileiro de Automática, Vitória, UFES: 390 - 394.

- Cozman, F.G....[et alii], (1990). "O Projeto de Veículos Autônomos de Transporte", 1º Simpósio de Automação Integrada, Curitiba, CEFET/PR: 119-123.
- Daum,M., (1986). "A Modular AGV", 4th International Conference on AGVS, Chicago: 87 - 102.
- Eleutério, M.A., (1989). "Sistema de Controle para Veículo Auto-Guiado por Fita Refletiva", Dissertação de Mestrado, Curitiba, CEFET/PR.
- Engelke, A., Busetti,M.A., (1992). "Transient - Ein Werkzeug zur Verteilten Simulation Mechatronischer Systeme unter Echtzeitbedingungen", in "Parallele Datenverarbeitung mit dem Transputer", Berlin, Springer-Verlag: 362 - 379.
- Ferraz, C.A.M. ...[et alii], (1989). "Controlador de Trajetória de Veículo Autônomo de Transporte", X Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ: 229 - 232.
- Ferreira E.D.e Paskulin,F.A., (1990). "AGVS (Sistemas Autônomos de Transporte), uma Opção para a Racionalização do Fluxo de Material e seu Potencial Aplicativo", 9º Seminário de Comando Numérico e Automatização Industrial, SOBRACOM: 16.01-16.24.
- Fontes,I.R.,(1993). "Controle de Velocidade de Motor de Indução Trifásico alimentado por Inversor PWM através de Microcomputador", Dissertação de Mestrado, Campinas, FEE/UNICAMP.
- Furukawa, C.M. ...[et alii], (1992). "Navegação de um Veículo Autônomo de Transporte por Ultra-Som em Ambientes Estruturados", 9º Congresso Brasileiro de Automática, Vitória, UFES: 384 - 389.
- Giralt,G., (1984). "Mobile Robots", in Robotic & Artificial Intelligence, Nato ASI Series, vol F11: 364 - 393.
- Hammond, G., Ed., (1986). "Automated Guided Vehicles Systems", Proc. of the 4th International Conference, Chicago.
- _____, (1986). "AGVS at Work - Automated Guided Vehicle Systems", Bedford, IFS (Publications) Ltd & Berlin, Springer - Verlag.
- _____, (1987). "Evolutionary AGVS - from Concept to Present Reality", in "Automated Guided Vehicle Systems", chapter 1, Springer-Verlag: 3 - 9.

- Hervella, C., (1990). "Modelamento Dinâmico e Implementação de um Veículo Auto-Guiado (AGV) por Fita Refletiva via Simulação em Computador", Estágio em Iniciação Científica I, Campinas, FEE/UNICAMP.
- Higdon, A. ...[et alii], (1984). "Mecânica (Dinâmica)", Rio de Janeiro, Prentice Hall do Brasil, vol.2, 2ª edição.
- Hollier, R.H., Ed., (1986). "Automated Guided Vehicles", Proc. of an Executive Briefing, Stratford-upon-Avon.
- _____, (1987). "Automated Guided Vehicle Systems (International Trends in Manufacturing Technology)", Bedford, IFS (Publications) Ltd & Berlin, Springer - Verlag.
- Houldsworth, J. A. e Rosink, W. B., (1980). "Introduction to PWM speed control-system for 3-phase AC motors", Electronic Components and Applications, vol.2, nº2: 66-79.
- Jorgensen, C. ...[et alii], (1986). "Autonomous Robot Navigation", Byte, Jan86: 223 - 235.
- Jury, E.I., (1958). "Sampled-Data Control Systems", New York, John Wiley and Sons.
- Kernighan, B.W., Ritchie, D.M., (1990). "C, a Linguagem de Programação - Padrão ANSI", Rio de Janeiro, Editora Campus.
- Krause, P. C., (1987). "Analysis of Electric Machinery", McGraw-Hill.
- Kyono, S. (1987). "An Application of Explosion Proof AGVs in Hazardous Locations", 5th International Conference on AGVS, Tokyo: 251 - 260.
- Lengyel, J. ...[et alii], (1990). "Real-Time Robot Motion Planning Using Rasterizing Computer Graphics Hardware", Computer Graphics, vol.24, nº4: 327 - 335.
- Lima, E.P., (1993). "Aacionamento de um Motor de Indução com Comandos Suaves de Torque, utilizando a Técnica de Controle Vetorial por Campo Orientado", Dissertação de Mestrado, Campinas, FEE/UNICAMP.
- Love, J., (1986). "European versus United States AGV Applications", Proc. of an Executive Briefing on AGV, Stratford: 171 - 195.

- Marsh,P., (1985). "Robots", London, Salamander Books.
- Martinelli,G.A. ...[et alii], (1992). "Projeto de um Veículo Auto-Guiado", (relatório), Campinas, FEE/UNICAMP.
- Maruyama, N. e Cozman,F.G., (1992). "Trajectory Control with Fuzzy Rules applied to a Mobile Robot", 9º Congresso Brasileiro de Automática, Vitória, UFES: 378 - 383.
- Mc Murray, W., (1980). "Selection of snubbers and clamps to optimize the design of transistor switching converters", IEEE Transactions Industrial Applications, vol. IA-16, nº 4: 513-525.
- Microsoft Corporation, (1987). "Microsoft C for the MS-DOS Operating Systems, version 5.0".
- Miyagi, P.E....[et alii] (1988). "Veículos Autônomos de Transporte e seus Controles", 3º Congresso Nacional de Automação Industrial: 226-231.
- Müller, T., (1983). "Automated Guided Vehicles", Bedford, IFS (Publications) Ltd & Berlin, Springer - Verlag.
- _____, (1987). "AGVS in Europe - Current Techniques and Future Trends", in Automated Guided Vehicle Systems, chapter 1, Springer-Verlag:11 - 17.
- Nair B., Sen, P. C. (1987). "Voltage Clamp circuits for a Power MOSFET PWM inverter", IEEE Transactions Industrial Applications, vol. IA-23, nº 5: 911-920.
- Ogata,K., (1970). "Engenharia de Controle Moderno", Rio de Janeiro, Prentice Hall do Brasil.
- _____, (1987). "Discrete-Time Control Systems", New Jersey, Prentice Hall Inc.
- Petriu, E.M. ...[et alii], (1990). "Automated Guided Vehicle Position Recovery", IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement", vol.39, nº1: 254 - 258.
- Pilla Jr.,V. ...[et alii], (1992). "Implementação de um Eletro/Vectorcardiógrafo baseado em um Microcomputador", 9º Congresso Brasileiro de Automática, Vitória-ES, UFES, vol.2 : 970 - 975.
- Preciado, A. e Meizel, D., (1992). "Closed Loop Control of an Autonomous Mobile Robot", 9º Congresso Brasileiro de Automática, Vitória, UFES: 372 - 377.

- Rembold,U., Hörmann,A. (1992). "Autonomous Mobile Robots", 9º Congresso Brasileiro de Automática, Vitória, UFES: 1 - 6.
- Sánchez,V.A.B., (1993). "Projeto de Inversor por Fonte de Tensão para Motores Trifásicos de Indução Tipo Gaiola de Esquilo", Dissertação de Mestrado, Campinas, FEE/UNICAMP.
- Severns R. (1981). "dv/dt Effects in MOSFET and Bipolar Junction Transistor Switches", IEEE Power Electronics, Specialists Conference: 258-264.
- Shih,L.Y., (1985). "Automatic Guidance of Mobile Robots in Two-way Traffic", Automatica, vol.21, n°2: 193 - 198.
- Simões, M.G. ...[et alii], (1989). "Controle e Acionamento de Motores para Veículos Autônomos de Transporte", II Seminário de Eletrônica de Potência, Florianópolis, UFSC: 190 - 197
- _____ ...[et alii], (1990). "Estratégia de Acionamento de Motores para Veículos Autônomos", 4º Congresso Nacional de Automação Industrial: 214 - 219.
- _____ ...[et alii], (1991). "Proposta de um Controlador Adaptativo para Acionamento de um VAT utilizando a Técnica de Modelo de Referência", II Seminário Internacional de Motores Elétricos e Acionamentos Reguláveis, São Paulo, ABINEE/EPUSP: 227 - 241.
- Slemon, G.R., Straughen, A., (1980). "Electric Machines", Reading, Mass., Addison-Wesley.
- Starr, B. G. e Van Loon, J. C. F., (1980). "LSI circuit for AC motor speed control", Electronic Components and Applications, vol.2, n° 4: 219-229.
- Swanepoel P. H., Van Wyk J. D. (1989). "Transformer-coupled Direct base drive Technology for high-power/high-voltage Bipolar transistor PWM converters", IEEE Transactions on Industrial Applications, vol.25, n° 6: 1158-1166.
- Takahashi, T., Ed., (1987). "Automated Guided Vehicles Systems", Proc. of the 5th International Conference, Tokyo.
- Tazza,M. ...[et alii], (1992). "Sistemas Flexíveis de Manufatura: Projeto e Análise", minicurso no 9º Congresso Brasileiro de Automática, Vitória, UFES: 62 - 81.

- Wolupec, A., (1988). "Cálculo Numérico e Aplicações", (apostila), Curitiba, CEFET/PR.