

1 Introdução

Atualmente é cada vez mais comum a utilização de equipamentos embarcados em corpos em movimento que precisam ser mantidos apontados para algum alvo. Para realizar tal tarefa sistemas constituídos por corpos articulados, atuadores, sensores e controladores são empregados.

Tais sistemas encontram vasta aplicação tanto no meio civil como no meio militar. Entre as aplicações civis podem-se citar os satélites que, geralmente, carregam equipamentos que precisam ser mantidos apontados para um ponto específico da Terra. Telescópios precisam acompanhar corpos celestes em movimento ou mesmo fixos no espaço, mas como os telescópios encontram-se fixos em um corpo em movimento (a própria Terra) sempre há a necessidade de um sistema de apontamento. Veículos aéreos não tripulados podem carregar câmeras que precisam acompanhar objetos em movimento ou permanecer apontadas para algum ponto fixo na Terra. Na indústria de robôs e de equipamentos cirúrgicos encontram-se também diversos exemplos de sistemas que precisam ser controlados automaticamente para acompanhar algum objeto de interesse.

No meio militar os sistemas de acompanhamento de alvos, também chamados de sistemas de perseguição ou rastreamento de alvos, possuem grande importância tática, sendo em muitos casos considerados itens de tecnologia sensível. Com isso, relativamente poucos trabalhos sobre este assunto são encontrados na literatura. Uma aplicação comum no meio militar ocorre nos mísseis que, para perseguir algum alvo precisam de informações acerca do posicionamento do alvo em relação a si próprios. Esta informação é usualmente obtida através de equipamentos embarcados: sensores infravermelho, radares, sensores de visão, câmeras monitoradas por operadores humanos, etc. No entanto, por ser impraticável o uso de sensores com ângulo de visão de 360° , é necessário movê-los de modo que o alvo seja mantido dentro do campo de visão do equipamento.

Em decorrência da importância que os sistemas de acompanhamento de alvos possuem em diversos campos das áreas civis e militares, iniciou-se no Laboratório de Dinâmica e Vibrações da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro uma série de estudos acerca destes sistemas. Tais estudos foram focados principalmente na influência que parâmetros como atritos, folgas, inércias e atrasos de tempo para aquisição de dados pelos sensores têm no desempenho do sistema.

Para a realização da pesquisa foi montada no Laboratório uma bancada de testes, controlada através do software LabView. Elaborou-se também um programa em Matlab para estudar a dinâmica, simular e sintetizar controladores. Com o programa é possível verificar também o desempenho do sistema em situações difíceis de serem reproduzidas em laboratório e com controles que requerem o uso de sensores mais caros e sofisticados.

O modelo do sistema utilizado no programa de simulação é feito no domínio do tempo. Isso permite trabalhar com as equações de movimento em sua forma não linear e, ainda, incluir outros fenômenos não lineares presentes nos sistemas eletro-mecânicos como atrito seco, folgas, saturação dos sinais de controle (tensões fornecidas aos motores), saturação nas correntes elétricas dos motores, etc. Os atrasos de tempo para atualização das informações obtidas pelos sensores e para a atualização do sinal de controle também podem ser facilmente incluídos no modelo quando se trabalha no domínio do tempo.

1.1. Configurações do mecanismo

Encontram-se na literatura diversos exemplos de mecanismos utilizados para as tarefas mencionadas. Tais mecanismos fornecem usualmente dois ou três graus de liberdade angulares. Os atuadores podem ainda se situar na base do mecanismo ou entre cada elo.

Os mecanismos com três graus de liberdade angulares, Fig. 1.1, permitem manter o equipamento apontado para um local e ainda controlar sua rotação em torno do seu eixo central (eixo que cruza o centro do campo de visão do equipamento), tal característica é importante, por exemplo, em filmagens, onde não se deseja que a imagem obtida fique girando. No entanto, em grande parte das

aplicações, principalmente as militares, deseja-se apenas manter algum equipamento apontado para um alvo. Para isso basta que o mecanismo possua dois graus de liberdade angulares, Fig. 1.2. Isso permite a utilização de mecanismos menores, mais simples e com menos atuadores. Além disso, a escolha desta configuração torna mais simples o controle do sistema.

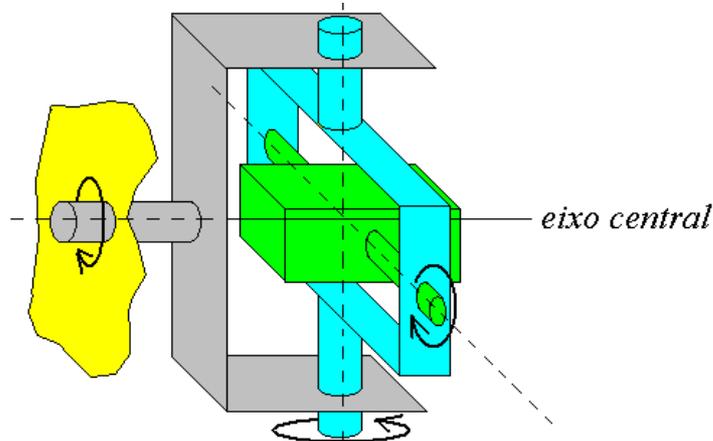


Figura 1.1 – Mecanismo com três graus de liberdade.

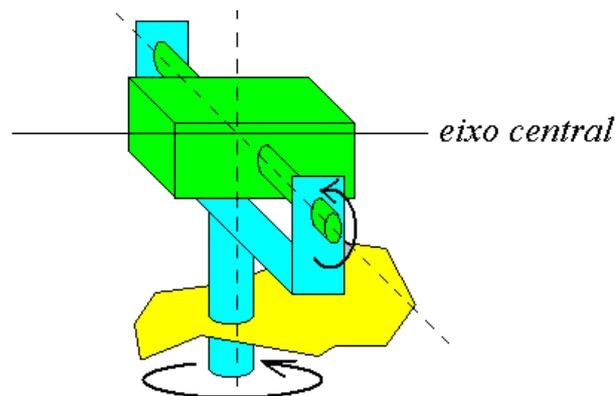


Figura 1.2 – Mecanismo com dois graus de liberdade.

A utilização de atuadores na base do sistema permite que o mecanismo seja mais compacto, o que é de grande valia caso o espaço disponível seja reduzido. A Fig. 1.3 mostra o mecanismo de dois graus de liberdade utilizado em um VANT (veículo aéreo não tripulado) apresentado em [1]. As figuras 1.4 e 1.5 apresentam sistemas com três graus de liberdade utilizados em simuladores oculares apresentados em [2] e [3].

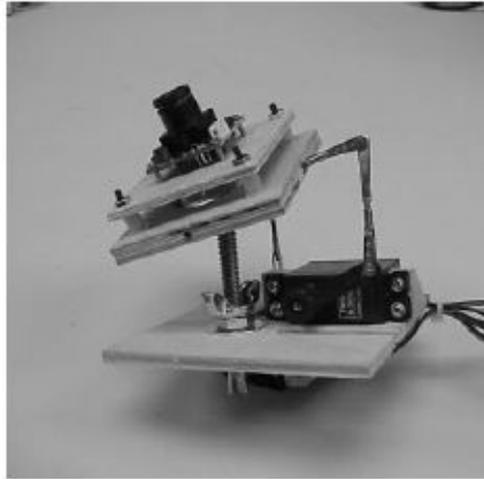


Figura 1.3 – Mecanismo de 2 graus de liberdade e atuadores na base (Antolovic [1]).

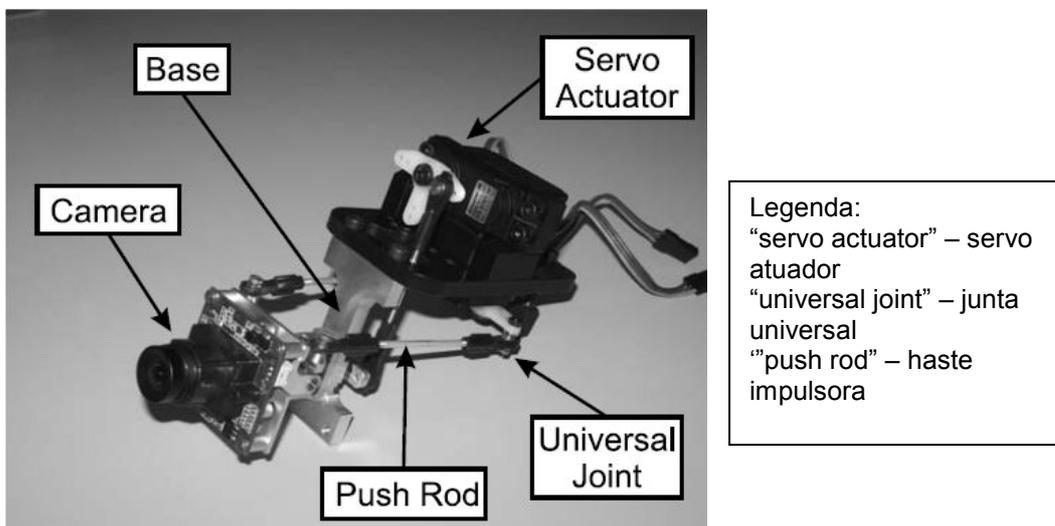


Figura 1.4 – Mecanismo de 3 graus de liberdade e atuadores na base (Wagner et al [2]).

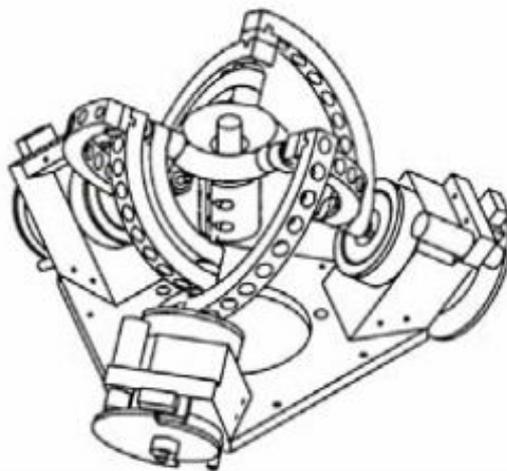


Figura 1.5 – Mecanismo de 3 graus de liberdade e atuadores na base (Bang et al [3]).

Embora os mecanismos com atuadores na base possam ser mais compactos, eles apresentam a desvantagem da relação mais complexa entre as rotações dos atuadores e a rotação do equipamento que deve permanecer apontado para o alvo. Além disso, não permitem ângulos de rotação muito grandes para o equipamento.

Desejando-se proporcionar ângulos de rotação maiores para o equipamento a ser apontado para o alvo, podem-se montar os atuadores nas juntas de revolução de cada elo. Tal configuração resulta em uma relação direta entre a rotação de cada atuador e de cada elo do sistema (ou proporcional, caso se utilize um redutor de velocidades). Quando rotações do equipamento em torno do eixo central são admitidas, costuma-se empregar o sistema com dois graus de liberdade esquematizado na Fig. 1.6, também conhecido como sistema “pan-tilt”. No presente trabalho será abordado apenas este mecanismo, tanto no programa de simulação como na bancada de testes.

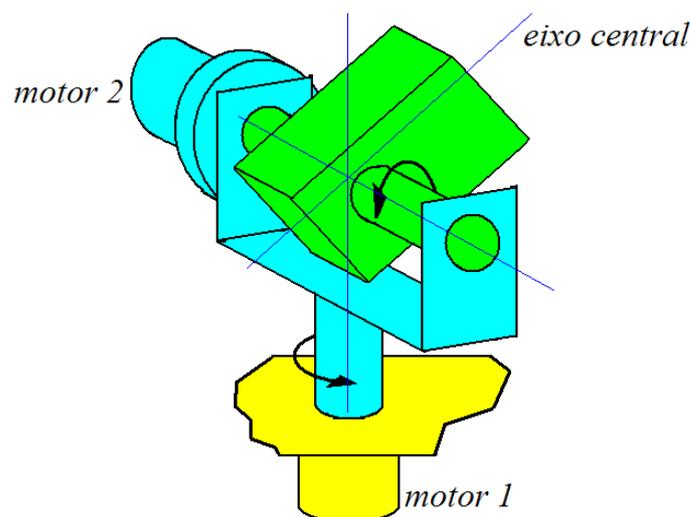


Figura 1.6 – Mecanismo com dois graus de liberdade e 2 atuadores.

1.2. Objetivos

Como a linha de pesquisa “sistemas de acompanhamento de alvos” no Laboratório de Dinâmica e Vibrações da PUC inicia-se com este trabalho, optou-se em desenvolver um modelo computacional que não se restrinja a um único sistema com a configuração “pan-tilt”. Isso permite a utilização do programa de simulação em outros mecanismos similares que futuramente possam vir a ser estudados. A modelagem do mecanismo, considerando-o constituído por corpos rígidos, permite simular a dinâmica de sistemas com diferentes dimensões e

massas, bastando alterar alguns parâmetros no programa, como tensores de inércia e massas de cada corpo.

Apesar do foco do trabalho ser a elaboração de um programa que permita simular diferentes sistemas, algumas limitações foram consideradas:

i) os corpos que compõem o mecanismo “pan-tilt” são rígidos;

ii) os movimentos do sistema de acompanhamento de alvos não influem na dinâmica do corpo no qual ele é montado. Isso permite considerar movimentos prescritos para o referido corpo; e

iii) os atuadores utilizados são motores de corrente contínua de imã permanente, controlados pela tensão na armadura.

Na bancada experimental optou-se em utilizar controladores que não dependem do modelo matemático da planta. Em consequência, não é necessário reprogramar o algoritmo de controle toda vez que ocorrem mudanças em parâmetros do sistema (mudanças devido à troca de atuadores, equipamentos montados no mecanismo, mancais, etc). Além disso, quando se deseja apenas manter o alvo dentro do campo de visão do equipamento montado no mecanismo “pan-tilt”, sem haver uma maior preocupação com oscilações na imagem capturada do alvo, não é fundamental o uso de controladores extremamente precisos, que usualmente requerem o modelo matemático da planta. Por isso, controladores que utilizam o modelo matemático da planta também não foram empregados no programa feito em Matlab, apesar de se considerar um modelo dinâmico bastante completo do mecanismo “pan-tilt” para tornar a simulação mais realista. A sofisticação dos controladores utilizados neste trabalho aumenta à medida que mais sensores estiverem disponíveis no sistema.

Como não é escopo desta tese estudar os movimentos do alvo nem do corpo no qual o sistema é montado, eles são considerados prescritos no programa de simulação e devem ser definidos pelo usuário antes do início da simulação.

1.3. Revisão bibliográfica

Encontram-se na literatura diferentes trabalhos sobre sistemas “pan-tilt”, montados em corpos não estacionários, utilizados para acompanhamento de alvos. No entanto, a maior parte deles tem como foco o controle do sistema e utilizam

modelos simplificados para representar o mecanismo. Isto se constata desde os trabalhos mais antigos, como o publicado por Rue [4], ainda na década de 70, até os mais atuais. Eventualmente, uma maior sofisticação é considerada em algum aspecto do sistema. Por exemplo, quando se deseja analisar a influência de folgas no desempenho do controle alguns autores apresentam um modelo mais sofisticado para a folga apenas. Quando se deseja analisar a influência dos atrasos de tempo, presentes em qualquer controlador digital, são apresentados modelos lineares discretos para o sistema. Quando se deseja analisar a influência dos termos de acoplamento dinâmico dos termos de inércia dos corpos rígidos, apresentam-se as equações de movimento não lineares completas do sistema, porém sem considerar outros aspectos (folgas, atritos secos, atrasos de tempo no controle, etc). Porém, não é comum encontrar uma abordagem mais abrangente onde os diversos aspectos dos sistemas de acompanhamento de alvos sejam contemplados e apresentados simultaneamente, tais como: controle utilizado, atrasos de tempo para leitura dos dados obtidos pelos sensores e atualização do sinal de controle, folgas, acoplamento dinâmico dos termos de inércia, dinâmica dos atuadores, atritos seco e viscoso, erros de medição nos sensores, etc.

Ekstrand [5] obtêm as equações de movimento, tanto por meio da formulação de Lagrange como através das equações de Euler, de um mecanismo “pan-tilt” montado em um corpo com movimentos angulares. A dinâmica deste corpo não é estudada, no entanto suas velocidades angulares são utilizadas nas equações do sistema. Os momentos e produtos de inércia dos dois corpos do mecanismo geram distúrbios na velocidade angular inercial do equipamento montado nele. O autor considera os corpos balanceados e os produtos de inércia nulos. Em seguida busca valores para os momentos de inércia que minimizem estas perturbações. Distúrbios oriundos de outras fontes, tais como o atrito nos mancais, não podem ser eliminados apenas com uma escolha apropriada dos momentos de inércia. Assim, sua compensação deve ser feita por meio de torques provenientes dos atuadores. No entanto o autor não prossegue a discussão a respeito da obtenção destes torques nem das demais fontes de perturbação.

Rudin [6] apresenta resultados de simulações de um sistema de acompanhamento de alvos onde os sensores de velocidade angular inercial são montados na base do mecanismo “pan-tilt”, ao invés de serem montados diretamente no equipamento suportado por ele. Nas simulações utilizam-se

sensores de diferentes qualidades e os resultados obtidos com cada um são comparados. O autor menciona que no programa de simulação as não-linearidades da planta são consideradas, mas utiliza um controle por espaço de estados que, por sua vez, faz uso de um modelo linearizado da planta. Apesar de mencionar que o modelo da planta é não-linear, com folgas, atritos, atrasos de tempo e etc, o autor não o apresenta nem discute separadamente a influência das diversas não-linearidades no desempenho do sistema. Além disso, nas simulações considerou-se que o corpo no qual o sistema é montado realiza apenas movimentos angulares de “pitch”.

Waldmann [7], da mesma forma que [6], menciona as equações de movimento do sistema utilizadas nas simulações sem, contudo, apresentá-las. Seu trabalho, no entanto, traz uma descrição detalhada das características do sensor de visão utilizado para capturar a imagem do alvo. Para realizar o acompanhamento do alvo o autor utiliza controladores proporcionais para cada atuador, onde o sinal de erro para cada um constitui-se do valor desejado para a componente da velocidade angular inercial do sensor menos a componente da velocidade que é medida. Para calcular as componentes desejadas, o autor considera a posição do alvo na imagem capturada, a sua derivada e o atraso de tempo do controlador. A saída dos controladores são os valores das correntes dos atuadores (constituídos por motores elétricos). A dinâmica dos atuadores não é abordada. Por fim são apresentados resultados de simulações onde o sistema é montado num míssil que persegue um alvo.

Kennedy e Kennedy [8] discutem as diferenças no desempenho do controle de estabilização de um sistema “pan-tilt” quando se monta os sensores de velocidade angular inercial na base do mecanismo ou quando se monta diretamente no equipamento por ele suportado. De forma similar que [6], os autores utilizam no programa de simulação um modelo não-linear da planta, porém um controle linear (proporcional e integral). O desenvolvimento das equações de movimento é apresentado, no entanto diversos aspectos não são contemplados pelo modelo, como a dinâmica dos atuadores, folgas e atrasos de tempo para atualização dos dados obtidos pelos sensores.

Masten [9] discute diversos aspectos práticos de projetos de sistemas de acompanhamento de alvos, passando pela escolha dos sensores, balanceamento do sistema, distúrbios causados pelos atritos, cabos, etc. No entanto, não é

apresentada uma modelagem sofisticada do sistema, mas apenas um modelo linear para fins de controle. O autor menciona que a maior parte dos sistemas utiliza duas malhas de controle, uma externa e outra interna. A malha interna tem por finalidade compensar distúrbios, minimizando movimentos desnecessários do sensor de reconhecimento do alvo. A malha externa tem a finalidade de garantir que o eixo ótico do sensor seja apontado para o alvo. Por fim, o autor menciona as vantagens em se utilizar controladores PID (proporcional-integral-derivativo) ao invés de P (proporcional) ou PI (proporcional-integral) na malha interna e menciona que o atraso de tempo para a aquisição e processamento da imagem na malha externa prejudica o desempenho do sistema.

Seong et al [10], de forma análoga que [6], [7] e [8] apresenta resultados de simulações, mencionando que é utilizado um modelo não-linear do sistema. O modelo, porém, não é apresentado no trabalho. Nas simulações considerou-se um controlador discreto, que necessita de um modelo linearizado da planta.

Por fim, cabe ressaltar que a revisão da bibliografia não se esgota aqui. A modelagem do sistema de acompanhamento de alvos envolve diversos aspectos do sistema e, para cada um, há referências bibliográficas específicas. Assim, para tornar mais clara a leitura deste texto, optou-se em mencioná-las na medida em que cada item for sendo abordado no trabalho.

1.4. Terminologia

A seguir serão apresentados alguns exemplos do uso da nomenclatura empregada neste trabalho.

O produto entre dois escalares o e p é representado por:

$$o \cdot p \quad (1.1)$$

Os vetores são representados por letras em negrito. O transposto de um vetor \mathbf{a} é representado por:

$$\mathbf{a}^T \quad (1.2)$$

O produto escalar entre dois vetores \mathbf{a} e \mathbf{b} é representado por:

$$\mathbf{a}^T \mathbf{b} \quad (1.3)$$

O produto vetorial entre dois vetores \mathbf{a} e \mathbf{b} é representado por:

$$\mathbf{a} \times \mathbf{b} \quad (1.4)$$

Os problemas em Dinâmica com sistemas de coordenadas solidários a diferentes referenciais precisam de uma nomenclatura específica, devido à grande divergência na nomenclatura encontrada na literatura científica. Quando não se especifica em qual sistema de coordenadas um vetor é escrito ele será simplesmente representado por uma letra em negrito como, por exemplo, \mathbf{a} . Quando um vetor \mathbf{a} é escrito em coordenadas de um sistema solidário a um referencial (ou corpo rígido) G ele é representado por:

$${}^G \mathbf{a} \quad (1.5)$$

O transposto deste vetor é representado por:

$${}^G \mathbf{a}^T \quad (1.6)$$

O vetor posição de um ponto b com respeito a um ponto a , quando não se especifica o sistema de coordenadas no qual ele é escrito, é representado por:

$${}_a \mathbf{d}_b \quad (1.7)$$

O vetor posição de um ponto b com respeito a um ponto a , escrito em um sistema de coordenadas solidário a um referencial (ou corpo rígido) G , é representado por:

$${}_a^G \mathbf{d}_b \quad (1.8)$$

Este vetor transposto é representado por:

$${}_a^G \mathbf{d}_b^T \quad (1.9)$$

O vetor velocidade de um ponto a com respeito a um referencial (ou corpo rígido) B escrito em coordenadas de um sistema fixo no referencial (ou corpo rígido) G é representado por:

$${}_B^G \mathbf{v}_a \quad (1.10)$$

O vetor velocidade angular de um corpo rígido A com respeito a um corpo rígido (ou referencial) B escrito em coordenadas de um sistema fixo no referencial (ou corpo rígido) G é representado por:

$${}_B^G \boldsymbol{\omega}_A \quad (1.11)$$

O tensor de inércia de um corpo rígido A escrito em coordenadas de um sistema solidário ao próprio corpo é representado por:

$${}^A I_A \quad (1.12)$$

A matriz de transformação de coordenadas de um sistema solidário ao referencial (ou corpo rígido) A para um sistema solidário ao referencial (ou corpo rígido) B é representada por:

$${}^B T^A \quad (1.13)$$

1.5. Descrição da tese

Este trabalho se divide em seis capítulos. O Capítulo atual apresentou uma introdução ao assunto abordado na Tese.

No Capítulo 2 as equações de movimento do sistema de acompanhamento de alvos são desenvolvidas, considerando-se as diversas não linearidades presentes no mecanismo. Discute-se também como considerar os atrasos de tempo para atualização dos sinais de controle e dados obtidos pelos sensores durante a integração numérica das equações de movimento.

No Capítulo 3 são discutidas formas de se controlar o sistema utilizando controladores que não requerem um modelo da planta. Três arquiteturas de controle são apresentadas. A primeira destina-se a sistemas que possuem apenas sensor de visão. A segunda destina-se a sistema com sensor de visão e sensores para medir as posições angulares relativas entre os corpos do mecanismo “pan-tilt”. A terceira destina-se a sistemas com sensores de visão, de posições angulares relativas e de velocidades angulares inerciais.

No Capítulo 4 são apresentados resultados de simulações, onde se varia os movimentos do corpo no qual o sistema é montado, os movimentos do alvo e parâmetros como o tamanho das folgas e os atrasos de tempo para atualização dos sinais de controle. Testa-se cada arquitetura de controle e, por fim, é feita uma comparação do desempenho do sistema com cada uma.

No Capítulo 5 é apresentada em detalhes a Bancada de Testes construída no Laboratório de Dinâmica e Vibrações da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Resultados de experimentos também são apresentados e comparados com resultados obtidos com o programa de simulação.

Finalmente, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões gerais do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.