

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**SISTEMA DE NAVEGAÇÃO PARA HELICÓPTEROS NÃO
TRIPULADOS UTILIZANDO CONTROLADOR NEBULOSO**

CARLA MARIA CHAGAS E CAVALCANTE

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

FLORIANÓPOLIS, 27/06/1994.

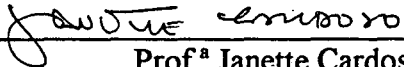
SISTEMA DE NAVEGAÇÃO PARA HELICÓPTEROS NÃO TRIPULADOS UTILIZANDO CONTROLADOR NEBULOSO

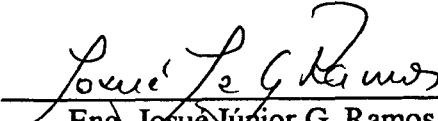
CARLA M. C. E CAVALCANTE

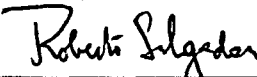
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

MESTRE EM ENGENHARIA

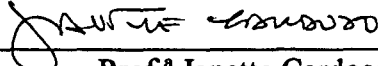
ESPECIALIDADE ENGENHARIA ELÉTRICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO SISTEMAS DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL, E APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO.

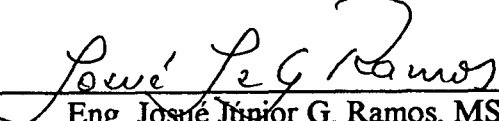

Prof.ª Janette Cardoso, Dr.ª
Departamento de Eng. Elétrica, UFSC
Orientador



Eng. Josué Júnior G. Ramos, MSc.
Centro Tecnológico de Informática,
Co-orientador



Prof. Roberto de Souza Salgado, Ph. D.
Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

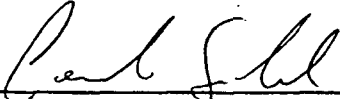
BANCA EXAMINADORA:



Prof.ª Janette Cardoso, Dr.ª
Departamento de Eng. Elétrica, UFSC
Orientador


Eng. Josué Júnior G. Ramos, MSc.
Centro Tecnológico de Informática,
Co-orientador


Prof. Hansjörg Andreas Schneebeli, Dr.
Departamento de Eng. Elétrica, UFES


Prof. Edson Roberto De Pieri, Dr.
Departamento de Eng. Elétrica, UFSC


Eng. Conrado Werner Seibel, MSc
Gyron Tecnologia


Guilherme Bittencourt, Dr.
Departamento de Eng. Elétrica, UFSC

**Dedico este trabalho a meus pais e a
minha tia Marly. Sem o apoio deles eu
não o teria realizado.**

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos à professora Janette Cardoso, pela orientação e, sobretudo, amizade.

Agradeço também à equipe da Gyron Tecnologia, pelo suporte e objetividade. Os engenheiros do CTI, Josué Ramos e Othon Neves foram mais que colegas no decorrer do trabalho: foram amigos.

Aos participantes da banca examinadora, Eng. Conrado Seibel, Prof. Hansjörg Schneebeli, Prof. Edson De Pieri e Prof. Guilherme Bittencourt, obrigada pela atenção e pelas valiosas sugestões.

Meus agradecimentos ao Prof. Ernani Fries, pelo auxílio na busca de material bibliográfico, bem como pelas sugestões.

Agradeço aos demais professores e colegas do LCMI, assim como todos os amigos da pós-graduação, por tirar tempo de seus trabalhos para discutir comigo os meus problemas: especialmente Christina, Busch, Márcia, Mussoi, Viviane, João Marques, Sílvia, Juan, Polyana, Ziller, Leonardo, Alberto, Itsumi, Suzane e João Manoel.

Meus agradecimentos ao contribuinte brasileiro, que financiou minha formação através do CNPq.

Meu muito obrigada a minha família, pelo apoio, compreensão e incentivo durante todas as etapas deste trabalho, especialmente a Tetsu, pelo encorajamento e paciência.

Sobretudo agradeço a força misteriosa que guia nossos destinos, e que chamo de Deus.

RESUMO

Certas tarefas de inspeção, tais como verificação de linhas de transmissão de energia elétrica ou vistoria em áreas imersas em ambientes hostis ao ser humano, representam riscos a seres humanos, sendo preferível realizá-las através de imagens obtidas por um sistema móvel remotamente controlado. Motivada pela inexistência no mercado brasileiro de soluções viáveis para este problema, a Gyron Tecnologia desenvolveu uma aeronave, um helicóptero não tripulado, para este tipo de tarefa.

O treinamento de pilotos de helicópteros requer muito tempo, resultando em altos custos, assim como as tarefas de inspeção são desgastantes por serem repetitivas e de longa duração. Levando em consideração estes aspectos, um dos objetivos da Gyron Tecnologia é a realização de um sistema automático de navegação do helicóptero, simplificando a pilotagem, e permitindo que um operador menos treinado possa realizá-la.

Esta dissertação propõe um sistema de navegação baseado em controle nebuloso para ser instalado a bordo deste helicóptero. Este sistema tem por objetivo controlar posição e atitude da aeronave em função da missão que esta deve executar. O uso de controlador nebuloso se justifica como uma forma de incorporar ao algoritmo de controle a perícia do piloto, representando seu raciocínio e considerando a imprecisão expressa de forma lingüística.

É proposta uma estrutura hierárquica em níveis e um protótipo do nível de controle foi implementado. Os resultados de simulação obtidos são apresentados e discutidos, indicando a viabilidade de lógica nebulosa no controle de posição e atitude de helicópteros.

ABSTRACT

Some inspection tasks, as verification of electrical power transmission lines or inspection on hostile environments, may be harmful to human beings. These inspection tasks are preferable done through camera images, obtained by a remote guided system. Based on a lack of viable solution in Brazilian market, Gyron Tecnologia developed an aircraft, an unmanned helicopter, for this kind of inspection tasks.

Helicopters pilot training involves a lot of time, implying high costs, and inspection tasks are usually tiring and long. Considering these aspects, Gyron Tecnologia aims to develop an automatic guidance system, in order to replace the pilot with a less trained operator.

This work proposes a guidance system, using fuzzy control, to be used on board of this aircraft. This system is expected to control the position of the helicopter, in order to achieve the goal of the desired flight mission. Fuzzy control is used in order to include the pilot's expertise uncertain on the control algorithm.

A hierarchical level structure is proposed, and a control level prototype was implemented. The simulation results obtained are presented and discussed, indicating fuzzy logic as viable in position and attitude control of helicopters.

LISTA DE SÍMBOLOS

- ΔC - Variação do comando coletivo
 D - Força de arrasto
 $e\sim$ - Valor nebuloso da variável e
 E_g - Erro de ângulo de guinada
 E_h - Erro de altitude do helicóptero
 E_{lat} - Erro de posição lateral do helicóptero
 E_{long} - Erro de posição longitudinal do helicóptero
 E_{xp}, E_{yp} - Erro de posição (x,y)
 g - Ângulo de guinada atual
 G - Regra sintática para gerar os nomes dos termos T(u)
 G_r - Ângulo de guinada desejado
 h - Altitude atual do helicóptero
 H_r - Altitude desejada do helicóptero
 L - Força de sustentação
 L_h - Componente horizontal da força de sustentação L
 L_r - Força de sustentação resultante
 L_v - Componente vertical da força de sustentação L
 M - Regra semântica para gerar os nomes dos termos T(u)
 máx - Operador *máximo*
 MIMO - Multiple Input Multiple Output; sistema com múltiplas entradas e múltiplas saídas
 mín - Operador *mínimo*
 MISO - Multiple Input Single Output; sistema com múltiplas entradas e uma saída
 $\mu_N(u)$ - Coeficiente de pertinência do elemento u ao conjunto nebuloso N
 N - Núcleo de um conjunto nebuloso
 PDR - Plano do disco do rotor
 PPP - Plano das pontas das pás
 P_r - Posição (x,y) desejada
 P, N, S, M, B - A respeito de conjuntos nebulosos, significam Positivo, Negativo, Small (pequeno), Medium (médio) e Big (grande)
 R - Matriz relação
 S - Suporte de um conjunto nebuloso
 t - tempo
 T(u) - Conjunto dos termos associados aos valores de u
 ΔT - Variação do comando de cauda do helicóptero
 U - Universo de discurso

- u - Elemento genérico pertencente ao universo de discurso U
- V_z - Velocidade vertical do helicóptero, positiva para baixo
- V_g - Velocidade de guinada
- $X_{\text{corpo}}, Y_{\text{corpo}}, Z_{\text{corpo}}$ - Eixos do sistema de coordenadas fixo no centro de gravidade do helicóptero
- $X_{\text{inercial}}, Y_{\text{inercial}}, Z_{\text{inercial}}$ - Eixos do sistema de coordenadas fixo no solo
- x, y - Posição atual do helicóptero
- Y - Saída atual
- Y_r - Referência; valor desejado para a saída Y

SUMÁRIO

Agradecimentos	iv
Resumo	v
Abstract	vi
Lista de Símbolos.....	vii
Sumário	ix
Introdução	1
Capítulo 1 - Helicóptero.....	3
1.1 Aerodinâmica Básica	3
1.2 Componentes do Helicóptero.....	6
1.3 Movimentos do Helicóptero.....	8
1.3.1 Pouso e Decolagem.....	9
1.3.2 Guinada.....	9
1.3.3 Vôo a Frente.....	10
1.3.4 Vôo para Trás e Vôo Lateral.....	11
1.3.5 Rolagem e Arfagem.....	12
1.4 Comandos de Vôo.....	13
1.4.1 Comando do ângulo de pitch coletivo do rotor principal.....	15
1.4.2 Comandos dos ângulos de pitch cíclico longitudinal e lateral do rotor principal.....	15
1.4.3 Comando do pitch coletivo do rotor de cauda.....	17
1.5 Estabilidade e Acoplamentos.....	17
1.6 Aeronave da Gyron Tecnologia.....	18
1.7 Conclusões	19
Capítulo 2 - Controladores Nebulosos.....	21
2.1 Introdução	21
2.1.1 Histórico de Aplicações.....	22
2.2 Lógica Nebulosa	23
a) Universo de Discurso	25
b) Variável Lingüística	26
c) Modificadores.....	27
2.3 Sistema de Regras de Produção.....	28
2.3.1 Tabela de Regras Lingüísticas	28
2.3.2 Matriz Relação.....	29
2.3.3 Inferência das Regras Nebulosas	31
2.4 Modelagem Nebulosa	32
2.4.1 Identificação de Modelo Nebuloso.....	33

a) Tabela de Regras Linguísticas.....	33
b) Matriz Relação.....	34
2.4.2 Análise de Estabilidade através de Modelo Nebuloso.....	34
2.5 Controlador Nebuloso.....	36
2.5.1 Componentes de um Controlador Nebuloso.....	36
2.5.2 Projeto de um Controlador Nebuloso.....	38
a) Variáveis de Entrada e Saída [Lee 90a].....	38
b) Divisão dos Universos das Variáveis em Subespaços.....	38
c) Definição da Função de Pertinência dos Conjuntos Nebulosos.....	39
d) Escolha da Estratégia de Fuzificação.....	39
e) Escolha da Estratégia de Defuzificação.....	39
f) Regras de Controle.....	40
g) Mecanismos de Inferência.....	41
h) Ajustes.....	42
2.5.3 Controladores Nebulosos Adaptativos.....	42
2.6 Conclusões.....	43
Capítulo 3 - Estruturação do Sistema de Navegação.....	44
3.1 Captura de Conhecimento.....	44
3.1.1 Aquisição de Conhecimento Utilizada neste Trabalho.....	47
3.2 Estruturação do Sistema de Navegação.....	47
3.2.1 Estrutura Proposta.....	48
3.2.2 Interpretação da Missão.....	49
3.2.3 Execução das Tarefas.....	50
Base de Conhecimento.....	50
Acoplamentos.....	51
Estabilidade da Tarefa.....	51
3.2.4 Nível de Controle.....	52
3.3 Conclusões.....	52
Capítulo 4 - Projeto do Controlador Nebuloso.....	53
4.1 Mecanismos de Inferência.....	53
4.2 Base de Conhecimento.....	54
4.2.1 Tarefa Decolar.....	55
a) Objetivo e Comandos.....	55
b) Técnica de Pilotagem.....	55
c) Variáveis de Entrada e Saída.....	55
d) Conjuntos Nebulosos.....	56
e) Regras.....	57

	f) Acoplamentos	58
	g) Precisão	58
4.2.2	Tarefa Guinada	58
	a) Objetivo e Comandos	58
	b) Técnica de Pilotagem	58
	c) Variáveis de Entrada e Saída	59
	d) Conjuntos Nebulosos	60
	e) Regras	60
	f) Acoplamentos	60
	g) Precisão	60
4.2.3	Tarefa Pairar	61
	a) Objetivo e Comandos	61
	b) Técnica de Pilotagem	61
	c) Variáveis de Entrada e Saída	62
	d) Conjuntos Nebulosos	64
	e) Regras	64
	f) Acoplamentos	65
	g) Precisão	65
4.2.4	Tarefa Vôo a Frente	65
	a) Objetivo e Comandos	65
	b) Técnica de Pilotagem	65
	c) Variáveis de Entrada e Saída	65
	d) Conjuntos Nebulosos	66
	e) Regras	66
	f) Acoplamentos	66
	g) Precisão	66
4.2.5	Tarefa Pousar	66
	a) Objetivo e Comandos	66
	b) Técnica de Pilotagem	66
	c) Variáveis de Entrada e Saída	67
	d) Conjuntos Nebulosos	67
	e) Regras	67
	f) Acoplamentos	67
	g) Precisão	67
4.3	Conclusões	67
Capítulo 5 - Implementação, Simulações e Ajustes		68
5.1	Implementação	68
5.1.1	Algoritmo	68

5.1.2	Estrutura de Dados.....	70
	Variáveis e Conjuntos.....	71
	Regras.....	74
5.2	Simulação.....	75
5.2.1	Tarefa Decolar.....	79
5.2.2	Tarefa Guinada e Tarefa Pairar.....	82
5.2.3	Simulação da Missão.....	83
5.3	Conclusões.....	84
	Conclusões e Perspectivas Futuras.....	85
	Bibliografia.....	87

INTRODUÇÃO

Certas tarefas de inspeção, tais como verificação de linhas de transmissão de energia elétrica ou vistoria em áreas imersas em ambientes hostis ao ser humano, representam riscos a seres humanos, sendo preferível realizá-las através de imagens de satélite ou de imagens aéreas. As imagens de satélite possuem baixa resolução, com pixels de 400m² ou 900m², dependendo do satélite, portanto pouco adequadas para este tipo de inspeção. As imagens aéreas, levantadas por firmas especializadas, podem trabalhar com escalas mais adequadas. Entretanto, como tarefas de inspeção se caracterizam pela necessidade de periodicidade, o custo desta opção se torna elevado.

É desejável, portanto, uma solução que alie uma boa resolução de imagem com baixo custo. Surge então a perspectiva do uso de veículos aéreos não tripulados, equipados com câmeras de vídeo ou máquinas fotográficas. Tais veículos devem ser totalmente comandáveis de terra e devem ser capazes de realizar vôos de observação a baixa velocidade; uma característica desejável é que possa realizar vôo pairado. O helicóptero surge, então, como a melhor opção.

Motivada pela inexistência no mercado brasileiro de um equipamento deste tipo e considerando a importância de viabilizar esta solução, a empresa Gyron Tecnologia criou, em 1991, o projeto Helix, cujo objetivo é desenvolver um helicóptero não tripulado para executar tarefas de observação aérea, remotamente controlado por um operador (também chamado de piloto).

Porém, treinar um piloto de helicóptero requer muito tempo - elevando o custo - e as tarefas de observação geralmente representam muito desgaste ao piloto devido a sua duração e repetitividade - provocando o risco de acidentes. Levando em consideração estes aspectos, um dos objetivos do projeto Helix é a realização de um sistema automático de navegação do helicóptero, que permita substituir o piloto no comando da aeronave por um operador menos treinado.

Substituir a habilidade do piloto implica em reproduzir o seu conhecimento em um sistema automático, através de um sistema especialista. Tal sistema utiliza regras que simulam a forma de raciocínio utilizada na tomada de decisões humana, onde, a partir da avaliação da veracidade das condições (antecedentes das regras) são tomadas as decisões resultantes (conseqüentes das regras).

Além disso, a avaliação de condições executada pelos seres humanos é feita muitas vezes de modo impreciso, agrupando objetos em classes, em que a transição ser/não ser, pertencer/não pertencer é gradual e não abrupta. Para incorporar essa característica humana de lidar com dados de forma imprecisa, utiliza-se lógica nebulosa nas regras do sistema especialista.

A teoria de lógica nebulosa foi proposta por Lofti A. Zadeh, em 1965, definindo ferramentas matemáticas formais para lidar com dados vagos e imprecisos.

Um controlador baseado em lógica nebulosa fornece meios de converter uma estratégia de controle linguística - como a expressa por um operador ou piloto, no caso do helicóptero - em uma estratégia automática de controle. Como esta técnica não necessita do modelo do sistema controlado, mas do conhecimento do especialista, é extremamente interessante quando aplicada a sistemas complexos de difícil modelagem.

Atualmente uma grande quantidade de produtos industriais utilizam lógica nebulosa, principalmente no Japão. Um grupo de pesquisadores liderados pelo Prof. Michio Sugeno no Tokyo Institute of Technology trabalha desde 1989 com projetos de uso de controle nebuloso aplicado em helicóptero não tripulados, com bons resultados.

Esta dissertação consiste na proposta de um sistema de navegação baseado no controle nebuloso de posição e atitude do H2, um helicóptero não tripulado com rotor de 2,0m da Gyron Tecnologia. Este sistema de navegação tem por função executar missões de vôo determinadas por um operador.

É proposta uma estrutura hierárquica em níveis baseada na divisão da missão de vôo em tarefas básicas executadas pelo piloto. Um dos níveis da estrutura proposta, o nível de controle, consiste de um controlador nebuloso que incorpora o conhecimento especialista do piloto. O projeto deste controlador nebuloso é baseado no conhecimento especialista do piloto, sendo utilizadas técnicas de aquisição de conhecimento na síntese da base de conhecimento do controlador. Este controlador nebuloso foi implementado e avaliado através de simulação.

Na fase de ajustes do controlador, os resultados obtidos são analisados e modificações na base de conhecimento são executadas para melhorar o desempenho. Neste trabalho é proposto um método de auxílio no ajuste de regras e conjuntos, baseado na análise da evolução das regras na tabela lingüística de regras.

O capítulo 2 é dedicado a uma breve apresentação da teoria de helicópteros: princípios da aerodinâmica, movimentos, comandos, características de estabilidade e acoplamento. Em particular, é descrito o helicóptero da Gyron.

No capítulo 3 são introduzidos os conceitos, características, projeto e aplicações dos controladores nebulosos.

O sistema de navegação proposto é baseado no conhecimento do piloto, a partir do qual ele deve ser estruturado. O capítulo 4 apresenta as técnicas de aquisição de conhecimento utilizadas neste trabalho, bem como a estrutura resultante do Sistema de Navegação proposto.

O projeto do controlador nebuloso que integra o Sistema de Navegação é mostrado no capítulo 5. São apresentados os conjuntos, variáveis e regras utilizados, assim como sua obtenção a partir do conhecimento do piloto.

O capítulo 6 abrange a implementação do protótipo de controle, os resultados de simulação e da fase de ajustes. As conclusões e perspectivas são objeto do capítulo 7.

CAPÍTULO 1

HELICÓPTERO

Com o objetivo de desenvolver um sistema de navegação para um helicóptero não tripulado, este capítulo tem por objetivo introduzir os princípios do vôo de helicópteros.

Inicialmente, são mostrados os conceitos de aerodinâmica que permitem o vôo de aparelhos mais pesados que o ar. Após isso, os componentes do helicóptero são descritos, bem como os movimentos possíveis de serem executados por esse tipo de aeronave.

Os comandos do helicóptero que permitem o controle de posição, velocidade e direcionamento são mostrados a seguir. Finalmente, o helicóptero alvo do sistema de navegação aqui proposto é descrito.

1.1 AERODINÂMICA BÁSICA

Qualquer veículo mais pesado que o ar que voa, o faz através de *aerofólios*, que são dispositivos moldados de tal maneira que produzem força de sustentação quando se movem através do ar. As asas de avião e as pás do rotor do helicóptero são exemplos de aerofólios.

A seção transversal de um aerofólio possui três componentes básicos, indicados na figura 1.1:

- *bordo de ataque*: parte da frente, considerando o sentido do movimento;
- *bordo de fuga*: parte de trás;
- *linha de corda*: linha imaginária que une essas bordas.

Os aerofólios podem ser simétricos ou assimétricos, dependendo se a superfície de cima tem a mesma convexidade que a de baixo ou não, como mostrado na figura 1.1.

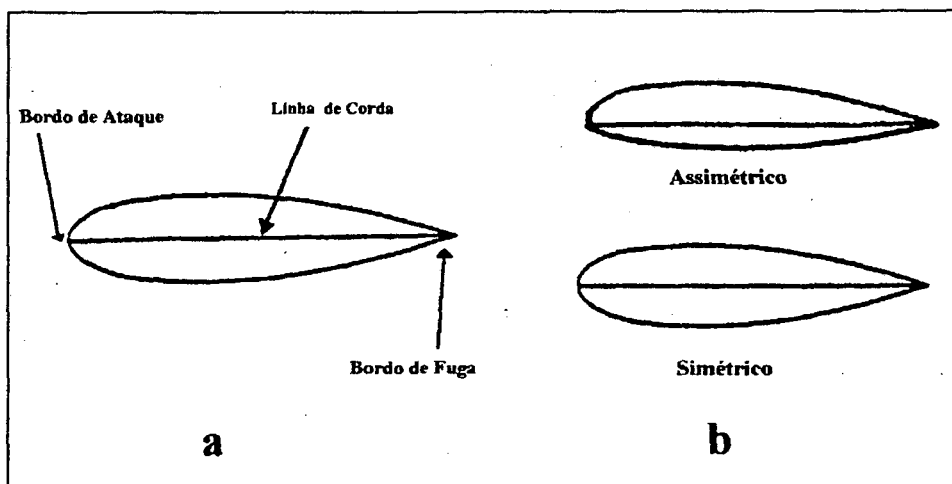


Fig. 1.1 - a) A linha de corda de um aerofólio é uma linha imaginária unindo os bordos de ataque e de fuga; b) aerofólios simétricos e assimétricos

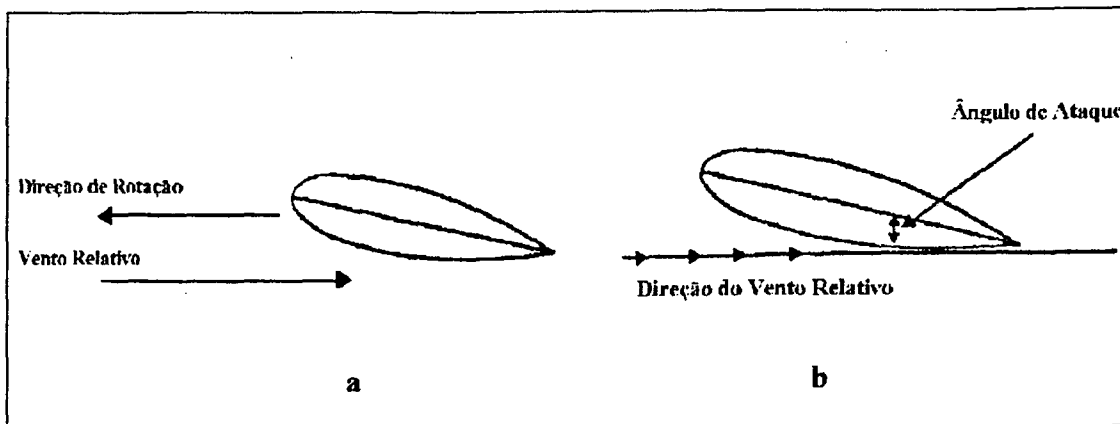


Fig. 1.2 - a) O vento relativo é sempre paralelo e em sentido contrário a direção de rotação do aerofólio; b) o ângulo de ataque é o ângulo entre o vento relativo e a linha de corda do aerofólio.

Quando um aerofólio está em movimento, a ar em volta dele também se move. Este ar em movimento, em paralelo com o movimento do aerofólio, mas em sentido contrário, é chamado *vento relativo*, representado na figura 1.2. O ângulo entre o vento relativo e a linha de corda é chamado *ângulo de ataque*, como se vê na figura 1.2.

Considere a figura 1.3.-Quando o vento relativo vem de encontro à bordo de ataque de um aerofólio, o ar se divide: metade flui sobre a superfície de cima e metade sob a de baixo. No caso dos aerofólios assimétricos ou dos simétricos com ângulo de ataque diferente de zero, a metade de ar acima do aerofólio terá de percorrer uma distância maior (isto é, com maior velocidade) que a metade de ar abaixo do aerofólio. Segundo o princípio de Bernoulli, se a velocidade de um fluido compressível é aumentada, a pressão desse fluido diminui. Essa metade com maior velocidade, então, estará a uma pressão menor que a outra metade. Esta diferença de pressão, entre o ar abaixo e o ar acima do aerofólio, gera a *força de sustentação* (Lift, **L**), que permite levantar o aerofólio.

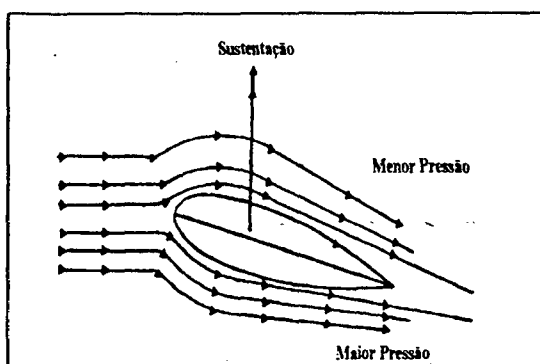


Fig. 1.3 - A sustentação (**L**) é produzida quando há uma área de alta pressão abaixo do aerofólio, combinada com uma área de baixa pressão acima do aerofólio.

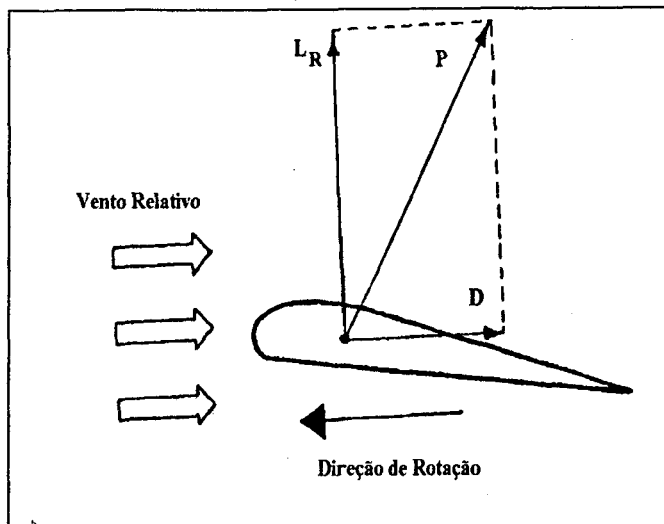


Fig. 1.4 - Força de Sustentação (L) e força de arrasto (D) atuando no centro de gravidade da pá.

Desse modo, pode-se concluir que quanto maior o ângulo de ataque, maior a sustentação produzida, pois maior será a diferença de pressão entre o ar acima e abaixo do aerofólio. O ângulo de ataque, porém, não pode crescer infinitamente. Existe um limite em que a pressão é tão pequena em um dos lados do aerofólio, que o ar se torna turbulento, eliminando a sustentação. Esta situação é dita "stall".

A *força de arrasto* (drag, D) é definida como sendo uma força horizontal que resiste ao movimento do aerofólio, sendo também influenciada pelo ângulo de ataque: quanto maior o ângulo de ataque, maior a força de arrasto.

Tanto a força de arrasto como a sustentação são forças que atuam sobre o centro de gravidade do aerofólio (pá no caso do helicóptero), conforme vê-se na figura 1.4 [Schlüter 81].

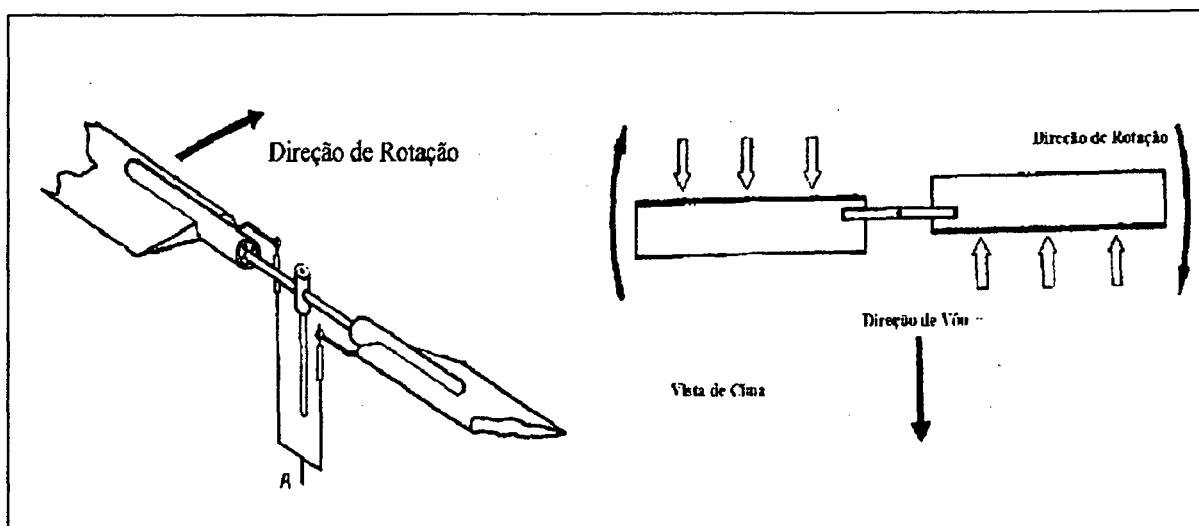


Fig. 1.5 - Vistas das pás do Helicóptero (aerofólios)

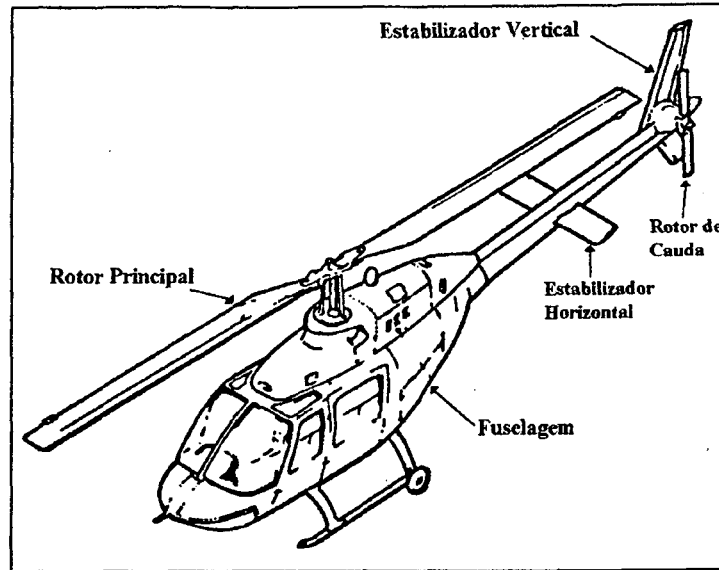


Fig. 1.6 - Componentes aerodinâmicos do helicóptero

1.2 COMPONENTES DO HELICÓPTERO

O helicóptero é uma aeronave de pouso e decolagem na vertical (VTOL - Vertical Take off and Landing) que utiliza aerofólios (pás) em rotação para obtenção da força necessária a sua sustentação, controle e direcionamento (figura 1.5). Seus sistemas de controle permitem alcançar diversos tipos de operações tais como vôo pairado, vôo vertical ascendente e descendente, vôo horizontal e auto-rotação [Santoro 92].

Os principais componentes aerodinâmicos de um helicóptero são os seguintes (ver figura 1.6):

- *rotor principal*: responsável por fornecer propulsão, suporte e controlabilidade à aeronave [Pallet 83];
- *rotor de cauda*: responsável por contrabalançar os efeitos de reação da fuselagem ao

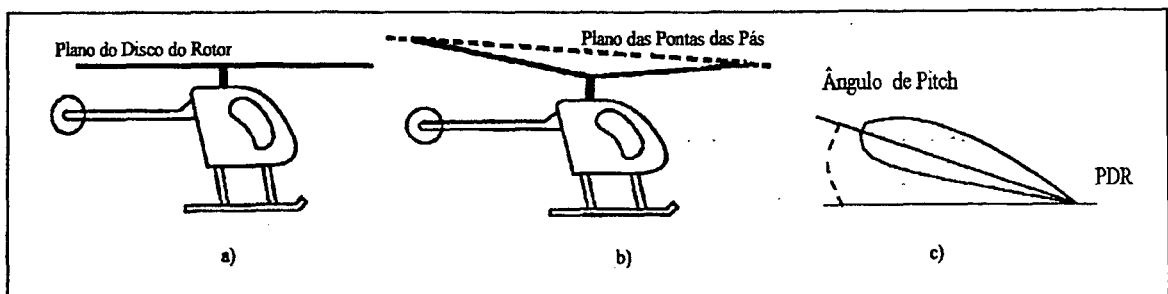


Fig. 1.7 - a) Plano do disco do rotor (PDR); b) plano das pontas das pás (PPP); c) o ângulo de pitch é geometricamente definido em relação ao plano do disco do rotor.

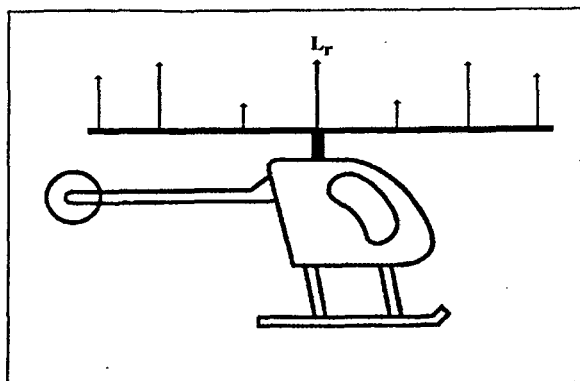


Fig. 1.8 - Variação da sustentação gerada nas pás em função do raio e força resultante (L_R) agindo sobre o centro do disco do rotor.

movimento de rotação das pás do rotor principal;

- *estabilizadores vertical e horizontal*: contribuem para manter a aeronave na posição normal de vôo (nariz à frente e nivelado com a direção de vôo).

O plano horizontal formado pelas pás em movimento é chamado *plano do disco do rotor* (*Rotor Disc Plane, PDR*). Este plano é sempre perpendicular ao eixo do rotor. O plano formado pelo movimento das pontas das pás é chamado *plano das pontas das pás* (*Tip Path Plane, PPP*). Esses planos estão ilustrados na figura 1.7 [Pallet 83].

Uma definição importante no vôo de helicópteros é o *ângulo de pitch*, formado entre a linha de corda e o plano horizontal do disco do rotor. A alteração deste ângulo, obtida através da rotação da pá, provoca a alteração do *ângulo de ataque*, conforme mostrado na figura 1.7 [Collier 86]. É importante ressaltar que o ângulo de pitch é definido geometricamente, através da linha de corda do aerofólio e do plano do disco do rotor. Já o ângulo de ataque é definido como o ângulo entre a linha de corda e o vento relativo. Os comandos utilizados pelo piloto afetam o ângulo de pitch, que altera o ângulo de ataque. Porém, este último também é influenciado pela direção do vento.

O ângulo de pitch de uma pá pode ter o mesmo valor em qualquer posição que ela ocupe no disco do rotor, ou este ângulo pode variar em torno de um valor médio de acordo com a posição da pá no disco.

A sustentação gerada nas pás não é de igual intensidade em toda a sua extensão, pois ela varia com o raio, crescendo no sentido do centro do disco do rotor para as bordas, como mostra a figura 1.8. Mas, como próximo às bordas o ar se torna turbulento, a sustentação decresce nesse ponto. Porém, para efeito de análise do movimento do helicóptero, o que se considera é que a sustentação é uma só força (L_R) agindo sobre o centro do disco do rotor e perpendicular ao **PPP**.

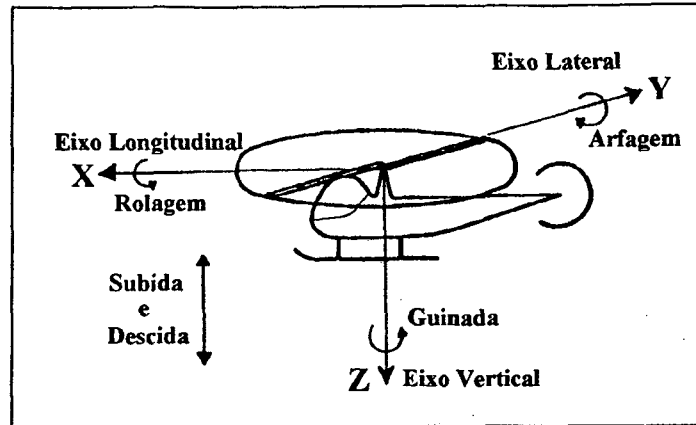


Fig. 1.9 - Os principais eixos e momentos de rotação em torno do helicóptero

1.3 MOVIMENTOS DO HELICÓPTERO

Os helicópteros são únicos na sua capacidade de subir e descer verticalmente, mover-se horizontalmente em qualquer direção e pairar sobre um ponto no chão, com o movimento livre de virar o nariz para qualquer direção [Pallet 83]. Todo e qualquer movimento executado por um helicóptero resulta do balanceamento de forças e momentos. Considerando que existe um sistema de três eixos (X, Y e Z) com a origem no centro de gravidade do helicóptero podemos conceituar, de acordo com a figura 1.9 [Schlüter 81],[Santoro 92] :

- movimentos ao longo do eixo X são chamados *longitudinais*;
- movimentos ao longo do eixo Y são chamados *laterais*;
- movimentos ao longo do eixo Z são chamados *verticais*;
- movimentos em torno do eixo X são chamados *rolagem (roll)*;
- movimentos em torno do eixo Y são chamados *arfagem (pitch)*;

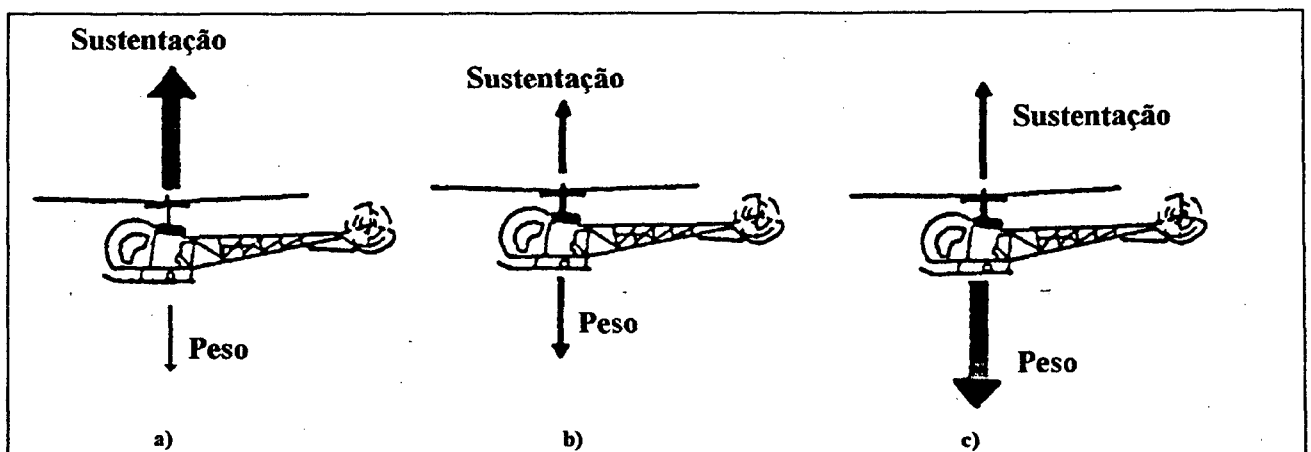


Fig. 1.10 - a) Sustentação maior que o peso, helicóptero sobe; b) sustentação igual ao peso, helicóptero permanece parado; c) sustentação menor que o peso, helicóptero desce.

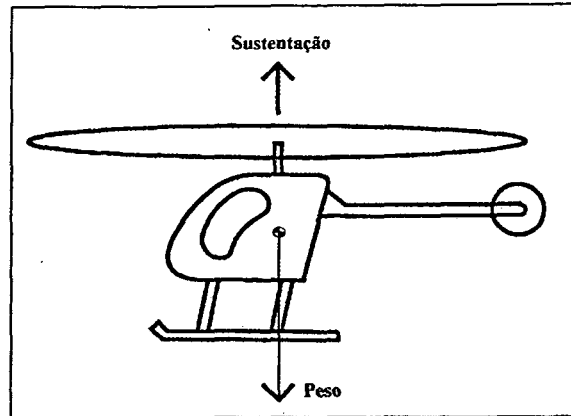


Fig. 1.11 - Centro de gravidade e centro do rotor alinhados.

- movimentos em torno do eixo Z são chamados *guinada (yaw)*.

A seguir são analisados os fatores envolvidos em cada manobra do helicóptero.

1.3.1 POUSO E DECOLAGEM

As manobras de decolagem e pouso ocorrem devido a movimentos verticais, ao longo do eixo Z. Esse movimento depende da relação entre peso (atuando no centro de gravidade) e a força de sustentação (atuando no centro do disco do rotor).

A fig. 1.10 mostra os movimentos do helicóptero segundo a relação entre sustentação e peso [Collier 86]:

- se a sustentação é maior que o peso, o helicóptero acelera para cima (figura 1.10a);
- se a sustentação é igual ao peso, o helicóptero permanece parado, a uma altitude constante (figura 1.10b);
- se o peso é maior que a sustentação, o helicóptero acelera para baixo (figura 1.10c).

Normalmente, para facilitar a pilotagem, o projeto do helicóptero é feito de maneira que o centro de gravidade e o rotor principal fiquem alinhados na vertical, como se vê na figura 1.11, sem que haja momentos de rolamento ou arfagem decorrentes.

Porém, às vezes, o tipo de tarefa que o helicóptero irá desempenhar não permite que essa suposição de alinhamento se confirme, sendo necessário que o piloto corrija os efeitos indesejáveis resultantes.

1.3.2 GUINADA

O movimento de guinada refere-se ao direcionamento do nariz do helicóptero (ângulo de guinada) que é feito através do rotor de cauda.

As pás do helicóptero giram em um sentido fixo e determinado: horário, pela convenção europeia ou anti-horário, pela convenção americana. O corpo do helicóptero reage a essa rotação, tendendo a girar em sentido contrário (*torque de reação*).

O rotor de cauda, funcionando com o mesmo princípio do rotor principal, gera uma força

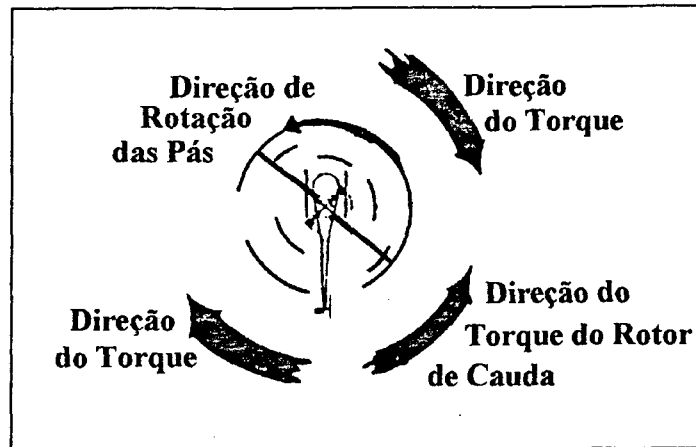


Fig. 1.12 - O torque do rotor de cauda compensa os efeitos de torque do rotor principal, que tende a girar a fuselagem do helicóptero na direção contrária a das pás do rotor principal

de propulsão que compensa essa reação do corpo do helicóptero (*torque de contra-reação*), conforme mostrado na figura 1.12 [Collier 86] [Pallet 83]:

- se o ângulo de ataque das pás do rotor da cauda não for suficiente para gerar uma força que compense o torque de reação, o nariz vai girar no sentido oposto ao da rotação das pás do rotor principal;
- se a força produzida pelo rotor de cauda for maior que o torque de reação, o nariz vai girar no mesmo sentido de rotação das pás do rotor principal.

1.3.3 VÔO A FRENTE

Para que o helicóptero voe a frente, é preciso que haja uma força resultante a frente no eixo X diferente de zero. Isso é alcançado usando-se uma parcela da sustentação produzida pelas pás, inclinando o PPP ligeiramente à frente, como se vê na fig.1.13. A componente a frente da

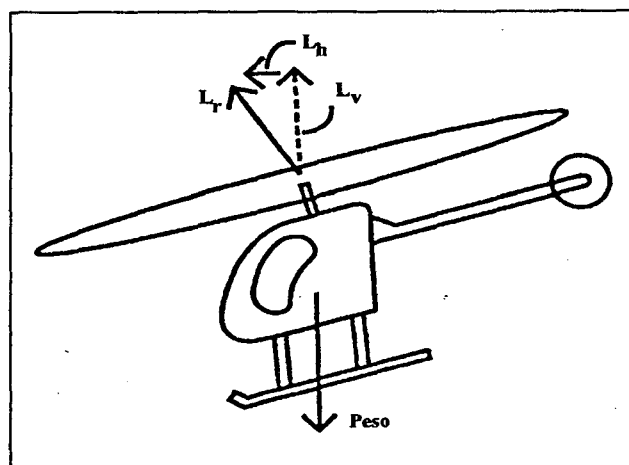


Fig. 1.13 - A componente vertical da sustentação compensa o peso, enquanto a componente horizontal produz aceleração a frente

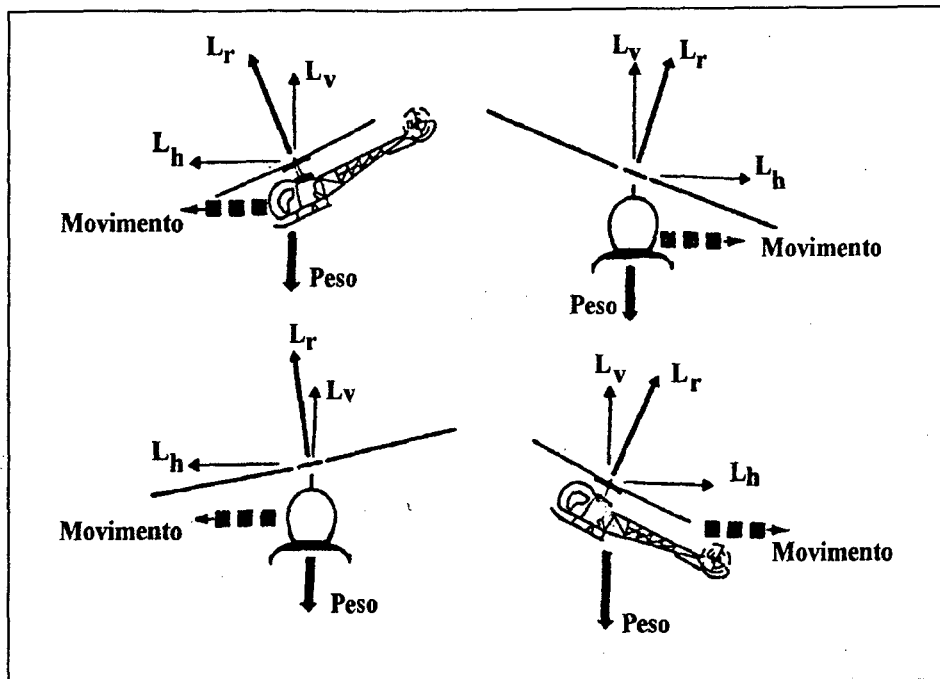


Fig. 1.14 - A direção da componente horizontal determina a direção do movimento

sustentação fará com que o helicóptero acelere até que a força de arrasto (item 1.1) total no helicóptero iguale essa componente à frente e a anule. A partir daí, o voo a frente possui velocidade constante [Collier 86].

Já que o vetor de sustentação não está mais apontando diretamente para cima, parte da força que compensa o peso está perdido, resultando em perda de altitude. É necessária então uma compensação automática no ângulo de ataque, aumentando-o e portanto aumentando a sustentação resultante.

Um outro efeito do voo a frente é a tendência de girar em torno do eixo y, descendo o nariz (arfagem). Este movimento ocorre devido ao momento da componente horizontal da sustentação em relação ao centro de gravidade do helicóptero, conforme figura 1.13 [Basics of R/C Helicopters].

1.3.4 VÔO PARA TRÁS E VÔO LATERAL

O mesmo princípio de voo à frente se aplica para voo lateral e voo para trás. Isto é, basta inclinar o PPP para o lado que se deseja voar, como representado na figura 1.14.

Assim como a arfagem para voo a frente, a rolagem no voo lateral é consequência do momento da componente horizontal da sustentação em relação ao centro de gravidade.

Vale ressaltar que o movimento de girar em torno do centro de gravidade sempre existe, mas varia o sentido, dependendo do movimento. Assim:

- voo a frente: arfagem, nariz para baixo;
- voo para trás: arfagem, nariz para cima;

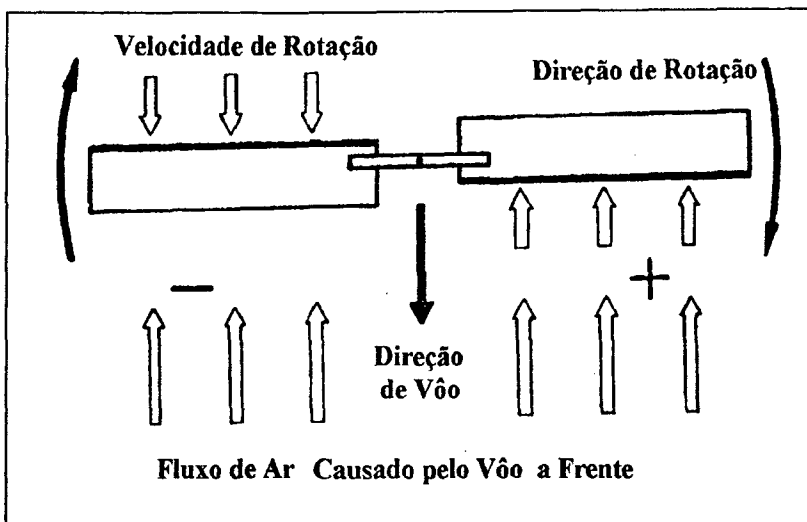


Fig. 1.15 - Assimetria de sustentação causada por vôo a frente

- vôo a direita: rolagem, para o lado direito;
- vôo a esquerda: rolagem, para o lado esquerdo.

1.3.5 ROLAGEM E ARFAGEM

Quando em vôo a frente, ocorre uma assimetria de sustentação, devido ao fato de que as pás que avançam de encontro ao fluxo de ar causado pelo vôo a frente estão gerando maior sustentação que as pás que estão indo na mesma direção deste fluxo de ar, conforme se vê na figura 1.15. Nesta situação, o helicóptero rolaria para um lado (se rotação horária, lado direito e se rotação anti-horária, lado esquerdo) incontrolavelmente.

Para resolver esse problema, as pás são ligadas ao eixo do motor por meio de uma dobradiça que permite as pás subirem e descerem livremente enquanto giram (movimento de bater palmas ou *flap*) [Collier 86][Pallet 83]. Veja figura 1.16a.

Por vezes, a dobradiça não existe, mas a pá é feita de um material flexível, o que permite

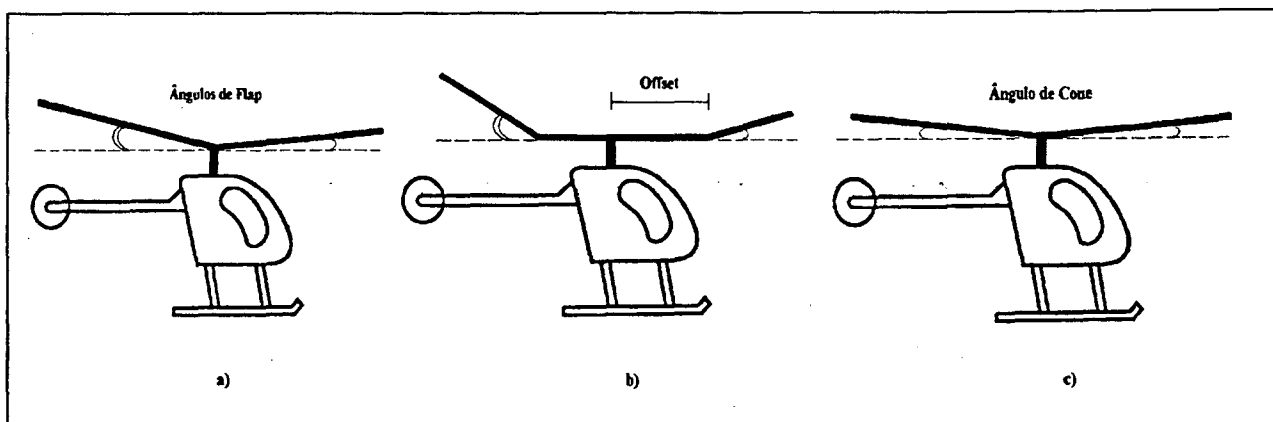


Fig. 1.16 - a) Ângulos de flap por dobradiça; b) ângulos de flap por material flexível; c) ângulo de cone.

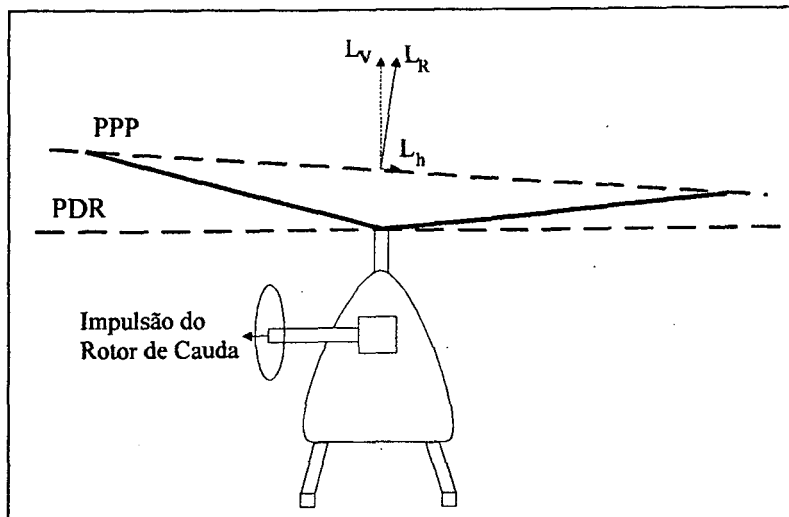


Fig. 1.17 - Inclinação do rotor principal para compensar força do rotor de cauda

que ela dobre, realizando um movimento equivalente ao de flap, como se vê na figura 1.16b. A distância entre o eixo do rotor e o ponto onde é feita a flexão da pá é chamada *offset*.

Assim, a pá que avança sobe um pouco, diminuindo sua sustentação (o ângulo de ataque decresce) e a pá que está voltando reage à perda de velocidade do ar, descendo um pouco (o ângulo de ataque aumenta). Assim, a ponta da pá percorre uma trajetória senoidal.

Esse movimento de flap tende a igualar a sustentação nas duas metades do disco do rotor.

Devido ao fato das pás estarem livres para subirem e descerem, mesmo quando não há velocidade a frente ou esta é muito baixa, não havendo assimetria de sustentação, elas tendem a subir devido à força resultante entre sustentação (que puxa o centro do disco do rotor para cima) e às forças centrífugas (que tendem a manter as pás na horizontal). Como as forças centrífugas são muito mais significativas, as pás farão um ligeiro movimento para cima. Existirá então um pequeno ângulo de cone (figura 1.16c), em torno do qual o movimento de flap é feito para corrigir a assimetria de sustentação [Collier 86][Pallet 83].

Como seria de se esperar, desde que o rotor de cauda está agindo como um propulsor lateral, o helicóptero inteiro tem a tendência de mover-se para o lado em que está o motor de cauda. Para reagir a essa tendência, o rotor principal é ligeiramente inclinado para o lado oposto do rotor de cauda, de maneira a criar uma força contrária, como mostrado na figura 1.17.

1.4 COMANDOS DE VÔO

Há, basicamente, quatro comandos que se usa durante o vôo [Collier 86], supondo a velocidade de rotação das pás mantida constante por um sistema independente:

- comando do ângulo de pitch coletivo do rotor principal;
- comando dos ângulos de pitch cíclico longitudinal e lateral do rotor principal;

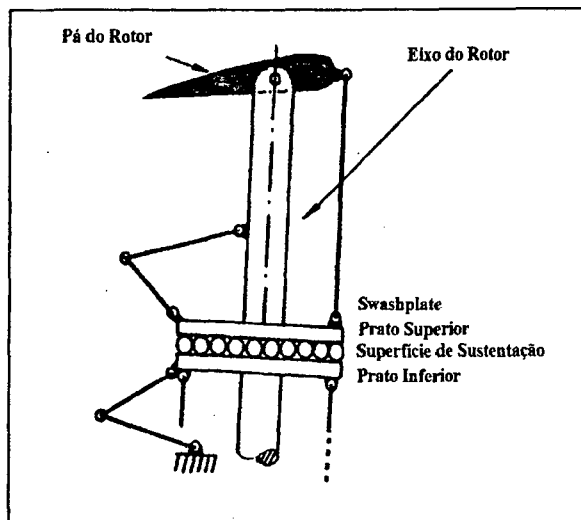


Fig. 1.18 - Sistema de prato oscilante (swashplate)

• comando do ângulo de pitch coletivo do rotor de cauda.

Estes comandos permitem que se altere as forças de equilíbrio do helicóptero, permitindo seu movimento. A modificação da intensidade ou direção dessas forças ocorre como consequência de alteração no ângulo de pitch das pás do rotor principal e do rotor de cauda. Existem, basicamente, três sistemas mecânicos de variação do ângulo de pitch das pás [Santoro 92]:

- sistema de inclinação do eixo do rotor;
- sistema de inclinação do cubo do rotor;
- sistema de prato oscilante (swashplate).

Na maior parte dos helicópteros, é usado o último sistema, que consiste de dois pratos superpostos, como se vê na figura 1.18. O prato inferior é responsável pela alteração do ângulo de pitch cíclico. Este prato é capaz de inclinar-se em qualquer direção, mas ele não gira com o

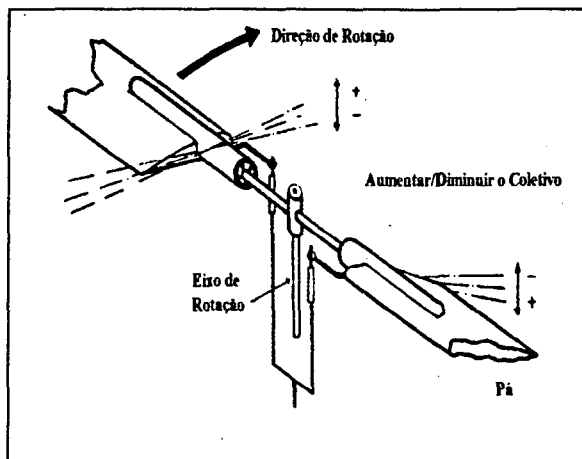


Fig. 1.19 - Comando do ângulo de pitch coletivo

rotor. Ele é ligado ao prato superior, que gira com o rotor, por meio de uma superfície de sustentação.

O prato superior altera o ângulo de pitch coletivo, subindo e descendo o eixo do rotor. Ele também se inclina com o prato inferior, alterando o ângulo ciclicamente durante a rotação [Schlüter 79].

O swashplate, portanto, é o dispositivo mecânico que permite a atuação no ângulo de pitch do rotor principal, inclinando o PPP do rotor.

1.4.1 COMANDO DO ÂNGULO DE PITCH COLETIVO DO ROTOR PRINCIPAL

Esse comando muda o ângulo de pitch das pás do rotor principal coletivamente, para aumentar a intensidade da sustentação e acelerar o helicóptero para cima.

Quando se eleva a alavanca de comando do coletivo, há um aumento igual e simultâneo do ângulo de pitch de todas as pás do rotor principal. Quando se baixa o coletivo, diminui-se igual e simultaneamente o ângulo de pitch de todas as pás, como mostra a figura 1.19 [Collier 86].

Essa alavanca de comando é mecanicamente ligada ao swashplate, alterando sua posição no eixo do rotor.

Como é essencial que a velocidade de rotação das pás permaneça constante, deve haver um controle automático que altere a potência do motor quando o ângulo de pitch é alterado [Collier 86].

Resumindo: elevar a alavanca de comando do coletivo resulta na subida do helicóptero; baixá-la, por sua vez, faz com que o helicóptero diminua sua altitude.

1.4.2 COMANDOS DOS ÂNGULOS DE PITCH CÍCLICO LONGITUDINAL E LATERAL DO ROTOR PRINCIPAL

Estes dois comandos são comumente estudados em conjunto, já que são similares, com a diferença da direção do movimentos resultante. Os comandos dos ângulos de pitch cíclico são atuados por uma só alavanca e o piloto opera ambos simultaneamente.

O comando do ângulo de pitch cíclico tem por objetivo mover o helicóptero horizontalmente: para frente ou para trás, para a esquerda ou para a direita, ou um movimento composto, em uma direção qualquer.

Este tipo de movimento é alcançado girando o PPP na direção em que o movimento horizontal é desejado. Assim, a força de sustentação também se inclina na mesma direção, gerando uma componente de força nessa direção que causa uma aceleração.

Para inclinar o PPP, varia-se o valor do ângulo de pitch de *cada pá*, de maneira que, em diferentes posições, o ângulo de ataque é diferente.

Como uma alteração no ângulo de pitch provoca alterações no ângulo de flap, este também variará para diferentes posições no disco do rotor. Esta variação do ângulo de flap é que

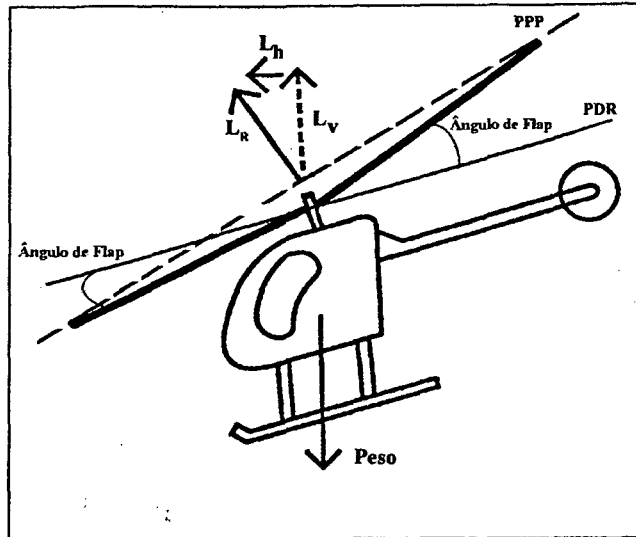


Fig. 1.20 - Efeito de inclinar o disco do rotor alterando o ângulo de pitch ciclicamente causa a inclinação do PPP.

Desta forma, se o movimento desejado é para frente, o disco do rotor deve ser inclinado para frente, ou seja, o ângulo de flap quando a pá estiver atrás deve ser maior, e o ângulo de flap quando a pá estiver na frente deve ser menor, conforme figura 1.20.

Ao equacionar o efeito de flap devido ao ângulo de pitch, verifica-se que há uma defasagem entre eles: quando não há offset (isto é, existe dobradiça de flap), o ângulo de flap está atrasado de 90° do ângulo de pitch; quando há offset (isto é, não há dobradiça e a pá é flexível), o ângulo de defasagem é menor que 90° , inversamente proporcional ao tamanho do offset.

Assim, a mudança de pitch deve ocorrer aproximadamente 90° antes da alteração do flap. Se a alavanca de pitch cíclico é movida para frente, por exemplo, o ângulo de ataque decresce quando as pás do rotor passam a direita do piloto e cresce quando passam a esquerda,

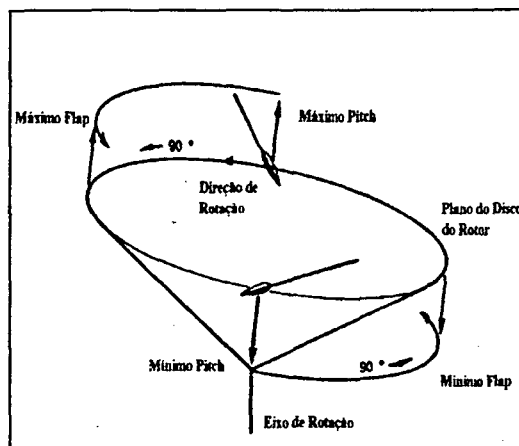


Fig. 1.21 - Variação dos ângulos de pitch e flap em toda a extensão do disco do rotor

considerando a convenção americana de rotação do rotor (anti-horária).

Na figura 1.21 são mostradas as variações dos ângulos de pitch e de flap em todo o período de rotação, considerando que não há offset (ângulo de defasagem é igual a 90°).

1.4.3 COMANDO DO PITCH COLETIVO DO ROTOR DE CAUDA

O comando do pitch coletivo do rotor de cauda permite que o ângulo de pitch das pás do rotor de cauda aumente e diminua, igual e simultaneamente em todas as pás. Isto permite que a força gerada pelo rotor de cauda para contrabalançar o torque de reação do rotor principal aumente e diminua, direcionando o nariz do helicóptero.

O rotor de cauda tem normalmente um ângulo de pitch médio positivo com o coletivo na posição neutra. Este pitch positivo médio aproximadamente iguala o torque do rotor de cauda ao torque do rotor principal, para que, sem aplicar coletivo do rotor de cauda, o helicóptero mantenha uma direção constante [Collier 86].

Considerando a rotação no sentido anti-horário, se o coletivo do rotor de cauda é aumentado, o nariz do helicóptero gira no sentido anti-horário. Se o coletivo do rotor de cauda é diminuído para abaixo do valor médio, o nariz gira no sentido horário. A relação entre o acionamento dos pedais e o movimento do nariz pode ser vista na figura 1.22.

1.5 ESTABILIDADE E ACOPLAMENTOS

O aprendizado da pilotagem de helicópteros requer treino, já que o helicóptero se caracteriza por sua instabilidade, retardos nas respostas e forte acoplamento entre os modos de movimentos [Prouty 90].

A estabilidade de um helicóptero é vista como a tendência de manter uma condição de voo estabelecida.

O voo de um helicóptero normal, isto é, sem um sistema de aumento de estabilidade (SAS), caracteriza-se por degeneração nos seus movimentos, decorrendo em instabilidade [DAHUS 74].

Como essa degeneração ocorre com uma constante de tempo da ordem de segundos, o

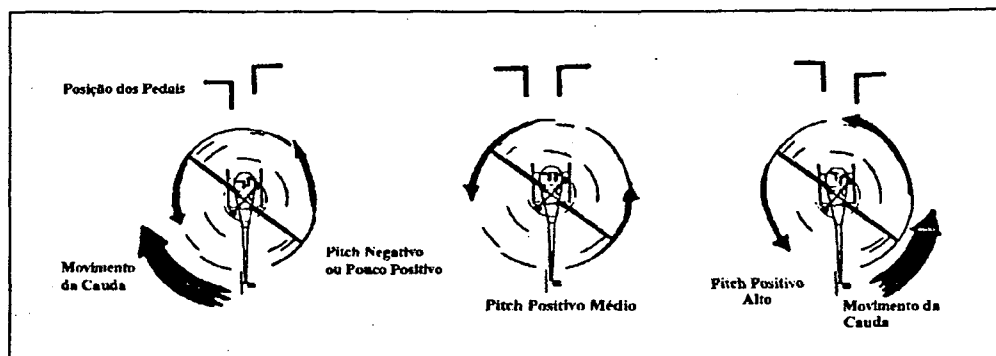


Fig. 1.22 - Posição do pedal em relação ao torque do rotor de cauda

piloto consegue reagir e corrigir o movimento errático. No entanto, o piloto fica sobrecarregado com a tarefa de direcionar o vôo, nivelar a aeronave e verificar seu estado geral (combustível, temperatura, pressão, etc.).

A normalização dos requisitos de resposta para helicópteros utilizada atualmente (norma militar americana MIL-H-8501) é inadequada à tecnologia corrente, tendo sido realizados ultimamente vários estudos para sua atualização [Mitchell 89].

Mesmo assim, para que sejam alcançados os requisitos de amortecimento dados por esta norma é necessário algum tipo de aumento de estabilidade. Os estabilizadores horizontal e vertical, assim como o dispositivo conhecido como *flying bar*, indicado na figura 1.23, tem como função melhorar a estabilidade.

Os helicópteros modernos utilizam, além de dispositivos mecânicos de estabilização, um sistema automático que altera seu comportamento dinâmico. Estes sistemas são capazes de gerar momentos proporcionais contrários ao movimento que se deseja evitar, propiciando boas respostas da aeronave a aplicações de comando do piloto [Santoro 92].

Os retardos na resposta não chegam a constituir problema para pilotos treinados, que prevêm a resposta atrasada do helicóptero. Mas, para sistemas automáticos de controle, esta característica causa sobrepasso e, eventualmente, instabilidade, dificultando o ajuste de ganhos.

Por acoplamento entende-se as reações que o helicóptero tem a determinados comandos. É desejado, por exemplo, que como resposta a um comando cíclico longitudinal a frente a única reação seja o movimento a frente.

Mas, de acordo com o que foi explicado no item 1.3, alguns comandos resultam em movimentos indesejados, caracterizando a existência de acoplamento.

Esses acoplamentos são, normalmente, corrigidos pelo piloto. Ele prevê o movimento indesejado que vai ocorrer e tenta corrigi-lo através de comandos.

Por vezes, os sistemas automáticos de estabilizações também tentam solucionar, ou ao menos, reduzir os acoplamentos mais fortes.

1.6 AERONAVE DA GYRON TECNOLOGIA

A Gyron Tecnologia em Servo Sistemas Ltda., empresa criada em agosto de 1990, está desenvolvendo um veículo aéreo não-tripulado semelhante a um helicóptero (aeronave de asas rotativas), com o objetivo de realizar tarefas de observação e inspeção, carregando em seu bojo dispositivos de visão eletrônica que permitem imagens aéreas.

O veículo desenvolvido pela Gyron é construído em alumínio aeronáutico, sendo que novas versões serão contruídas em fibra de carbono. Dotado de Motor de 5 HP, ele possui autonomia de 2 horas de vôo, pesando aproximadamente 15 Kg, com capacidade de carga útil de 5 Kg. Após 200 horas de vôo com dois protótipos, a Gyron está pronta para dar início à estruturação da produção do cabeça de série.

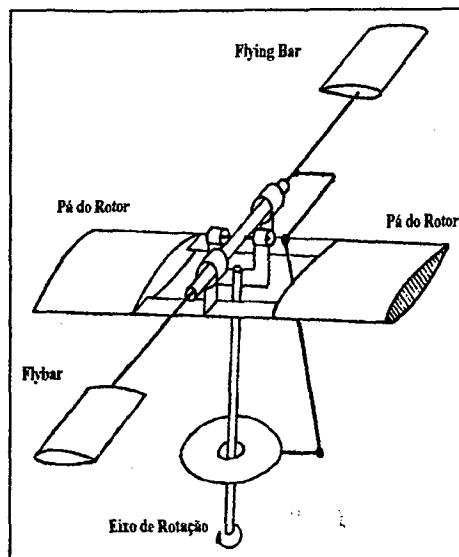


Fig. 1.23 - Dispositivo Mecânico de Estabilização (Flying Bar)

O helicóptero conta com sistema de auxílio à pilotagem baseado em computadores embarcados e com uma estação de terra inteligente instalada em um veículo de apoio, sendo a ligação com terra feita via radio digital. Possui como computador de bordo o sistema TRIO, que opera com Transputer e Microcontroladores. Esse sistema eletrônico foi projetado visando sua proteção contra perturbações eletromagnéticas.

Está equipado com o seguintes sensores:

- GPS diferencial;
- bússola eletrônica;
- sensores de atitude (inclinômetro e giroscópios);
- acelerômetros;
- sistema de navegação inercial.

Entre as potenciais aplicações desta aeronave, pode-se citar:

- vistorias em áreas imersas em atmosferas hostis ao ser humano, como por exemplo áreas contaminadas por agentes radioativos, químicos ou biológicos;
- vigilância ecológica florestal a baixo custo, como rastrear incêndios e outros agentes agressores às reservas e parques sob proteção;
- inspeção de isoladores, suportes, conexões e cabos em torres de alta tensão;
- realização de imagens externas avançadas para estações de TV;
- vistorias de fissuras em obras de arte de concreto em locais de difícil acesso.

1.7 CONCLUSÕES

Neste capítulo foram apresentados os princípios básicos para do helicóptero.

Inicialmente, foram mostrados princípios de aerodinâmica, importantes para a compreensão do funcionamento do helicóptero, assim como os movimentos deste tipo de aeronave.

Foram descritos os comandos utilizados pelo piloto para controlar o helicóptero, e como são atuados para execução das manobras de voo mais comuns. Uma descrição qualitativa da estabilidade e dos acoplamentos existentes nos helicópteros em geral também foi incluída neste capítulo.

Por fim, foram descritas as características da aeronave desenvolvida pela Gyron Tecnologia, com algumas de suas aplicações.

No próximo capítulo, é apresentado um pouco sobre a teoria da aplicação de lógica nebulosa em controle de processos.

CAPÍTULO 2

CONTROLADORES NEBULOSOS

O propósito deste trabalho é desenvolver um sistema de navegação para helicóptero baseado no conhecimento do piloto. Traduzir sua experiência de pilotagem para um sistema especialista, implica traduzir raciocínios e ações do tipo: se erro de altitude é médio, então aplicar comando coletivo pequeno. É fundamental, portanto, representar noções de imprecisão e incerteza inerentes ao raciocínio e linguagem humanos presentes, neste caso, nos adjetivos *pequeno e médio*, sob forma de imprecisão.

Neste capítulo é apresentado o conceito de controladores nebulosos, sendo que primeiro são traçadas justificativas para o uso de lógica nebulosa em controle e um pequeno histórico de aplicações.

A seguir é introduzida a lógica nebulosa, seus conceitos e formalismos. O uso de lógica nebulosa em sistemas baseados em regras é então apresentado, descrevendo como as regras utilizando variáveis linguísticas são disparadas e o tratamento matemático existente.

Ainda neste capítulo são descritos alguns aspectos importantes relativos à construção de modelos nebulosos e seu estudo de estabilidade. Finalmente, a teoria de controladores nebulosos é apresentada, bem como o método de projeto e determinação dos parâmetros.

2.1 INTRODUÇÃO

Apesar de existirem várias técnicas de análise e projeto matematicamente precisas, todo projeto ainda depende do bom senso do projetista. O modelo, a base fundamental desse tipo de projeto, nem sempre é igual ao processo real, caracterizando a existência de incerteza [King and Mandani 77], enquanto que a escolha dos critérios de projeto depende do ponto de vista e experiência pessoal do projetista, representando a subjetividade [Kickert and van Nauta Lemke 76]. O desempenho do controle alcançado pelo operador pode não ser tão preciso quanto desejado de um controlador, mas possui muitas características desejáveis tais como a habilidade de rejeitar perturbações significantes, de controlar processos não-lineares e de sentir e adaptar-se a mudanças no comportamento do sistema.

Por tudo isso é interessante estudar de um modo formal a política de controle utilizada pelo operador. Para isso, utiliza-se a lógica como ciência que estuda os métodos e princípios de raciocínio [Klir and Folger 88] para analisar o pensamento humano. Os modelos lógicos de raciocínio, partindo da lógica bivalente (ou clássica) até a lógica infinitamente polivalente, foram evoluindo de maneira a melhor representarem o raciocínio humano diante de fatos ou proposições.

Nesse sentido, percebe-se que o pensamento humano não trabalha com números exatos, mas com classes rotuladas de objetos em que a transição ser/não ser, pertencer/não pertencer é gradual e não abrupta. As decisões são tomadas como ações correspondendo a situações, podendo ser modeladas como regras. Tais regras utilizam termos vagos e imprecisos, tais como *pequeno*, *rápido*, *alto* ou *grande* para definir as condições das variáveis do processo e do controle [Zadeh 84], [Bernard 88].

A teoria de lógica nebulosa foi introduzida por Lofti Zadeh em 1965 na tentativa de modelar as imprecisões do raciocínio humano. De fato, a habilidade humana de criar declarações precisas e relevantes sobre o comportamento de um sistema diminui a medida que a complexidade deste sistema aumenta [Zadeh 73]. As principais características que diferenciam a lógica nebulosa são o uso de variáveis linguísticas, ao invés de numéricas, e a caracterização de relações entre variáveis por meio de declarações condicionais (regras). Sistemas baseados em regras utilizando lógica nebulosa fornecem um meio de modelar o comportamento humano, convertendo uma estratégia de controle linguística (como a que é expressa pelos operadores humanos) em uma estratégia automática de controle. Em essência, o controlador que utiliza lógica nebulosa pode ser visto como um algoritmo que automatiza o conhecimento do operador humano [Lee 90a], [Bernard 88].

A metodologia do controlador baseado em lógica nebulosa é útil na automatização do controle de processos muito complexos para análise por técnicas quantitativas convencionais ou quando as fontes disponíveis de informação são inexatas ou incertas, não havendo então modelo que sirva de base ao projeto do controle. Devido a simplicidade de implementação de um sistema de controle baseado em lógica nebulosa, o tempo de implementação e a memória utilizada são menores que no caso de uma estratégia de controle convencional, ao mesmo tempo que o número de regras é reduzido em comparação com um sistema especialista baseado em lógica clássica [Apronix 93], [Tong 77], [Self 90], [Viot 93].

2.1.1 HISTÓRICO DE APLICAÇÕES

A primeira aplicação de lógica nebulosa em controle foi publicada por Mandani e Assilian. O problema era relacionado com o controle de velocidade e pressão de uma máquina a vapor tendo como variáveis de controle o calor aplicado na caldeira e a potência na máquina. As dificuldades com o processo eram sua não linearidade, ruído, forte acoplamento e difícil controle manual. Entretanto, seu controle, baseado em 24 regras linguísticas, obteve melhor desempenho que um algoritmo de controle bem ajustado, e era menos sensível a alterações nas condições de operação [Togai 92][Maiers and Sherif 85].

Por essa época, Kickert e van Nauta Lemke [Kickert and van Nauta Lemke 76] examinaram a performance de um algoritmo de controle nebuloso para uma planta de aquecimento de água. O problema consistia em regular a temperatura da água saindo de um reservatório a fluxo constante alterando o fluxo de água quente em um trocador de calor contido

no reservatório. Uma tarefa secundária do controle seria assegurar uma resposta rápida a mudanças na temperatura desejada. As dificuldades básicas eram a não-linearidade do processo e o ruído, características de ganhos assimétricos e grande tempo de retardo. A performance do algoritmo básico foi comparada com um controlador PI ótimo e mostrou uma resposta a degrau mais rápida.

Utilizando a mesma máquina a vapor descrita anteriormente, Mandani desenvolveu um controlador auto ajustável. Esta abordagem permitiu o aprendizado de regras nebulosas no processo de operação do sistema. Este trabalho foi inicialmente aplicado a um modelo monovariável, sendo depois expandido para controladores nebulosos adaptativos multivariáveis.

Nos anos que se seguiram, várias aplicações foram divulgadas, sendo que os resultados sempre apresentavam o controlador nebuloso como melhor ou, nos piores casos, igual aos controladores convencionais e aos operadores humanos [Xu and Lu 87], [Sripada et al 87], [Pappis and Mandani 77], [Larkin 85], [Sugeno and Nishida 85], [Takagi and Sugeno 83], [Bernard 88], [Sugeno and Kang 86], [Tong et al 80], [Li and Lau 89], [Vachtsevanos 93], [Liaw and Wang 91], [Chiu et al 91], [Yoshida and Wakabayashi 92], [Larsen 80]. Além destas aplicações industriais e acadêmicas, no Japão, até mesmo produtos eletrodomésticos comuns já utilizam lógica nebulosa [Self 90], inclusive com implementação de processadores nebulosos [Lee 90b], [Sugeno and Kang 92], [Sibigtroth 92]. Revisões detalhadas das aplicações de controle nebuloso estão em [Tong 77] e [Maiers and Sherif 85].

2.2 LÓGICA NEBULOSA

Nessa seção é mostrado como a lógica nebulosa, formalismo matemático baseado em conjuntos nebulosos, permite tratar informações imprecisas ou vagas, modelando o pensamento humano.

A lógica clássica lida com proposições que podem ser "verdadeiras" (valor lógico 1) ou "falsas" (valor lógico 0), por isso é chamada também de lógica bivalente. A lógica clássica, porém, possui restrições no que diz respeito a fatos futuros ou a fatos não precisos, que não podem por enquanto serem classificados nem como verdadeiros nem como falsos.

Por esse motivo, a lógica bivalente foi expandida para a lógica trivalente que possui um terceiro valor lógico ($1/2$) que indica "é possível". Novas regras dos operadores foram definidas, mas nos valores extremos (0 e 1) a lógica trivalente é coerente com a lógica bivalente [Lukasiewicz 75].

A partir dessa expansão, foi feita uma generalização definindo a lógica polivalente, onde há graus de possibilidade, chamados graus de verdade [Lukasiewicz 75]. Quando esses graus de verdade podem assumir qualquer valor no intervalo fechado $[0,1]$, está sendo utilizada a lógica infinitamente polivalente [Klir and Folger 88].

A lógica nebulosa é um tipo de lógica infinitamente polivalente, onde os coeficientes de pertinência de um elemento u a um conjunto A podem ser interpretados como os graus de verdade da proposição "u pertence ao grupo A" [Klir and Folger 88]. Ela usa declarações graduadas ou qualificadas em vez daquelas que são estritamente verdadeira ou falsa [Zadeh 84], [Self 90].

Os termos (constantes ou variáveis) utilizados em lógica nebulosa pertencem a classes cujos contornos não são precisamente delimitados. Os elementos u que pertencem a uma classe possuem graus (coeficientes) de pertinência ($\mu(u)$) no intervalo $[0,1]$, que estabelecem quão bem o objeto é compatível com o conceito representado por esta classe. Um conjunto nebuloso é definido por seus elementos e respectivos coeficientes de pertinência [Sugeno and Kang 92], [Pedrycz 89], [Lee 90a].

Ex. 2.1: Tomando como exemplo o conjunto nebuloso de *peessoas altas*, pode-se definir que a partir de 1,80m, qualquer pessoa é considerada alta (coeficiente de pertinência ao conjunto igual a 1). Já as pessoas com menos de 1,60m não são consideradas altas (coeficiente de pertinência igual a 0). As pessoas de altura entre 1,60m e 1,80m possuem coeficientes de pertinência entre 0 e 1, sendo que este coeficiente representa o grau com que essas pessoas podem ser consideradas altas. Um possível conjunto nebuloso *peessoas altas* está representado na figura 2.1a.

Ex. 2.2: Atendo-se ao caso do helicóptero, conjuntos nebulosos são usados para classificar erros de posição, erro de altitude ou ângulos de atitude. Um exemplo seria o conjunto nebuloso *erro de altitude grande*, com erro de altitude (E_h) definido por:

$$E_h = H_d - h,$$

onde H_d é a altitude desejada e h é a altitude atual. O conjunto nebuloso *erro de altitude grande* caracteriza erros de altitude entre 20 e 3000 metros como sendo verdadeiramente grandes ($\mu_g = 1$). Erros de altitude de até 10 metros não são considerados grandes ($\mu_g = 0$), e os erros de altitude no intervalo entre 10 e 20 metros são classificados como grandes segundo a equação:

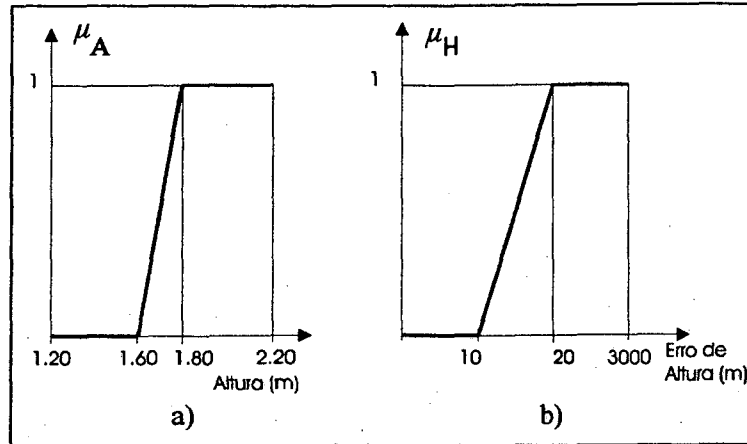


Fig. 2.1 - a) Conjunto Nebuloso Pessoas Altas; b) Conjunto Nebuloso Erro de Altitude Grande

$$\mu_g = E_h/10 - 1.$$

O formato do conjunto *erro de altitude grande* é mostrado na figura 2.1b.

a) UNIVERSO DE DISCURSO

Define-se como *universo de discurso* U o conjunto genérico de objetos onde a função de pertinência de um objeto u a um conjunto nebuloso é definida [Lee 90a]. O *suporte* S de um conjunto nebuloso é definido como o conjunto dos valores do universo de discurso cuja função de pertinência possua valor maior que zero [Dubois and Prade 88],

$$\mu(u) > 0, u \in U,$$

e o *núcleo* N como o conjunto de valores do universo de discurso cuja função de pertinência é igual a 1:

$$\mu(u) = 1, u \in U.$$

Um universo de discurso pode ser contínuo, quando seus elementos são infinitos, e pode ser discreto, com um número finito de elementos. Um exemplo de universo de discurso contínuo é a altura das pessoas, por exemplo. Enquanto que a posição de uma peça dentro de uma célula de manufatura é um universo discreto, já que a peça somente pode estar em máquinas específicas.

O universo de discurso contínuo pode ser representado de maneira discreta (universo é dividido em um número finito de segmentos ou níveis) ou contínua (universo composto por infinitos pontos), sendo a primeira forma a mais utilizada, para simplificar a representação em computador digital [Lee 90a].

No exemplo 2.1 de altura das pessoas, o universo de discurso se restringe às pessoas com altura entre 1,20m e 2,20m, supondo que não existem pessoas adultas com altura fora desse intervalo. Já no exemplo 2.2 do erro de altitude do helicóptero, o universo de discurso é o intervalo de 0 a 3000 metros de altitude.

A representação do universo de discurso interfere na definição dos conjuntos nebulosos. Se o universo de discurso for contínuo, uma função contínua relaciona o elemento com seu grau de pertinência; se for discretizado, são estabelecidos graus de pertinência para cada segmento discretizado do universo. A figura 2.2 mostra os mesmos conjuntos da figura 3.1 utilizando universos de discursos discretizados.

b) VARIÁVEL LINGÜÍSTICA

Uma variável linguística é caracterizada por uma quintupla $(u, T(u), U, G, M)$ onde u é o nome da variável; $T(u)$ é o conjunto de termos de u , onde termos são os nomes dos valores linguísticos de u , cada um representando um conjunto nebuloso; U é o universo de discurso onde os conjuntos são definidos; G é uma regra sintática para gerar os nomes dos termos de u ; e M é uma regra semântica que associa a cada termo $T(u)$ seu significado [Lee 90a].

Ex. 2.3: A variável linguística *erro de altitude* é caracterizada pela quintupla:

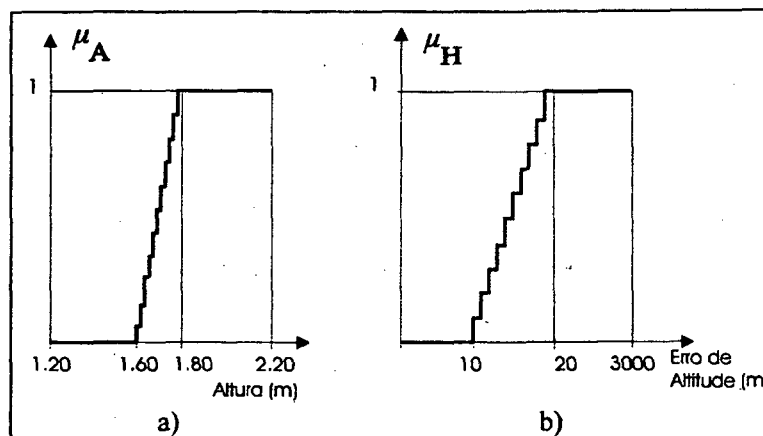


Fig. 2.2 - a) Conjunto Nebuloso Pessoas Altas Discretizado; b) Conjunto Nebuloso Erro de Altura Grande Discretizado.

$u = \text{erro_de_altitude};$

$T(u) = \text{pequeno, médio, grande};$

$U =$ erro (diferença) entre altitude desejada e altitude atual, medida em metros, com valores entre 0 e 3000 metros;

$G =$ os conjuntos obedecem a uma ordem crescente de *pequeno* para *grande*;

$M =$ *pequeno* significa que a aeronave está a uma altitude bem próxima da desejada; *médio* significa que a aeronave está relativamente próxima da altitude desejada; *grande* significa que a aeronave está bem distante da altitude desejada.

c) MODIFICADORES

Os termos associados aos subconjuntos podem ser modificados em seu significado alterando-se a forma da função de pertinência do conjunto por meio de operações matemáticas em seus valores. Isto é feito através de *modificadores (hedges, em inglês)* colocados antes do termo, equivalentes a advérbios na linguagem falada. Os modificadores mais comuns são: *muito, pouco, mais ou menos, não, extremamente e ligeiramente*. Dessa forma, para o conjunto *erro de altitude grande*, pode-se determinar os conjuntos nebulosos *muito grande, ligeiramente grande, mais ou menos grande*, e assim por diante. A alteração na forma desse conjunto provocada pelos modificadores pode ser vista na figura 2.3.

Esses operadores de modificação são matematicamente definidos: o modificador *muito* intensifica as variáveis nebulosas elevando o valor da função de pertinência ao quadrado; o modificador *extremamente* é usado com valores da função de pertinência ao cubo. Esses modificadores realizam um estreitamento na forma da função, definido como *concentração*.

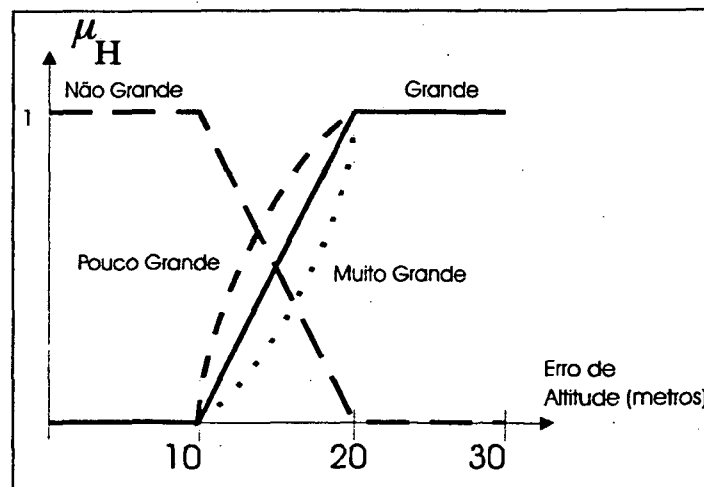


Fig. 2.3 - Modificadores Aplicados ao Conjunto Nebuloso Erro de Altitude Grande

Modificadores				
Concentração		Dilatação		Não $(1 - \mu_A)$
Muito	$(\mu_A)^2$	Pouco	$(\mu_A)^{1/2}$	
Extremamente	$(\mu_A)^3$	Ligeiramente	$(\mu_A)^{1/3}$	

Fig. 2.4 - Resumo dos Modificadores mais Comuns

O modificador *pouco*, por outro lado, alarga a forma da função de pertinência, tomando a raiz quadrada dos valores. Este tipo de operação é chamada *dilatação*. O modificador *não* é o complemento do valor da função [Zadeh 73], [Zadeh 84], [Berardenis 92]. Um resumo dos modificadores aqui descritos pode ser visto na figura 2.4.

2.3 SISTEMA DE REGRAS DE PRODUÇÃO

Uma forma usual de modelar a tomada de decisões humana é através de um conjunto de regras, com condições e ações associadas.

Quando variáveis linguísticas são utilizadas como antecedentes (onde estão agrupadas declarações a respeito das variáveis de entrada ligadas por conectivos lógicos 'e' e 'ou') e conseqüentes (onde está indicado o valor da saída associado a essa combinação de declarações no antecedente) de uma regra, está sendo estabelecida uma relação entre os universos de discurso dessas variáveis.

O conhecimento do especialista, expresso por um conjunto de regras, pode ser representado por uma tabela de regras ou por uma matriz de relação [Aliev et al 91]. Essas representações são descritas a seguir, em particular para o exemplo a seguir.

Ex. 2.4: Conjunto de regras para controle da altitude do helicóptero:

- SE erro_de_altitude é pequeno ENTÃO comando_coletivo é pequeno;
- SE erro_de_altitude é médio ENTÃO comando_coletivo é médio;
- SE erro_de_altitude é grande ENTÃO comando_coletivo é grande.

2.3.1 TABELA DE REGRAS LINGÜÍSTICAS

Uma forma prática de representar um conjunto de regras que utilizam as mesmas variáveis é uma tabela de regras. Nesta tabela as colunas e linhas são as declarações nos antecedentes das regras, enquanto os elementos que formam a tabela são as saídas correspondes

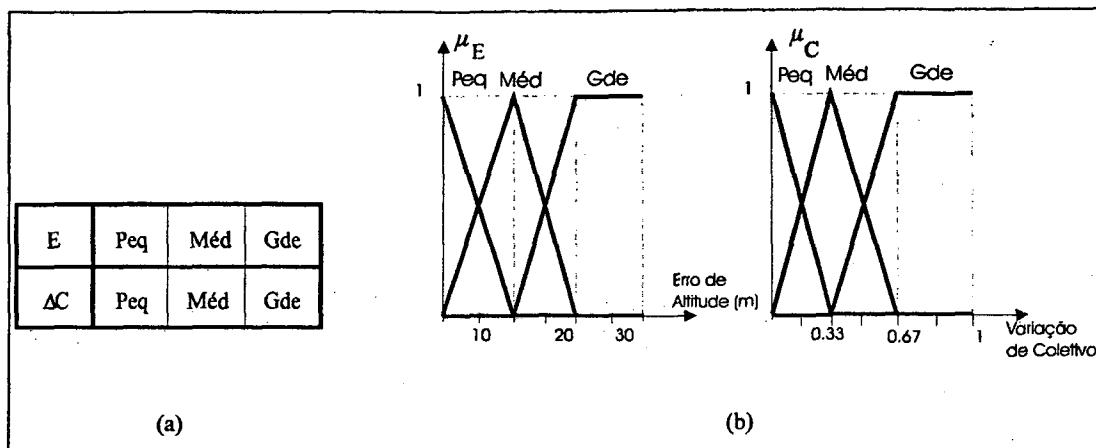


Fig. 2.5 - Tabela de Busca e Conjuntos Nebulosos para o Conjunto de Regras do Exemplo 2.4

a cada combinação desses antecedentes. Essa tabela também é chamada tabela de decisão ou tabela de busca [Rutherford and Bloore 76].

O tamanho da tabela depende do número de variáveis e do número de conjuntos por variável. O formato da tabela para o conjunto de regras do exemplo 2.4 é mostrado na figura 2.5a, onde E é o erro de altitude, ΔC é a variação do comando coletivo a ser aplicado no helicóptero e Peq , $Méd$ e Gde são os conjuntos nebulosos mostrados na figura 2.5b.

É importante salientar que cada elemento da tabela corresponde a uma regra. Assim, se não houver sido declarada uma regra para uma condição das variáveis de entrada, o elemento da tabela será indefinido, podendo ser utilizado, se necessário, um valor padrão ou um dos valores mais próximos. Se houver mais que uma regra para a mesma condição, o elemento da tabela terá mais que um valor possível, sendo utilizado algum critério, técnico ou econômico, para escolher um entre os valores possíveis [Braae and Rutherford 79b], [Aliev et al 91].

2.3.2 MATRIZ RELAÇÃO

Seja uma regra de inferência que utiliza dados na forma de variáveis linguísticas e conjuntos nebulosos, como a do exemplo 2.4:

SE erro_de_altitude é grande ENTÃO comando_coletivo é grande,

onde *erro_de_altitude* e *comando_coletivo* são variáveis linguísticas e os conjuntos associados *pequeno*, *médio* e *grande* são os da figura 2.5b, cuja discretização está representada na figura 2.6.

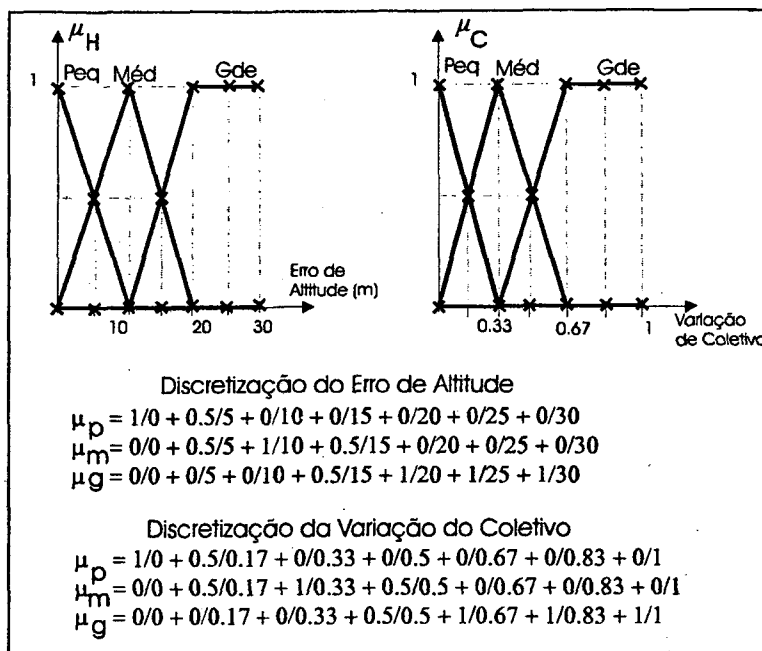


Fig. 2.6 - Conjuntos Nebulosos de Erro de Altitude e de Variação de Coletivo, com Discretização

Esta regra expressa uma relação nebulosa entre o erro de altitude de um helicóptero (variável de entrada) e o comando coletivo a ser aplicado (variável de saída):

$$R_3 = 0.5 \begin{array}{c|cccccccc} & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 1 & 1 & 1 \end{array}$$

Como se pode ver, a relação nebulosa é uma definição numérica precisa da implicação existente em uma regra, sendo que ela relaciona numericamente os conjuntos nebulosos associados ao antecedente e ao conseqüente da regra. Um conjunto de regras gera um conjunto de relações que, unidas, geram uma relação composta que expressa a estratégia de controle correspondente ao conjunto de regras [Aliev et al 91], [Kickert 79]. A união das relações das três regras do exemplo 2.4, compõe uma relação equivalente ao conjunto de regras mostrado no exemplo. Utilizando a função máximo como operador de união, temos:

$$R_u = \begin{vmatrix} 1 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 1 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5 & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}$$

As relações compostas são obtidas a partir das regras, dos conjuntos nebulosos e de uma *função de implicação* nebulosa, que não é unicamente definida, existindo aproximadamente quarenta funções de implicação nebulosa propostas na literatura [Lee 90a], [Mizumoto and Zimmermann 82], [von Altrock et al 92]. As mais freqüentemente adotadas em controladores nebulosos são [Lee 90b]:

- a função mínimo $\mu_T = \mu_a \wedge \mu_b$, onde \wedge é o operador mínimo, e μ_a e μ_b são os valores das funções de pertinência do antecedente e do conseqüente da regras, respectivamente e μ_T é o valor do elemento da matriz relação;
- a função produto $\mu_T = \mu_a \cdot \mu_b$, onde \cdot representa o produto de coeficientes.

Em [Tong 76] é demonstrado que, embora uma modificação no número de conjuntos por variável altere o tamanho da relação R, não ocorrem mudanças no seu resultado. O número de conjuntos, seus níveis de discretização e intervalo de amostragem não afetam a estrutura linguística do algoritmo, não alterando o resultado da relação R na malha de controle.

Uma vez definida a relação R entre dois universos de discurso, por exemplo *erro_de_altitude* e *comando_coletivo*, pode-se inferir um conjunto conseqüente do comando coletivo dado um conjunto antecedente do erro de altura da aeronave, utilizando a *função de composição* [Zadeh 73], [Aliev 91]. Essa função também não é unicamente definida, as mais usadas sendo sup-mín e sup-prod. O uso da função de composição sup-mín foi mostrado no cálculo da matriz R₃.

2.3.3 INFERÊNCIA DAS REGRAS NEBULOSAS

A inferência das regras nebulosas é realizada sempre à frente, já que os antecedentes e os consequentes das regras são explicitamente definidos.

Após a classificação das variáveis nos conjuntos nebulosos, as regras são avaliadas, utilizando a função de implicação para a atribuição do peso da declaração no conseqüente de cada regra. A função de implicação é aplicada as declarações no antecedente da regra.

Quando mais que uma regra possui uma mesma atribuição no conseqüente, a função de composição é responsável por determinar qual peso deve ser dado a essa declaração.

Na figura 2.7 é mostrado um exemplo de inferência de regras nebulosas. Três regras são avaliadas, a classificação nos conjuntos das variáveis de entrada sendo mostrada abaixo do

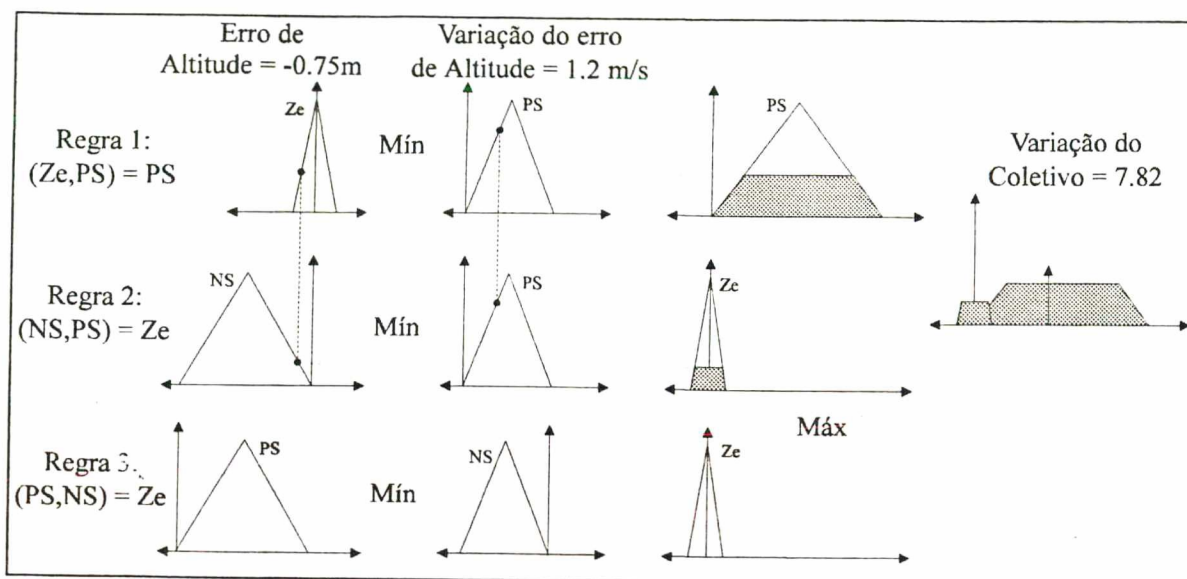


Fig. 2.7 - Exemplo de inferência de regras nebulosas

nome e do valor da variável. A função de implicação aqui utilizada é o mínimo, e a função de composição é o máximo.

A figura formada pelas saídas das regras inferidas é convertida no valor de atuação através do método do centro de massa.

2.4 MODELAGEM NEBULOSA

Ainda existem muitas dificuldades em aplicar os métodos de modelagem existentes a muitos sistemas reais complexos, com características não lineares ou variantes no tempo. Entre elas, pode-se citar:

- existem processos que não podem ser expressos na forma de equações diferenciais, convencionalmente usadas em modelagem [Pedrycz 81];

- os modelos matemáticos de sistemas físicos não podem ser considerados como exatos e precisos. A solução ótima é obtida para um modelo nominal, geralmente com a adição de um critério que prevê um possível desvio desse modelo nominal, mas de maneira finita [Chang and Zadeh 72];

- para o controle de sistemas físicos com incerteza, geralmente é desejável obter um controle robusto. Quanto mais essas incertezas se fizerem presentes durante o projeto do controlador, melhor deverá ser a característica de robustez do controle [Chang and Zadeh 72].

Uma das abordagens que permite superar essas dificuldades é usar o modelo nebuloso do processo para descrever seu comportamento estático e/ou dinâmico e nele fundamentar o projeto do controlador.

O modelo nebuloso de um sistema consiste de um grupo finito de implicações nebulosas (regras linguísticas ou relação) que juntas formam um algoritmo para determinar as saídas do processo, baseado em um número finito de entradas e saídas passadas [Tong 78].

A seguir, são descritos alguns métodos de identificação do modelo nebuloso, bem como estudos sobre a análise de estabilidade. Após isso, é mostrada a aplicação do modelo nebuloso em controladores nebulosos adaptativos.

2.4.1 IDENTIFICAÇÃO DE MODELO NEBULOSO

Várias situações podem ser encontradas a partir das quais pode-se derivar um modelo nebuloso:

- existência de uma descrição linguística que reflita uma compreensão qualitativa do processo. Nesse caso, um grupo de regras linguísticas pode ser construído diretamente;
- equações conhecidas que descrevam (ao menos de maneira geral) o comportamento do processo, mas seus parâmetros não podem ser precisamente identificados;
- equações muito complexas que modelem o processo, e interpretadas de maneira nebulosa para construir um grupo de regras linguísticas;
- dados experimentais de entrada/saída do processo usados para estimar o comportamento nebuloso do mesmo [Aliev et al 91].

Para construir um modelo é necessário dispor de uma ferramenta matemática que expresse esse modelo [Takagi and Sugeno 85]. No caso do modelo nebuloso, essa ferramenta pode ser uma tabela de regras linguísticas ou de uma matriz de relação nebulosa. Dependendo da situação, uma forma pode ser mais fácil de utilizar que a outra, existindo vários métodos de conversão entre elas [Kickert 79], [Czogala and Pedrycz 82a], [Cao et al 90].

a) TABELA DE REGRAS LINGUÍSTICAS

É resultado da utilização de métodos linguísticos de identificação. Em [Takagi and Sugeno 85], é proposto um método que consiste em utilizar regras de formato fixo, onde somente conectivos e lógico ligam as proposições antecedentes e que a proposição conseqüente é uma função linear das entradas do processo. A estrutura do modelo então seria:

$$\text{Se } x_1 = A_1 \text{ e } x_2 = A_2 \text{ e } \dots \text{ e } x_k = A_k \text{ então } y = f(x_1, x_2, \dots, x_k).$$

O algoritmo de identificação dos parâmetros consiste em:

- escolher uma combinação de variáveis de entrada para compor as proposições do antecedente;
- determinar as partições ótimas dos universos de discurso dessas variáveis e
- determinar os parâmetros ótimos da função linear conseqüente.

Os valores ótimos são estabelecidos a partir de um índice de desempenho, que mede o erro entre a saída do modelo e os dados de saída do processo real.

Em [Tong 78b], é proposto um método com três fases distintas:

- definição da classe dos modelos, que envolve a quantização dos espaços das variáveis nebulosas, a definição dos conjuntos nebulosos primários e a escolha da estrutura do modelo em termos de suas entradas e saídas;
- identificação das regras a partir dos dados de entrada/saída do sistema. Nesta fase são realizadas todas as combinações possíveis entre os conjuntos das variáveis de entrada e verificadas quais destas combinações melhor descrevem o comportamento exibido pelos dados de entrada/saída;
- testes da qualidade do modelo, medida por 3 índices: índice de complexidade, índice de precisão e índice de incerteza. É escolhido o modelo que melhor satisfaz as características consideradas relevantes, apontadas pelos índices.

b) MATRIZ RELAÇÃO.

É a solução, ou uma das soluções possíveis, da equação relacional

$$\text{saída} = \text{entrada} \circ R,$$

onde \circ é o operador composição.

Os algoritmos dos métodos de identificação que procuram resolver a equação relacional partem das amostras de entradas e saídas do sistema e tentam chegar a uma matriz relação R solução, entre as várias possíveis [Chang and Zadeh 72], [Tong 78a], [Higashi and Klir 84], [Moore and Harris 92], [Pedrycz81], [Togai and Wang 85], [Czogala and Pedrycz 82b], [Tong 80a], [Dubois and Prade 91], [Aliev et al 91], [Pedrycz 85].

Outros métodos tentam encontrar a matriz R através de análise da distribuição de possibilidade das amostras em conjuntos nebulosos de referência, que podem ser considerados como padrões com os quais as observações são comparadas. A relação entre os padrões e os dados é quantificada em distribuições de possibilidade que, de fato, definem a função de pertinência desses dados observados. As funções de pertinência associadas aos elementos do padrão são usadas para definir a matriz relação entre as entradas e saídas do processo [Xu and Lu 87],[Batur and Kasparian 91].

2.4.2 ANÁLISE DE ESTABILIDADE ATRAVÉS DE MODELO NEBULOSO

O estudo de estabilidade de um sistema através de seu modelo nebuloso pode ser feito de maneira algébrica ou de maneira linguística.

A análise de maneira algébrica consiste em aproximar o modelo nebuloso do sistema a um modelo algébrico não-linear, como uma função multinível (*multilevel relay*), por exemplo. Essa função é encontrada como uma relação ou ganho entre os estados das variáveis de entrada e das variáveis de saída correspondentes. Um modelo multinível para um sistema de duas entradas e uma saída pode ser visto na figura 2.8. Vê-se que a relação entrada/saída varia com o intervalo das variáveis de entrada.

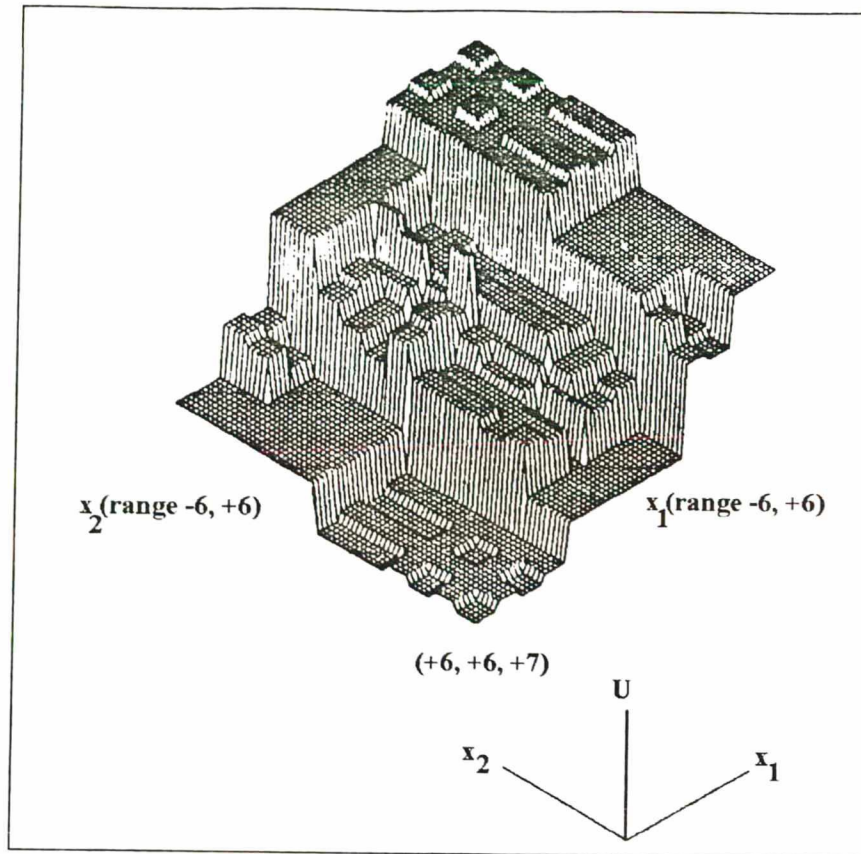


Fig. 2.8 - Modelo multinível de um sistema

A partir do modelo não linear, usa-se função descritiva [Braae and Rutherford 79b], [Ray and Majunder 84], critério do círculo [Ray et al 84] ou função de Lyapunov [Daley and Gill 85], [Gupta et al 86], [Tanaka and Sugeno 92] para estudar a estabilidade. Como nem sempre é possível obter o modelo do sistema, nem com aproximações, o uso de análise algébrica fica restrito a estudos teóricos ou para sugestões de valores dos parâmetros, no sentido de reduzir espaço de possibilidades por tentativa e erro [Braae and Rutherford 79a].

Alguns autores defendem a teoria de que, já que o sistema é incerto, a estabilidade pode ser considerada uma estabilidade não precisa (soft stability). Existiria um fator de inexatidão associado à estabilidade de um sistema [Tong 78a], [Tong 80a], [Gupta et al 86].

A análise linguística consiste em examinar as tabelas de busca do modelo nebuloso (item 2.4.1), verificando as condições em que taxa de variação da variável de entrada é igual a zero (estabilidade explícita) ou que esta taxa assume valores de sinais opostos em diferentes regras de maneira a se cancelarem (estabilidade implícita) [Braae and Rutherford 79b], [Kickert 79].

2.5 CONTROLADOR NEBULOSO

A origem do desenvolvimento da teoria de controle nebuloso em malha fechada baseia-se na consideração de que o operador humano em muitos casos oferece melhores resultados que um controlador automático, principalmente para sistemas complexos.

A estratégia de controle de um operador é formada por um conjunto de regras de decisão, cuja forma depende, essencialmente, do processo sob controle e da heurística utilizada. O controlador nebuloso então necessita de um procedimento que permita a conversão da estratégia de controle linguístico, baseada no conhecimento do especialista, em uma estratégia de controle automática [Lee 90a].

A literatura mostra que, na maior parte dos casos, os resultados obtidos com um controlador nebuloso são melhores que aqueles obtidos com os algoritmos de controle convencionais [Tang and Mulholland 87], [Li and Lau 89]. Em particular, a metodologia de controle nebuloso parece útil quando os processos são muito complexos para serem analisados pelas técnicas quantitativas convencionais ou quando as fontes de informação são julgadas não-precisas ou incertas. Assim, o controle por lógica nebulosa pode vir a ser uma aproximação entre o controle matemático preciso e a tomada de decisão humana.

Devido à simplicidade de implementação e ajuste e da não necessidade do modelo matemático preciso do processo, o controle nebuloso vem sendo mais e mais aplicado em vários campos (médico, industrial, etc.), qualquer que seja a complexidade do sistema.

No entanto a falta de metodologia para projeto e ajustes tornam essas tarefas muito dependentes da sensibilidade que o projetista possui a respeito do processo. Se este for muito complexo, as variáveis utilizadas no controlador podem dificultar o ajuste.

2.5.1 COMPONENTES DE UM CONTROLADOR NEBULOSO

A maior parte dos controladores desenvolvidos utilizam o esquema simples, representado na figura 2.9, proposto por Mandani [King and Mandani 77] para os sistemas monovariáveis. O

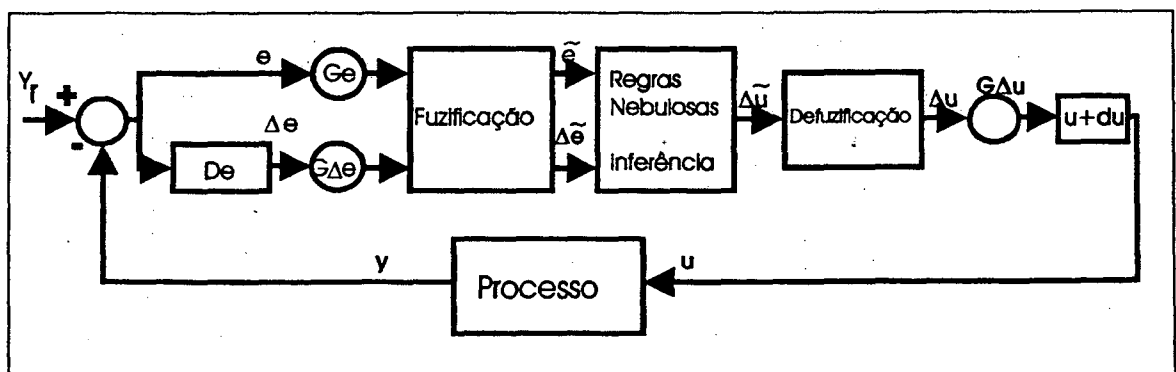


Fig. 2.9 - Esquema de Funcionamento de um Controlador Nebuloso

valor do controle correspondente a uma dada situação pode ser obtido seguindo as etapas [Ketata 92]:

- cálculo do erro atual ($E = Y_r - Y$) e sua variação (ΔE), onde Y é a saída do processo e Y_r é a referência que a saída deve alcançar ;
- multiplicação desses valores por ganhos GE e $G\Delta E$, se forem utilizados conjuntos normalizados;
- conversão dos valores obtidos de E e ΔE em variáveis nebulosas (níveis de quantificação), ou fuzificação;
- inferência das regras e obtenção do valor nebuloso da saída;
- multiplicação desse valor inferido por um ganho $G\Delta U$, se forem utilizados conjuntos normalizados;
- cálculo da entrada determinística para regular o processo, ou defuzificação.

A figura 2.10 mostra o mesmo controlador nebuloso mostrado na figura 2.9, enfatizando os blocos que o compõe e o tipo de dados (nebulosos ou não nebulosos) que cada bloco usa [Lee 90a], [Apronix 93]. Esses blocos são os seguintes:

- interface de fuzificação é responsável pela conversão dos dados de entrada (variáveis medidas no processo e que determinam seu estado) em valores linguísticos adequados (coeficientes de pertinência);
- base de conhecimento consiste na base de dados e na base de regras de controle. A base de dados fornece as definições necessárias para manipulação dos dados nebulosos. A base de regras caracteriza os objetivos e a política de controle por meio das regras de controle;
- lógica de tomada de decisões tem a capacidade de simular o comportamento humano na tomada de decisões e de inferir ações de controle utilizando as regras da base de regras;
- interface de defuzificação tem a função de extrair uma ação de controle determinística

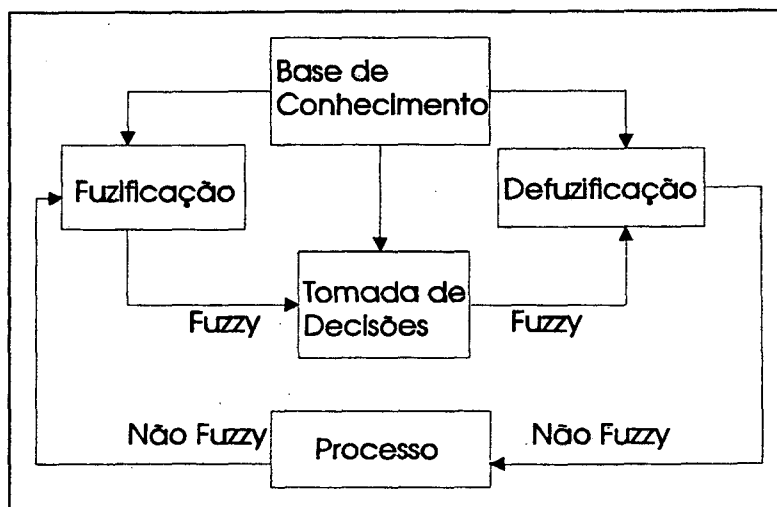


Fig. 2.10 - Componentes de um Controlador Nebuloso

(não nebulosa) inferida a partir das regras.

Cada um desses componentes possui parâmetros que devem ser determinados no momento do projeto, como veremos na próxima seção.

2.5.2 PROJETO DE UM CONTROLADOR NEBULOSO

Não existe uma metodologia sistemática para projeto de um controlador nebuloso, mas, de acordo com a estrutura do controlador mostrada na figura 2.10, geralmente é seguida a seguinte seqüência de passos [Self 90], [Bernard 88]:

- definir as variáveis de entrada e de saída do sistema;
- dividi-las em conjuntos nebulosos e estabelecer suas funções de pertinência;
- determinar as regras a serem utilizadas inicialmente e as regras de inferência;
- testar e ajustar o controlador.

Em cada um desses passos, existem parâmetros a serem estabelecidos ou ajustados de acordo com o que houver disponível sobre o sistema (modelo linguístico ou operador humano experiente).

a) VARIÁVEIS DE ENTRADA E SAÍDA [LEE 90A]

As variáveis de entrada e saída dependem do processo a ser controlado e das grandezas disponíveis para medição. A escolha deve considerar também as variáveis que o operador humano utiliza. As variáveis mais usadas são a saída do sistema, erro entre a saída desejada e a saída atual, taxa de variação do erro e somatório do erro. Em [Buckley 91], é proposto um controlador nebuloso que possui tanto variáveis de entrada e saída determinísticas (sensores e atuadores) quanto nebulosas, que caracterizariam uma iteração do controlador com um operador humano, quando a interferência deste for necessária.

b) DIVISÃO DOS UNIVERSOS DAS VARIÁVEIS EM SUBESPAÇOS

A escolha do número e forma das funções de pertinência para cada variável influi em quanto o sistema pode ser considerado incerto ou nebuloso. A divisão dos espaços das variáveis em subespaços está definida na tabela do modelo linguístico da planta, assim como o operador humano, na descrição do seu conhecimento, associa termos às variáveis. Cabe ao projetista escolher a função e a discretização dos conjuntos nebulosos correspondentes a cada subespaço, sendo que não há solução única e o método mais usado é o de tentativa e erro. Inicialmente, recomenda-se escolher um número ímpar de conjuntos, simétricos em relação ao zero, utilizando-se o menor número possível.

Ainda com relação à divisão do espaço das variáveis, existe a opção de definir conjuntos nebulosos primários normalizados, onde os valores das variáveis estão no intervalo $[-1,+1]$ e que são utilizados para todas as variáveis. Para ajustar o intervalo real de variação no valor de cada variável com o conjunto normalizado, é utilizado um fator de escala (linear ou não-linear). Um exemplo de normalização de um conjunto nebuloso é mostrado na figura 2.11.

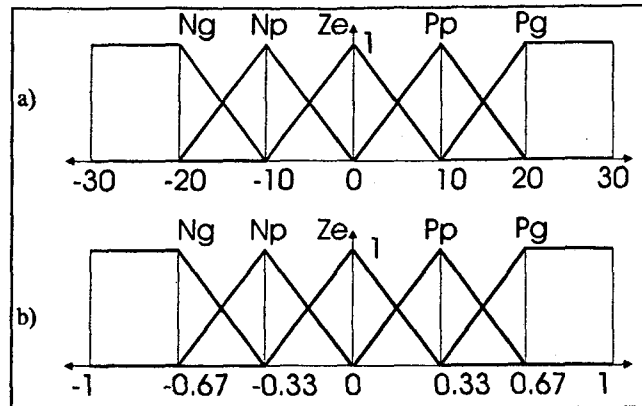


Fig. 2.11 - Normalização de um Conjunto Nebuloso. a) Conjunto Original; b) Conjunto Normalizado em relação ao Universo de Discurso

É preciso assegurar a **integridade** da base de dados, certificando-se que os universos de discurso dos conjuntos nebulosos cobrem toda a faixa de valores possíveis das variáveis.

c) DEFINIÇÃO DA FUNÇÃO DE PERTINÊNCIA DOS CONJUNTOS NEBULOSOS

Há duas maneiras de se definir a função de pertinência dos conjuntos nebulosos:

- método numérico, se o universo de discurso é discreto. Consiste em se representar a função de pertinência por um vetor cuja dimensão depende do grau de discretização do universo de discurso;

- método funcional, se o universo de discurso é contínuo. Expressa a função de pertinência por uma função contínua $\mu(u)$.

d) ESCOLHA DA ESTRATÉGIA DE FUZIFICAÇÃO

A estratégia de fuzificação tem um importante papel na manipulação de dados do controlador. Um operador de fuzificação converte um valor real em um conjunto unitário (*fuzzy singleton*), ou seja, um conjunto nebuloso que é 0 em todo o universo, a não ser no valor medido, onde o coeficiente de pertinência é 1 [Zadeh 73].

Se o valor a ser fuzificado está sujeito à incerteza (ruído), o operador de fuzificação deve converter esse dado probabilístico em um número nebuloso. Por fim, existem dados híbridos, que envolvem tanto incerteza quanto aleatoriedade. O operador de fuzificação deve usar o conceito de números híbridos para gerar conjuntos nebulosos para esses dados [Lee 90a].

e) ESCOLHA DA ESTRATÉGIA DE DEFUZIFICAÇÃO

É desejado que a estratégia de defuzificação produza uma ação de controle não-nebulosa que melhor represente a distribuição de possibilidade de uma ação de controle nebulosa inferida. As mais usadas e citadas na literatura são [Lee 90a]:

- critério máximo, ponto no qual a distribuição de possibilidade alcança o valor máximo;
- média dos máximos, valor médio de todas as ações locais cujas funções de pertinência alcançam o máximo e
- centro de área, que gera o centro de gravidade da distribuição de possibilidade de uma ação de controle.

Em [Lee 90a] são citados alguns trabalhos de análise destas estratégias de defuzificação que mostram que o centro de área é o método que permite obter melhores resultados, do ponto de vista de representar o raciocínio humano.

f) REGRAS DE CONTROLE

As regras de controle e o método de inferência formam a estratégia do controle. De acordo com o estado do sistema é derivada uma ação sobre o processo que o leva até a condição desejada. Estas regras podem ser estabelecidas a partir:

- da modelagem do controle feito por um operador experiente. Neste caso, o modelo do controle do operador pode ser encontrado com base na descrição das ações executadas por ele ou por observação de suas atitudes [Lee 90a] [Kickert and van Nauta Lemke 76], [Sugeno and Nishida 85], [Takagi and Sugeno 83], [Bernard 88];
- do modelo linguístico do sistema [Lee 90a], [Takagi and Sugeno 83]. Neste caso, utiliza-se a tabela de busca da planta (item 2.4.1), que é uma tabela onde consta a saída (nebulosa) do sistema para as diversas combinações das variáveis de entrada. Dependendo da resposta que se deseja do processo, monta-se a tabela de busca do comportamento desejado em malha fechada e, juntamente com a tabela da planta, deduz-se a tabela de busca do controlador. Este método é análogo ao de posicionamento de pólos no controle convencional [Braae and Rutherford 79b], [Takagi and Sugeno 83], [Aliev et al 91]. A partir de uma matriz relação expressando o modelo do sistema, pode ser calculada a matriz relação do controlador [Czogala and Pedrycz 82a], [Czogala and Pedrycz 82b], [Togai and Wang 85];
- de algoritmos de auto-aprendizagem, ou algoritmos que aprendem e alteram as próprias regras baseado na experiência. Essa experiência refere-se à atribuição de valores às entradas do processo e avaliação da respectiva resposta. Assim, os valores atribuídos às entradas geram as regras do modelo nebuloso do processo e os parâmetros dessas regras podem ser alterados na tentativa de se minimizar um índice de desempenho. Os controladores com esse tipo de características são chamados adaptativos ou auto-ajustáveis [Batur and Kasparian 91], [Moore and Harris 92], [van de Rhee et al 90]. Um controlador auto-ajustável típico é mostrado na figura 2.12. Mais detalhes sobre controladores adaptativos são vistos no item 2.5.3.

As regras de controle podem ser classificadas em dois tipos [Lee 90a]:

- avaliação do estado: deriva uma ação de controle como função do estado do processo;

- avaliação do objetivo: infere as ações de controle presentes e futuras avaliando os objetivos do controle. Este tipo de controle é chamado controle nebuloso preditivo e aplicações deste tipo de regra podem ser encontradas em [Zadeh 84] e [van de Rhee 90].

Um aspecto importante a considerar com relação ao projeto é o número de regras. A princípio, devem haver tantas regras quantas sejam necessárias para cobrir todas as combinações das variáveis e seus subconjuntos (*completeness*), de maneira que, em qualquer condição, exista uma regra dominante ou, no caso extremo, duas regras disparadas com igual peso. Mas a experiência do projetista pode reduzir tal número, se restringindo aos estados mais frequentes [Lee 90a],[Bernard 88].

Outras importantes propriedades das regras de controle a serem verificadas são a **consistência da base de regras** (é preciso minimizar a possibilidade de contradição) e a **interação** entre elas, controlada pela escolha da função de implicação e dos operadores de composição [Lee 90a].

g) MECANISMOS DE INFERÊNCIA

Os mecanismos de inferência empregados em um controlador nebuloso são geralmente muito mais simples que aqueles usados em um sistema especialista típico, já que os conseqüentes das regras não fazem parte dos antecedentes. A inferência à frente é geralmente usada, sendo o sistema de múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO) dividido em sub-bases de regras, cada uma delas compondo um sistema de múltiplas entradas e uma saída (MISO) [Lee 90b].

A definição da **função de implicação** altera o modo como as relações entre os antecedentes das regras de controle e entre os antecedentes e os conseqüentes dessas regras são inferidas. Existem várias funções de implicação definidas na literatura. A escolha de qual

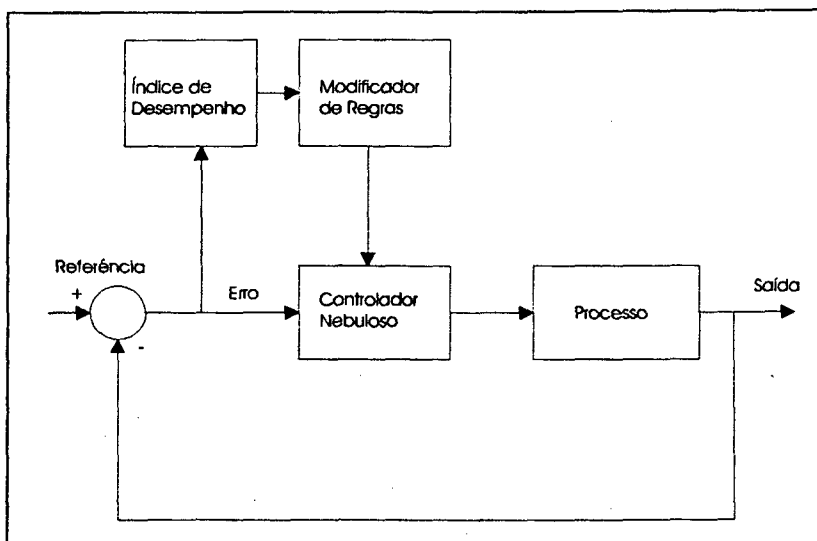


Fig. 2.12 - Controlador Adaptativo Típico

utilizar depende do sistema e do controle desejado. Estudos comparativos tentam determinar a função que melhor reflita o significado linguístico da implicação [Mizumoto and Zimmermann 82], [Ruan and Kerre 93], [von Altrock et al 92]. A função de implicação mais simples é a proposta por Mandani (min-max) onde é escolhido o mínimo coeficiente entre os antecedentes (operador lógico nebuloso AND), sendo que este coeficiente é atribuído a todos os consequentes da regra.

A definição do **operador composicional** relaciona-se com o modo como as diferentes regras serão compostas para gerar um único conjunto nebuloso. Em geral o operador composição pode ser expresso como uma composição sup-star, onde 'star' significa um operador, como mínimo, produto ou outro, a ser escolhido pelo projetista [Lee 90b], [Zadeh 73], [Aliev et al 91].

h) AJUSTES

Ajustar o sistema é fornecer a forma e a localização ótimas para as funções de pertinência e o melhor conjunto de regras. Este passo no projeto ocorre durante a fase de simulação [Togai 92], [Bernard 88], [Braae and Rutherford 79a].

Um controlador nebuloso pode ser ajustado de três maneiras diferentes [King and Mandani-77]:

- modificando as regras de controle;
- modificando o universo de discurso e alterando os níveis de discretização;
- alterando o conjunto suporte dos conjuntos nebulosos (ampliando, reduzindo ou deslocando).

Neste último caso, a forma da função de pertinência é menos importante que sua superposição com outras funções, já que esta última é que determina as características de transição entre as funções e portanto entre regras ativas [Self 90]. [Krhöling 94] sugere uma superposição inicial de 10% a 50% do espaço do conjunto nebuloso, e, na literatura são usualmente adotadas superposições de 25%.

Segundo [Tong 76] uma alteração no número de conjuntos, nos níveis de discretização e no intervalo de amostragem não altera significativamente o desempenho do sistema em malha fechada. [Tong 76] indica ainda a modificação de regras como o método mais eficaz de alterar o desempenho de sistema.

2.5.3 CONTROLADORES NEBULOSOS ADAPTATIVOS

Os controladores nebulosos adaptativos baseados em modelo nebuloso calculam o modelo do sistema on-line, recalculando então, a cada iteração, o algoritmo de controle [Xu and Lu 87], [Moore and Harris 92]. Esses controladores são chamados *controladores nebulosos adaptativos indiretos*.

Já os controladores auto-ajustáveis alteram seus parâmetros (fatores de escala, conjuntos nebulosos, regras e estratégia de defuzificação) como consequência da avaliação de um índice de desempenho [Aliev 91], [Daley and Gill 86], [Daley and Gill 87], [Batur and Kasparian 91], [Pappis and Mandani 79], [Shao88]. Esses controladores, por sua vez, são chamados de *controladores nebulosos adaptativos diretos*.

Em [van de Rhee 90], é sugerido um algoritmo que consiste de uma fase para construir o modelo do sistema e uma fase para controlá-lo. Ambas as fases utilizam-se de uma estrutura de conhecimento, onde são armazenadas as respostas no tempo do processo a entradas conhecidas. A primeira etapa constrói um modelo do sistema, preenchendo essa base de conhecimento. É utilizado um sinal de aprendizagem conhecido durante essa fase. A segunda fase controla o processo, usando avaliação do objetivo (item 2.5.2.f) para inferir a entrada que leva o sistema à saída desejada. Várias medidas de desempenho, precisão e rapidez de convergência para uma referência desejada são feitas durante este segundo estágio com o objetivo de saber quão bem a base de conhecimento representa o processo. Se o modelo não estiver bem construído, pode-se voltar a primeira fase com um novo sinal de aprendizagem ou interpretar a base de conhecimento de maneira vaga, utilizando conjuntos nebulosos para comparação entre a base armazenada e os valores desejados.

2.6 CONCLUSÕES

O uso de lógica nebulosa em sistema baseados em regras em controle de processos está se mostrando uma ferramenta útil quando se lida com sistema complexos e de difícil modelagem.

Um grande número de aplicações tem surgido recentemente, bem como estão sendo feitas pesquisas no sentido de ligar a teoria de controle convencional ao controle nebuloso. Técnicas de projeto também têm sido pesquisadas, sem muito resultado, dada a versatilidade do controle nebuloso.

Neste capítulo foi apresentada a lógica nebulosa como um meio de modelar o raciocínio humano considerando aspectos de imprecisão e incertezas. Foram mostrados os conceitos de lógica nebulosa, como conjuntos nebulosos, variáveis linguísticas, regras de controle e mecanismos de inferência.

Foi apresentada a modelagem de sistemas complexos utilizando modelos nebulosos e o uso desses modelos para analisar a estabilidade desses sistemas. A estrutura básica de um controlador nebuloso foi descrito e foram mostrados métodos de projeto baseados no operador e no modelo nebuloso do sistema.

O uso de controle nebuloso no sistema de navegação de helicóptero sugerido neste trabalho é desenvolvido a partir do próximo capítulo.

CAPÍTULO 3

ESTRUTURAÇÃO DO SISTEMA DE NAVEGAÇÃO

Este capítulo tem por objetivo mostrar as etapas de estruturação do sistema de navegação do helicóptero não tripulado desenvolvido pela Gyron Tecnologia, descrito no capítulo 1.

O objetivo deste sistema de navegação automático é substituir o piloto por um operador menos treinado no controle da aeronave, cumprindo missões como inspeção aérea de linhas de transmissão. Tais missões consistem em ordens ao helicóptero, com a função de conduzi-lo a uma posição ou movimento especificado. Por exemplo, para verificar uma linha de transmissão, o helicóptero deve inicialmente pairar a 5m do solo, sobre um dado ponto de coordenadas (x,y), e então percorrer um trecho de linha com uma velocidade de aproximadamente 10 m/s.

Para reproduzir a habilidade do piloto na condução do helicóptero, é proposto um sistema especialista baseado em regras utilizando lógica nebulosa. Como o centro de um sistema especialista é a base de conhecimento nele embutida, inicialmente é apresentado como é realizada a captura de conhecimento do operador, em particular como foi realizada neste trabalho. Finalmente, é descrita a estruturação do sistema de navegação em camadas hierárquicas.

3.1 CAPTURA DE CONHECIMENTO

A aquisição de conhecimento é um estágio crucial no desenvolvimento de um sistema especialista, apesar de não existirem métodos automáticos para fazê-lo, exceto para sistemas muito simples. Na verdade, até mesmo o termo aquisição de conhecimento não possui significado único. Em [Watermann 86], aquisição de conhecimento consiste em adquirir conhecimento de várias fontes possíveis, tais como livros textos, relatórios, base de dados, estudos de casos, dados empíricos e experiência pessoal. Mas a fonte dominante ainda é o especialista na área do domínio. Em [Kidd 87], aquisição de conhecimento é o processo de eliciar, analisar e interpretar o conhecimento que um especialista humano usa quando soluciona um problema particular e a transformação desse conhecimento em uma representação adequada. Já em [Hickman et al 89], aquisição de conhecimento consiste na coleta de conhecimento junto a quaisquer fontes, enquanto eliciar o conhecimento trata especificamente de obter conhecimento de um especialista por meio de entrevista. A organização desse montante de informações em uma forma adequada ao uso por um programa de computador é chamado gerenciamento do conhecimento. O processo de captura do conhecimento corresponde a adquirir, eliciar e gerenciar o conhecimento.

Daqui por diante, salvo se explicitado em contrário, o termo aquisição de conhecimento diz respeito a captura do conhecimento, conforme definido em [Hickman et al 89]. Esta última definição é utilizada por ser mais abrangente, envolvendo desde a etapa de pesquisa inicial utilizando a bibliografia até a estruturação de todo o conhecimento adquirido.

O processo de captura do conhecimento (fases de adquirir, eliciar e gerenciar o conhecimento) é multidisciplinar, pois é necessário considerar os diferentes aspectos envolvidos em cada uma das etapas. Assim, a psicologia trata a forma de abordar o ser humano, os métodos de entrevistá-lo e obter sua cooperação na fase de eliciar o conhecimento. A psicolinguística, que trata das relações entre pensamento e linguagem, fornece métodos para análise de texto ou relato, facilitando a compreensão do conhecimento do especialista [Scliar-Cabral 91].

A engenharia de conhecimento trata do processo de construir sistemas especialistas, sendo engenheiro de conhecimento o profissional que deve entrevistar os especialistas, organizar o conhecimento adquirido, decidir como representá-lo e auxiliar os programadores na codificação [Weiss and Kulikowski 84]. A interação entre o engenheiro de conhecimento e o especialista geralmente consiste de uma série prolongada de intensas e sistemáticas entrevistas. Durante estas entrevistas o engenheiro de conhecimento apresenta ao especialista problemas reais, que constituem o tipo de problema que o sistema especialista pretende resolver. Uma representação gráfica dessa interação é mostrada na figura 3.1.

Quando na elaboração da base de conhecimento de um sistema especialista, pode-se identificar os seguintes pontos a serem considerados no processo de captura do conhecimento [Hickman et al 89].

1. Identificação do(s) especialista(s) no domínio do problema.
2. Motivação do(s) especialista(s) para cooperar.
3. Disponibilidade do(s) especialista(s) para as seções de entrevistas.
4. Sequenciamento das entrevistas em fases, que tratam de assuntos diferentes. Uma nova fase só começa após o término da fase anterior.
5. Determinação do nível de compreensão do domínio que o engenheiro de conhecimento vai adquirir.
6. Identificação das prioridades entre as diversas fontes de pesquisa. Um ponto importante na modelagem do conhecimento é que esta é baseada pragmaticamente na experiência do mundo real. Nenhum livro texto pode atualmente englobar a habilidade envolvida na execução de uma tarefa por um especialista.
7. Natureza e composição da equipe de entrevista.
8. Utilização de equipamentos de gravação (áudio e vídeo) nas entrevistas.

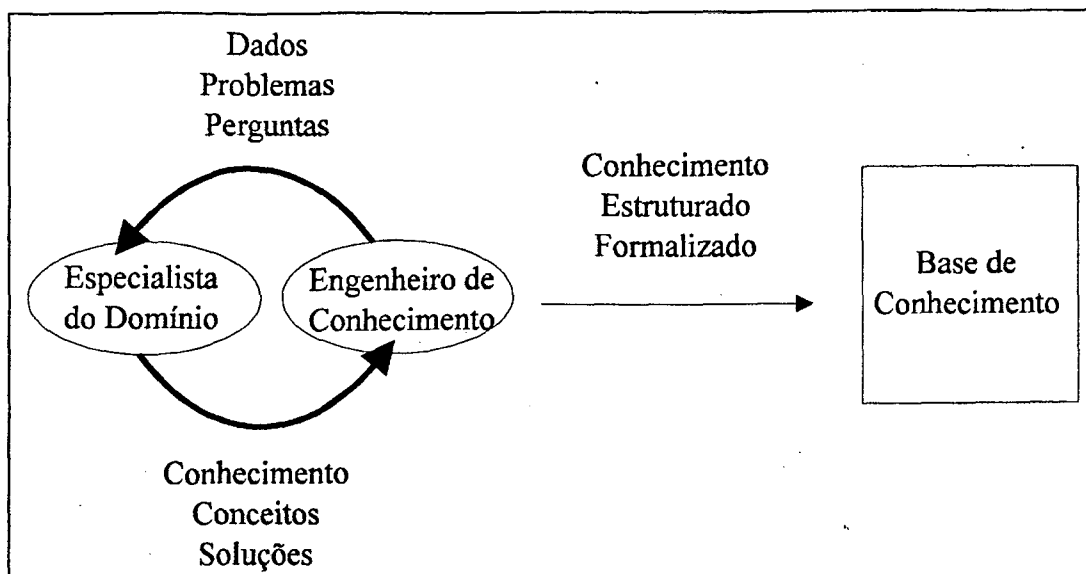


Fig. 3.1 - Processo de aquisição de conhecimento

A obtenção do conhecimento de um especialista por meio de entrevista pode se dar, segundo [Bernard 88] e [Waterman 86], através de:

- observação do especialista solucionando problemas reais;
- descrição, por parte do especialista, da resolução de problemas reais;
- questionamento e discussão sobre a base de conhecimento projetada;
- validação da base de conhecimento projetada por outros especialistas da área.

Em [Olson and Rueter 87], são mostrados métodos de aquisição de conhecimento classificados como diretos e indiretos. Os métodos diretos consistem em perguntar ao especialista como ele procede, ou observá-lo em ação. Já os métodos indiretos solicitam do especialista a execução de tarefas de classificação e estruturação do conhecimento.

Os métodos diretos permitem que se capture qualquer informação vinda do especialista. Entretanto, nem sempre este consegue dizer o que sabe ou como resolve um problema particular.

Os métodos indiretos, por sua vez, são mais limitados no conhecimento que eles podem fornecer, porém, podem revelar aspectos do conhecimento inacessíveis por entrevistas ou observações. Devido às características destes dois métodos, é interessante sua utilização conjunta.

São também sugeridas formas de eliciação de informações incertas ou imprecisas através de questionários (método direto). Estes questionários possuem escalas graduadas que solicitam do especialista a definição do grau de incerteza envolvida nas suas afirmações, assim como a imprecisão de valores atribuídos a um objeto [Olson and Rueter 87].

3.1.1 AQUISIÇÃO DE CONHECIMENTO UTILIZADA NESTE TRABALHO

A aquisição de conhecimento sobre pilotagem de helicóptero se dá através de livros, manuais e simuladores, mas principalmente através das experiências de pilotos.

Neste trabalho, o processo de aquisição de conhecimento foi realizado junto a equipe da Gyron Tecnologia. Esta equipe é composta de um piloto e dois especialistas em modelo matemático de helicóptero, estando disponível também uma extensa bibliografia.

Desde o início do trabalho ficou clara a necessidade de familiarização com os termos utilizados na área de pilotagem e com as reações da aeronave aos comandos utilizados pelo piloto. Para isto, tornou-se fundamental algum conhecimento básico da teoria de helicópteros. Esta primeira etapa envolveu o estudo, em livros e revistas especializadas, sobre aerodinâmica, comandos do helicóptero e métodos de pilotagem, e contou com a colaboração da equipe da Gyron Tecnologia. Vale ressaltar que o objetivo desta etapa não foi substituir o piloto, mas adquirir uma linguagem comum a fim de permitir o diálogo com os peritos na área.

Na segunda etapa foram feitas observações na ação do piloto de manobrar a aeronave. Não puderam ser feitas aquisições dos valores dos sensores e atuações correspondentes, como em [Bernard 88], sendo verificada apenas a forma qualitativa de atuação.

Após essas observações foram realizadas entrevistas com os especialistas em modelo matemático. Estes especialistas realizaram durante 7 meses entrevistas com o piloto e observaram sua atuação em diversas ocasiões, com o objetivo de implementar um simulador.

Essas entrevistas possibilitaram a estruturação do sistema de navegação e o projeto inicial da base de conhecimento do controlador nebuloso. As regras foram projetadas baseadas na atuação do piloto diante de um erro de posição ou atitude do helicóptero. Os conjuntos foram construídos tomando por base uma classificação de valores baseada na observação do piloto e na opinião dos especialistas.

Ao final de cada etapa do projeto da base de conhecimento eram realizadas discussões para fim de validação.

3.2 ESTRUTURAÇÃO DO SISTEMA DE NAVEGAÇÃO

No projeto de um sistema automático, a estruturação tem o importante papel de preservar a legibilidade e promover a reutilização dos blocos que compõem o sistema como um todo. A estruturação de um sistema automático assegura também a versatilidade e a independência entre os blocos.

Em [Raju et al 91], é mostrado um controlador onde as regras estão estruturadas de modo hierárquico, agrupadas em níveis. Um número fixo de variáveis é testado em cada nível e uma saída aproximada é determinada. Esta estrutura reduz substancialmente a quantidade de regras necessárias para cobrir todo o universo de discurso.

Um grupo de pesquisa liderado pelo professor Michio Sugeno no Tokyo Institute of Technology (TIT) está envolvido desde 1989 com projetos de pesquisa do uso de controle nebuloso aplicado em helicópteros [Schwartz and Klir 92], [Kahaner and Schwartz 91], [Kahaner 92], [Sugeno et al 93]. O controlador foi implementado com uma estrutura hierárquica com três principais níveis. No nível mais alto, o sistema de navegação recebe os comando do operador, bem como os valores dos sensores que indicam o atual estado de vôo. Este nível é responsável por gerenciar os diferentes modos de vôo, realizando uma transição suave de um modo a outro.

O nível de navegação é composto por dois sistemas: um possui as regras que estabelecem como levar o helicóptero ao estado desejado e o outro possui as regras que compensam desvios causados por perturbações ou instabilidades.

O nível mais baixo, o estabilizador, consiste em blocos, onde cada bloco corresponde a um dos modos de vôo. Por exemplo, bloco de vôo à frente, bloco de vôo pairado, etc. O bloco é escolhido de acordo com a informação de qual o estado desejado. Em cada bloco, as entradas correspondem as quatro saídas de controle do nível de navegação.

3.2.1 ESTRUTURA PROPOSTA

Como foi apresentado na introdução, o sistema de navegação tem o objetivo de substituir o piloto do helicóptero por um operador menos treinado no uso dos comandos, de maneira a executar uma missão desejada.

Uma missão consiste de movimentos específicos da aeronave, como decolar, pairar ou voar a frente, por exemplo. Esses movimentos são aqui chamados de "tarefas", possuindo cada uma parâmetros que exprimem a condição desejada que o helicóptero deve alcançar. Assim, uma missão do helicóptero começa com a decolagem e acaba com o pouso, passando por diferentes condições de voo nesse ínterim.

Uma possível missão seria:

1. decolar até uma altura especificada;
2. modificar azimute para 40°, leste;
3. pairar por 10 minutos na posição (X,Y,Z);
4. pousar.

Onde cada item numerado constitui uma tarefa com parâmetros adequados para o movimento que essa tarefa especifica. Assim, a tarefa decolar possui como parâmetro a altura a ser alcançada a partir do chão, enquanto a tarefa pairar possui a posição espacial em que deve permanecer pairando e o tempo que deve permanecer assim.

Essa divisão da missão em tarefas segue a divisão natural efetuada pelo piloto. Dada uma missão, é necessário escolher as tarefas que ele executará para cumpri-la. Na execução de cada uma dessas tarefas, o piloto determina que controles utilizar e quais técnicas de pilotagem

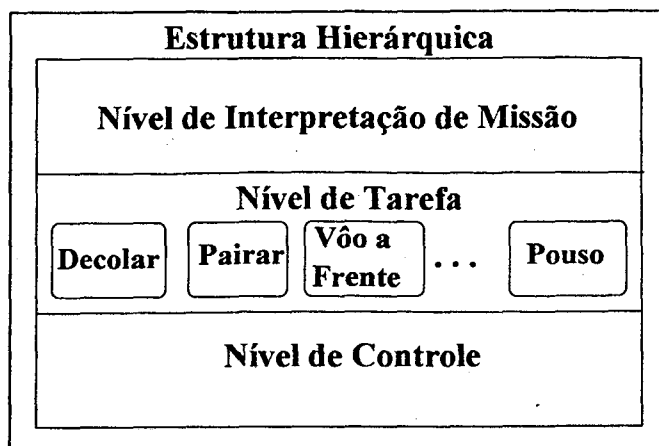


Fig. 3.2 - Estrutura hierárquica proposta

aplicar. A aplicação dessas técnicas controla a posição ou atitude do helicóptero, fazendo com que ele se mova como desejado.

Na estruturação do sistema de navegação, é necessário um nível que examine a missão e determine as tarefas necessárias para cumpri-la. Esse nível é chamado *Nível de Interpretação de Missão*, e é o mais alto da estrutura.

É necessário também um nível que execute as tarefas, escolhendo os comandos e a estratégia de controle a ser utilizada. Este é chamado *Nível de Execução de Tarefas* e está abaixo do nível de Interpretação de Missão.

Por último, é preciso um nível que seja responsável pela aplicação da estratégia de controle aos comandos do helicóptero. Este nível é chamado *Nível de Controle*, e compreende um algoritmo de controle da posição e atitude do helicóptero. Neste trabalho é proposto um controlador nebuloso para este nível.

A distribuição hierárquica desses níveis é mostrada na figura 3.2, sendo cada um deles descrito a seguir.

3.2.2 INTERPRETAÇÃO DA MISSÃO

O nível de interpretação da missão tem como função analisar a missão especificada, dividindo-a em tarefas a serem executadas individualmente e sequencialmente.

Este nível é o mais alto na estrutura hierárquica e não se atém aos controles do helicóptero, mas a comandos de alto nível. Esses comandos são escritos na ordem desejada de execução das tarefas.

Em versões futuras do sistema de navegação, esse nível se encarregará de, a partir da especificação de pontos no espaço por onde o helicóptero deve passar, gerar a missão da aeronave. A rota da aeronave pode ser determinada, por exemplo, em coordenadas espaciais, que determinam pontos de passagem obrigatória. A partir dessas coordenadas, esse nível gera as

tarefas e seus respectivos parâmetros, podendo considerar otimizações no espaço a percorrer, combustível gasto ou tempo de voo.

3.2.3 EXECUÇÃO DAS TAREFAS

O nível de execução de tarefas encarrega-se de executar as tarefas recebidas do nível de interpretação de missão, uma por vez.

Uma tarefa corresponde a um movimento específico do helicóptero, como por exemplo: decolar, pousar, voar a frente ou mudar o azimute. Conforme descrito anteriormente, uma tarefa possui parâmetros, ou valores de referência a serem alcançados.

A execução de uma tarefa deve considerar os seguintes aspectos:

- determinação da base de conhecimento que o controlador nebuloso (nível de controle) irá utilizar para executar o movimento especificado na tarefa;
- os acoplamentos existentes e, conseqüentemente, as correções a serem feitas para reduzi-los;
- o critério que determina a execução completa das atividades ligadas a tarefa (critério de estabilização).

Cada um desses aspectos é analisado a seguir.

BASE DE CONHECIMENTO

O nível de execução de tarefas deve determinar que base de conhecimento (variáveis, conjuntos e regras) o controlador nebuloso deve utilizar para alcançar o movimento desejado da tarefa. Sendo assim, cada tarefa possui uma base de conhecimento definida de acordo com o seu movimento.

O helicóptero possui quatro comandos, coletivo, de cauda, cíclico lateral e cíclico longitudinal, caracterizando-se como um sistema multivariável (MIMO). Como a atuação nesses comandos depende de variáveis independentes entre si, as regras de controle se dividem em quatro blocos com uma saída (um comando) cada. Essa divisão é mostrada na figura 3.3.

As variáveis que interferem na atuação dos comandos são fixas, independente do movimento desejado. Por exemplo, para o helicóptero subir ou descer, usa-se o controle coletivo. Esse controle só depende da altura da aeronave, tanto para subir como para descer.

Desse modo, os quatro blocos de regras possuem variáveis de entrada e variável de saída fixas. A forma de relacioná-las é que muda de acordo com o movimento, ou seja, com a tarefa. Existem, portanto, 2 blocos de regras do comando coletivo, um para pousar e outro para decolar; 2 blocos de regras do cíclico, um para pairar e outro para voar a frente, e assim por diante.

O nível de execução de tarefas é que escolhe qual bloco é ativado para ser utilizado pelo nível de controle.

Como essas regras e conjuntos são projetados a partir do conhecimento do piloto é mostrado no capítulo 4.

ACOPLAMENTOS

Um determinado movimento do helicóptero pode acarretar conseqüências em outros movimentos, conforme explicado no capítulo 1. Quando o nível de execução de tarefas determina os blocos ativos para executar o movimento desejado na tarefa, ele também determina os blocos que compensarão os acoplamentos, ativando-os.

É neste nível que deve ser fornecida a informação dos acoplamentos existentes.

ESTABILIDADE DA TAREFA

A tarefa correntemente sendo executada visa alcançar uma posição ou condição de vôo própria. Ao alcançar essa condição, a próxima tarefa estipulada pelo nível de interpretação de missão deve ser executada.

A maneira de determinar se o objetivo da tarefa foi alcançado deve ser função do erro entre o valor de referência e o valor atual da saída. A precisão desejada a partir das especificações também deve ser levada em consideração.

Bastaria, portanto, monitorar a saída e verificar que o erro entre a referência e a saída atual esteja dentro da precisão mínima especificada. O intervalo de tempo que se deve monitorar, porém, deve ser suficientemente longo para garantir que o regime permanente foi atingido, mas não tão grande que cause atrasos desnecessários ao início da execução da próxima tarefa.

Esse intervalo ótimo de monitoramento é função da rapidez de resposta do helicóptero a cada um de seus comandos. Neste trabalho, é utilizado o intervalo que o sistema leva para alcançar 36,8% do erro inicial, ou seja:

$$t = t_2 - t_1,$$

onde t é o intervalo de monitoramento; t_1 é o tempo de início da execução da tarefa; e t_2 é o tempo que o helicóptero atinge 36,8% do erro entre o valor de referência e o valor inicial da

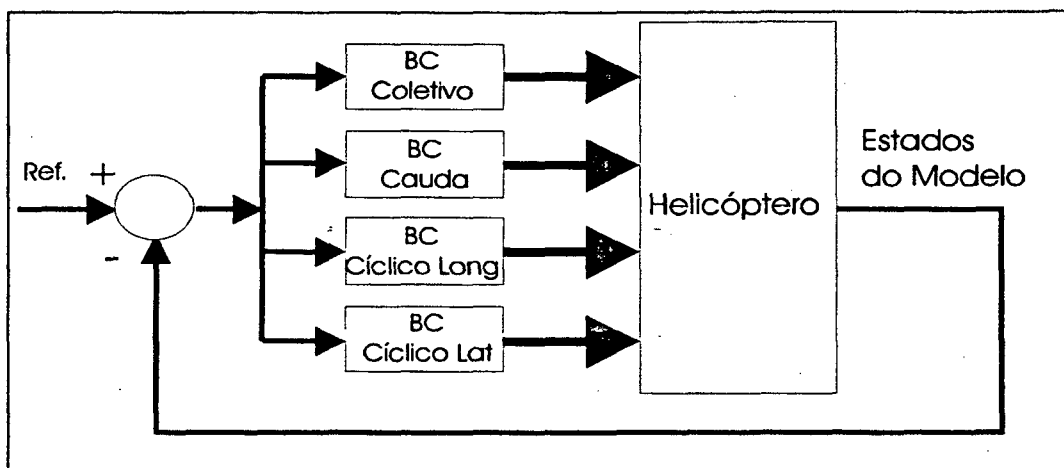


Fig. 3.3 - Divisão das regras de controle em blocos

variável controlada. Este intervalo de tempo corresponde à constante de tempo dominante do helicóptero [Ogata 82].

3.2.4 NÍVEL DE CONTROLE

O nível de controle consiste de um algoritmo de controle nebuloso que, a partir de uma base de conhecimento escolhida pelo nível de execução de tarefa, utiliza os controles do helicóptero para levá-lo a condição de voo desejada.

Esse controlador utiliza como variáveis de entrada os valores dos sensores e como variáveis de saída os valores inferidos dos controles do helicóptero. O algoritmo utilizado neste trabalho segue o descrito em [Viot 93], com a implementação adicional dos outros níveis do sistema de navegação.

A descrição do projeto do controlador nebuloso encontra-se no capítulo 4, bem como o projeto da base de conhecimento para as tarefas implementadas.

3.3 CONCLUSÕES

Este capítulo descreve a estruturação do sistema de navegação, desde a especificação através da aquisição do conhecimento específico da área até a sua divisão em níveis.

Esses níveis obedecem a ordem hierárquica de interpretar uma missão, executar as tarefas que compõe a missão e controlar a posição e atitude do helicóptero de acordo com a tarefa. São descritas as funções e operações de cada um desses níveis.

No nível inferior, nível de controle, foi utilizado um controlador nebuloso, cujo projeto é descrito detalhadamente no próximo capítulo.

CAPÍTULO 4

PROJETO DO CONTROLADOR NEBULOSO

O sistema de navegação está dividido em três níveis hierárquicos: nível de missão, nível de tarefa e nível de controle, conforme descrito no capítulo 3. O nível de controle tem como função levar o helicóptero ao estado desejado pela tarefa atualmente em execução. Neste nível está implementado o controlador nebuloso, assunto deste capítulo.

Conforme discutido no capítulo 2, o projeto de um controlador nebuloso consiste em escolher os mecanismos de inferência e determinar a base de conhecimento. A inferência diz respeito a como os dados e regras são manipulados para a obtenção do valor apropriado da saída e compreende os métodos de fuzificação e defuzificação e funções de implicação e composição. A base de conhecimento agrega o conhecimento do especialista, incorporando o objetivo do controle, e consiste em determinar as variáveis, conjuntos e regras.

Seguindo a estrutura hierárquica do sistema de navegação, é associada uma base de conhecimento do controlador nebuloso para cada tarefa, como mostrado na figura 4.1. A seguir é descrito, para cada base de conhecimento, as variáveis de entrada e saída, os conjuntos nebulosos e as regras utilizadas, assim como o objetivo da tarefa e a técnica utilizada para realizá-la. Inicialmente, são apresentados os mecanismos de inferência utilizados.

4.1 MECANISMOS DE INFERÊNCIA

O mecanismo de inferência do controlador nebuloso diz respeito ao procedimento de lidar com os valores de entrada (fuzificação), disparar as regras da base de conhecimento, considerar as incertezas (funções de implicação e composição) e cálculo do valor de saída (defuzificação), conforme descrito no capítulo 3.

Foi escolhida a função *mínimo* como implicação, onde o grau de verdade do conseqüente de uma regra ativa é o mínimo entre as funções de pertinência dos antecedentes. A função de composição é *máximo*, indicando que se regras com o mesmo conseqüente estão ativas simultaneamente, o máximo coeficiente de pertinência entre essas regras será usado para cálculo da saída defuzificada. Estas funções foram escolhidas devido a sua simplicidade e por serem as mais freqüentemente utilizadas na literatura [Viot 93], [Aliev et al 91], [Vachtsevanos 93], [Chiu et al 91].

As regras são orientadas a estado, por serem as mais simples e mais utilizadas em controladores nebulosos. Como as variáveis do conseqüente (variáveis de saída do controlador) não estão no antecedente de outras regras (no antecedente estão somente as variáveis de entrada do controlador), utiliza-se inferência a frente. Não existem níveis entre as regras: todas as regras da tarefa atual são avaliadas a cada iteração.

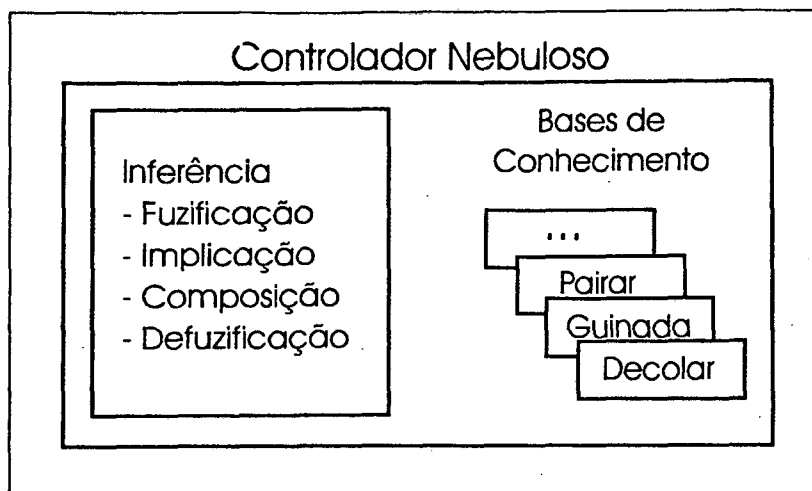


Fig. 4.1 - Estrutura do Controlador Nebuloso

O método de defuzificação utilizado é o centro de área, já que, como comentado no capítulo 2, esse método fornece o melhor valor não nebuloso equivalente a distribuição de possibilidade da saída inferida pelo controlador nebuloso.

O mecanismo de inferência aqui descrito é único, sendo utilizado para todas as tarefas.

4.2 BASE DE CONHECIMENTO

Como foi visto no capítulo 3, o Nível de Tarefa seleciona o bloco de regras que deve ser usado pelo controlador. Neste bloco são definidas as regras de controle, as variáveis de entrada e saída e os conjuntos nebulosos usados nestas regras.

O controlador, portanto, possui para cada tarefa executada atualmente, uma base de conhecimento independente com:

- as variáveis a serem controladas: variáveis de saída do controlador (comandos do helicóptero) que determinam o objetivo da tarefa;
- os conjuntos nebulosos associados às variáveis de entrada e saída;
- as regras que, considerando o erro entre a referência e a saída atual, comandam ações que corrijam esse erro.

Cada bloco foi projetado separadamente, levando em consideração o objetivo da tarefa e os acoplamentos existentes. A seguir é descrito o projeto da base de conhecimento das tarefas *Decolar*, *Guinada*, *Pairar*, *Vôo a Frente* e *Pousar*. No início de cada item é descrito o objetivo da tarefa e a técnica adquirida dos especialistas sobre como executá-la. Por fim, é apresentado como foram escolhidas as variáveis, conjuntos e regras, os acoplamentos considerados e a precisão utilizada para garantir a estabilidade da tarefa.

4.2.1 TAREFA DECOLAR

a) OBJETIVO E COMANDOS

A tarefa *Decolar* consiste em tirar o helicóptero do solo, fazendo-o subir até uma altitude (H_r) especificada em metros.

Para alterar a velocidade vertical do helicóptero, deve-se atuar no comando coletivo, aumentando-o para fazer a aeronave subir e diminuindo-o para fazê-la descer, conforme descrito no capítulo 1.

b) TÉCNICA DE PILOTAGEM

O piloto altera o comando coletivo aos poucos, de forma acumulativa e proporcional ao erro de altitude, quando este não é muito grande. Quando o erro de altitude é muito grande, o piloto altera o comando inversamente proporcional à velocidade vertical do helicóptero. Neste caso, o piloto tenta conduzir o helicóptero até a altitude desejada, com velocidade constante e que não seja muito grande nem muito pequena (média). Neste trabalho, chama-se esta velocidade de velocidade de aproximação de erro zero ou mais simplesmente, velocidade de aproximação.

c) VARIÁVEIS DE ENTRADA E SAÍDA

Acelerar o helicóptero para cima ou para baixo depende da altitude atual (h), ou mais especificamente, do erro de altitude (E_h), definido como:

$$E_h = H_r - h$$

e da variação do erro de altitude (ΔE_h), obtida derivando a equação acima:

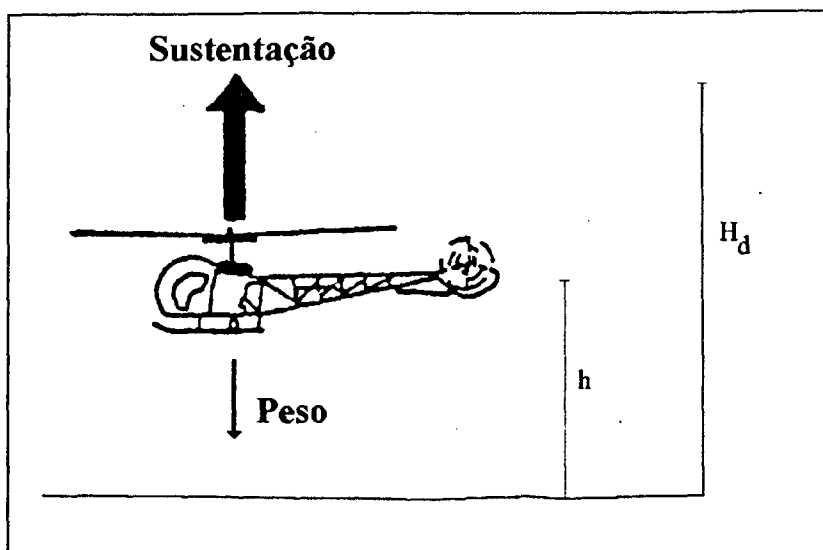


Fig. 4.2 - Decolagem do Helicóptero

$$\Delta E_h = -\Delta h = -V_z,$$

onde V_z é a velocidade vertical do helicóptero. A figura 4.2 apresenta a situação de decolagem do helicóptero, mostrando as variáveis envolvidas.

Assim o bloco coletivo da tarefa *Decolar* possui como variáveis de entrada o erro de altitude E_h e a variação de altitude ΔE_h . A variável de saída é a variação do comando coletivo, ΔC . Essa variação é integrada, após a defuzificação, para obter o comando a ser enviado ao modelo simulado do helicóptero. Isto é necessário porque a alavanca do coletivo possui uma posição de equilíbrio (Trim) variável com a altitude, que deve ser alcançada aos poucos. Essa integração, entretanto, possui a desvantagem de acrescentar retardo na resposta.

d) CONJUNTOS NEBULOSOS

Os conjuntos nebulosos associados às variáveis de entrada são em número de sete: *Negative Big*, *Negative Medium*, *Negative Small*, *Zero*, *Positive Small*, *Positive Medium* e *Positive Big*, simétricos em torno de zero. Esse número permite razoável versatilidade em troca de uma relativa complexidade na formulação das 49 regras necessárias para cobrir todo o espaço de valores das variáveis. O formato dos conjuntos é triangular, exceto os conjuntos *Big*, que possuem forma trapezoidal, conforme mostrado na figura 4.3.

O conjunto *Zero* do erro é estreito, e representa a tolerância aceitável da altitude alcançada pelo helicóptero. O conjunto *Zero* da velocidade do erro também é bem estreito, indicando junto com erro *Zero* o estado de estabilidade do sistema.

O conjunto *Small* do erro representa a condição de proximidade da altitude escolhida. Nesta condição a velocidade de aproximação deve ser pequena (velocidade do erro *Small*), de maneira a evitar o sobrepasso, não ultrapassando a altitude desejada. Como se vê, os conjuntos *Small* se justificam para detecção do estado em que é necessário evitar o sobrepasso.

O conjunto *Medium* do erro é usado na maioria das situações, e representa um erro de altitude médio, não muito distante da altitude desejada. A velocidade do erro *Medium* expressa a velocidade de aproximação ideal; esta não deve ser tão pequena que acarrete atrasos, nem tão grande que ocasione perda de controle.

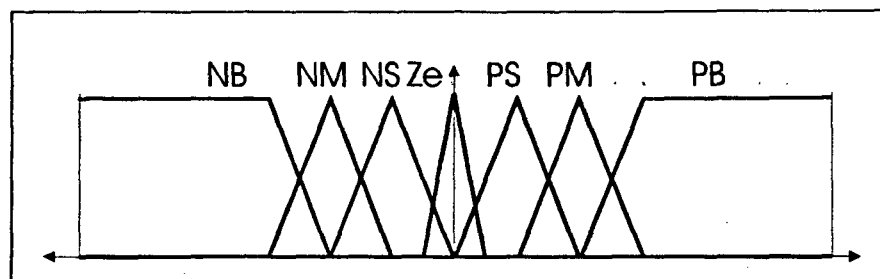


Fig. 4.3 - Formato dos Conjuntos Nebulosos Utilizados na Tarefa Decolar

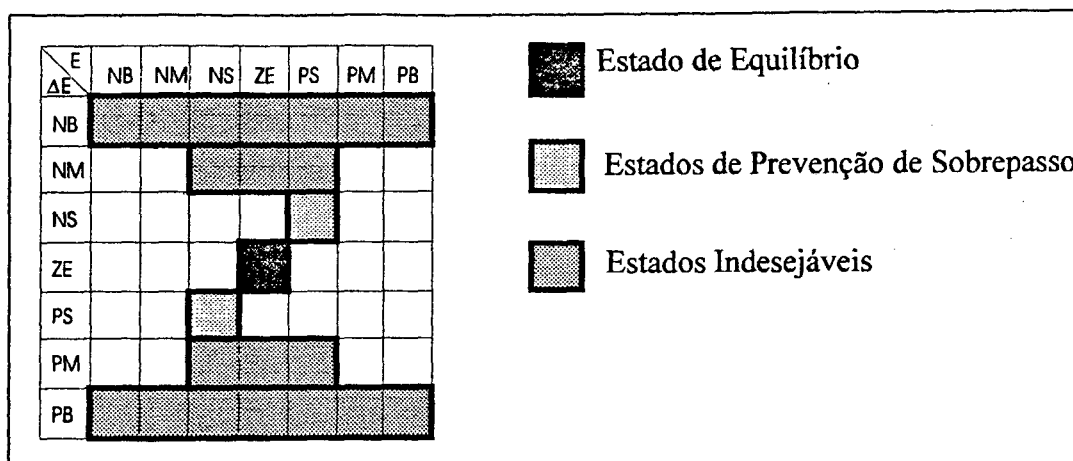


Fig. 4.4 - Estados na Tabela de Busca da Tarefa Decolar

O conjunto de erro *Big* representa situações extremas, onde altitude do helicóptero se encontra longe da desejada. A velocidade do erro *Big* não é uma situação desejada, já que pode ocasionar descontrolo da aeronave.

As situações que justificam o número de conjuntos nebulosos para as variáveis de entrada estão representadas na figura 4.4, onde vemos quais estados importantes (equilíbrio, prevenção do sobrepasso e estados proibidos) são determinados por esses conjuntos.

Os conjuntos nebulosos associados à variável de saída variação do coletivo são cinco: *Negative Medium*, *Negative Small*, *Zero*, *Positive Small* e *Positive Medium*. O conjunto *Zero* é bem estreito e representa a posição de equilíbrio (*Trim*) em que variação da saída é mínima. Como a atuação no comando é realizada através da variação e não de um valor absoluto, neste caso a saída caracterizada pelo conjunto *Zero* não significa que o comando do helicóptero será nulo, mas que a variação é nula, e o atual comando se mantém.

O conjunto *Small* significa uma pequena correção no comando, para corrigir erros pequenos ou médios. Apesar do inerente atraso na integração de valores pequenos, o uso dos conjuntos *Small* na atuação tenta evitar o sobrepasso e a perda de controle por variação brusca do comando.

O conjunto *Medium* só é usado em situações extremas de correção de movimentos em altas velocidades, nunca de posição, devido ao possível descontrolo descrito anteriormente.

e) REGRAS

Na figura 4.5, pode-se ver qualitativamente o uso dos conjuntos de saída no espaço de estados (erro de altitude e variação do erro de altitude). A condição inicial é o ponto P_1 , sendo a trajetória desejada a linha contínua e a trajetória com sobrepasso a linha pontilhada. A área hachurada representa a zona de prevenção de sobrepasso, onde nota-se que as trajetórias descritas acima se separam.

f) ACOPLAMENTOS

Nesta tarefa não foram considerados os acoplamentos entre o movimento vertical e os outros movimentos, já que o simulador utilizado não prevê situações de rajadas de vento ou de decolagem de terreno em declive, quando esses acoplamentos se tornam relevantes.

g) PRECISÃO

Para a tarefa *Decolar* a precisão escolhida para assegurar a estabilidade desta tarefa, e portanto iniciar a tarefa seguinte (conforme capítulo 3, item 3.2.3) é de aproximadamente 10cm.

4.2.2 TAREFA GUINADA

a) OBJETIVO E COMANDOS

O objetivo da tarefa *Guinada* é girar o corpo do helicóptero em torno do eixo vertical, de forma a alinhar a aeronave com a direção de vôo. Este movimento altera o ângulo de guinada do helicóptero, modificando o azimute da aeronave.

O comando de cauda, responsável por contrabalançar os efeitos de reação da fuselagem a rotação do rotor principal, permite a mudança do ângulo de guinada. Quando o comando de cauda é aumentado, o nariz gira para a direita e quando é diminuído, o nariz gira para a esquerda, conforme descrito no capítulo 1.

b) TÉCNICA DE PILOTAGEM

Para alterar o ângulo de guinada da aeronave, o piloto atua no comando de cauda, mantendo rígido controle da velocidade de mudança do ângulo. Essa velocidade não pode ser grande, sob risco de gerar um comportamento incontrolável da aeronave. Isso é importante principalmente quando o erro de ângulo de guinada é grande. A alteração no comando é feita da forma suave e proporcional ao erro, quando este é pequeno.

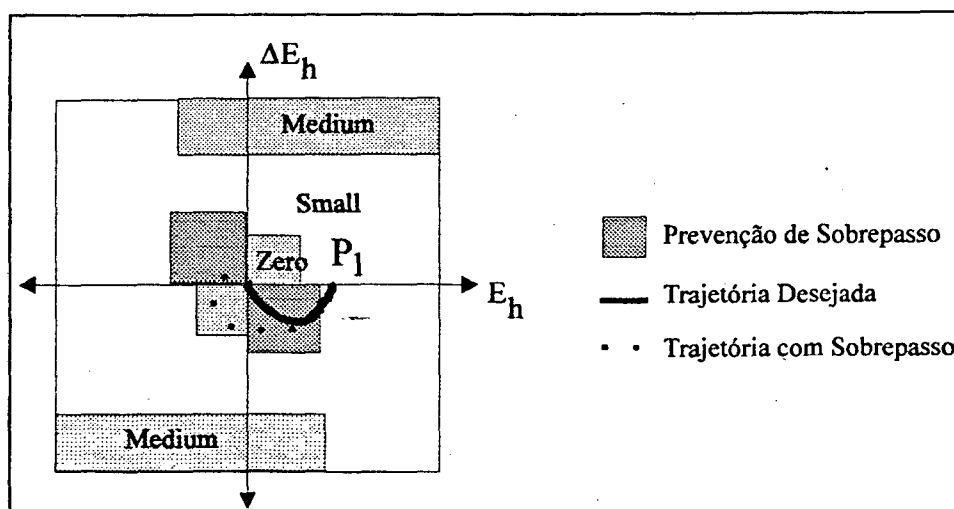


Fig. 4.5 - Regras e Trajetórias no Espaço de Estados

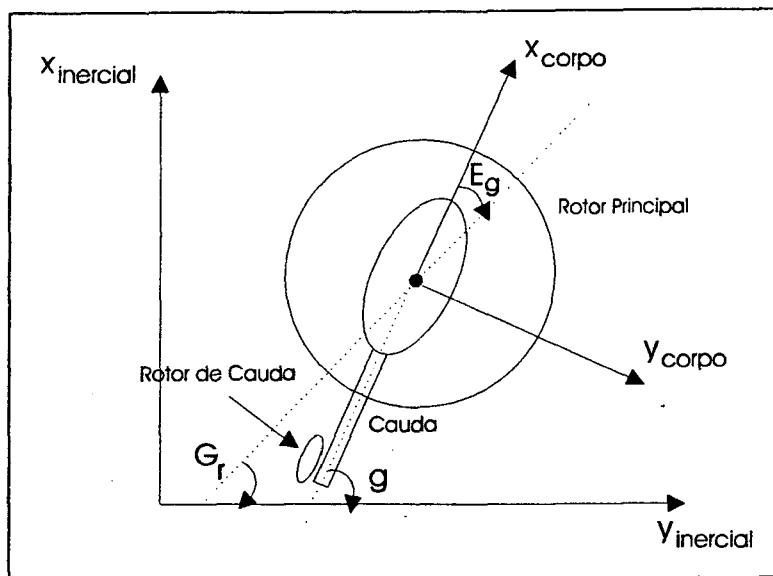


Fig. 4.6 - Vista Superior do Helicóptero durante a Alteração do Ângulo de Guinada

c) VARIÁVEIS DE ENTRADA E SAÍDA

A atuação no comando de cauda é função do erro de ângulo de guinada (E_g), definido por:

$$E_g = G_r - g,$$

onde G_r é o ângulo de guinada desejado e g é o ângulo de guinada atual. A variação desse erro (ΔE_g) informa se ele está aumentando ou diminuindo, influenciando também no comando de cauda a ser aplicado. Essa variação é calculada por:

$$\Delta E_g = -\Delta g = -V_g,$$

onde V_g é a velocidade de guinada do helicóptero. O ângulo de guinada é positivo no sentido horário e negativo no sentido anti-horário. A figura 4.6 mostra a vista superior do helicóptero quando está sendo alterado seu ângulo de guinada.

Portanto o bloco de comando de cauda da tarefa *Guinada* possui o erro de ângulo de guinada (E_g) e sua variação (ΔE_g) como variáveis de entrada. A variável de saída utilizada é a variação do comando de cauda (ΔT), que é integrada após a defuzificação para a obtenção do comando a ser enviado ao simulador do helicóptero. Isto porque a alavanca do comando de cauda, assim como a do coletivo, também possui uma posição de equilíbrio (Trim) variável com o ângulo a ser alcançado (ou altitude no caso do coletivo), e variações bruscas de comando podem causar perda de controle.

d) CONJUNTOS NEBULOSOS

Para estas variáveis do bloco de comando de cauda da tarefa *Guinada*, o mesmo número de conjuntos da tarefa *Decolar* foi utilizado, com o mesmo formato dos mostrados na figura 4.3. A justificativa é equivalente, com o reforço de que devido a atrasos de resposta, os conjuntos da variável de saída são mais largos, no sentido de reduzir o atraso adicional imposto pelo integrador.

e) REGRAS

As regras de controle para a tarefa *Guinada* foram projetadas da mesma maneira que as da tarefa *Decolar*, a não ser pelos sinais. As regras da tarefa *Guinada* são mais restritivas quanto à condição de impedir que a aeronave atinja velocidades *Big*, já que, para este movimento, grandes velocidades podem causar instabilidades.

f) ACOPLAMENTOS

A tarefa de alterar o ângulo de guinada possui acoplamentos com os movimentos vertical e horizontal. O acoplamento com o movimento vertical é corrigido pela ativação do bloco de regras do coletivo, o mesmo usado na tarefa *Decolar*.

O acoplamento com o movimento horizontal é corrigido, após a estabilização, com a ativação das regras da tarefa *Pairar*. Isto porque, após ter o nariz alinhado com a direção de vôo, o helicóptero pode pairar ou voar a frente. Ambas as tarefas corrigem esse acoplamento. Como a tarefa *Vôo a Frente* não está implementada ainda, a tarefa *Pairar* é obrigatória após alteração do ângulo de guinada.

g) PRECISÃO

Para essa tarefa, a precisão de 0.1 radianos foi utilizada para a determinação da estabilidade da tarefa *Guinada*.

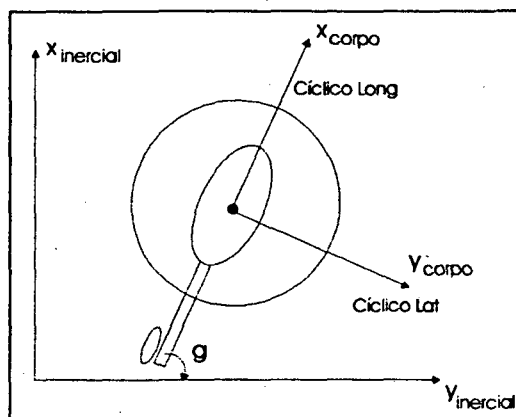


Fig. 4.7 - Movimento do Helicóptero com os Comandos Cíclicos

4.2.3 TAREFA PAIRAR

a) OBJETIVO E COMANDOS

A tarefa *Pairar* tem como objetivo imobilizar o helicóptero a uma altitude constante sobre um ponto fixo no chão.

No controle da altitude e direcionamento, atua-se nos comandos coletivo e de cauda, conforme explicado nas tarefas *Decolar* e *Guinada*.

Para controlar a posição do helicóptero sobre um ponto fixo no chão (posição XY), é necessário atuar nos comandos cíclicos lateral e longitudinal. Conforme explicado no capítulo 1, esses comandos deslocam o helicóptero para a esquerda/direita e para frente/para trás, respectivamente, conforme se vê na figura 4.7.

O controle de posição através dos comandos cíclicos ocorre na seguinte seqüência, ilustrada na figura 4.8:

1. a atuação nos comandos cíclicos causam uma rotação do corpo do helicóptero, arfagem no caso do comando longitudinal e rolagem no caso do comando lateral;
2. a rotação provoca a existência de uma componente horizontal da força de sustentação. esta força causa uma aceleração na direção da inclinação;
3. a aceleração causa deslocamento nessa direção, com retardos devido à dupla integração.

Controlar a posição consiste, portanto, de comandar a inclinação do corpo do helicóptero na direção e sentido adequados a reduzir o erro. Essa inclinação, porém, deve ser limitada sob pena de causar perda de controle.

b) TÉCNICA DE PILOTAGEM

Para controlar altitude e ângulo de guinada, o piloto se comporta como descrito nas tarefas *Decolar* e *Guinada*, respectivamente.

No caso do controle de posição horizontal, o piloto atua na alavanca dos comandos cíclicos na forma de rápidos e pequenos pulsos em torno da posição de zero. A resposta aos

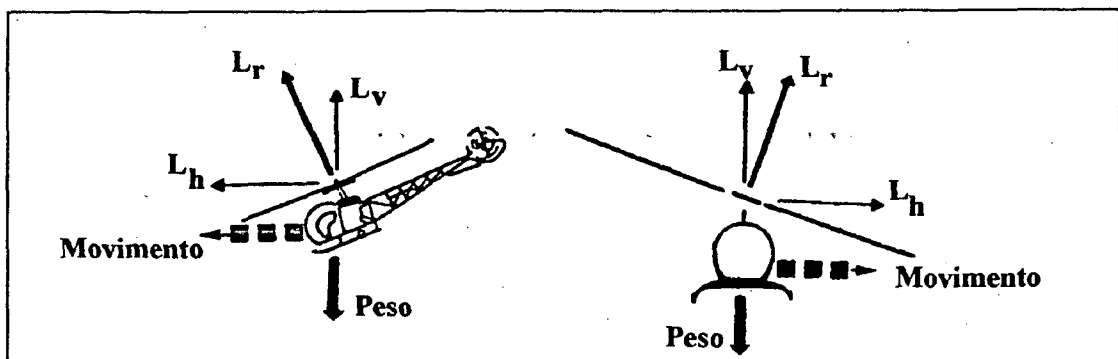


Fig. 4.8 -Arfagem do helicóptero no movimento longitudinal e rolagem no movimento lateral

pulsos possui os retardos descritos acima, e o piloto mantém a alavanca na posição zero, até que o helicóptero responda ao comando.

A velocidade é sempre baixa, pelo fato da tarefa *Pairar* lidar somente com pequenos erros em torno da posição desejada. Para o caso de grandes erros (acima de 5 metros), a tarefa *Vôo a Frente* é utilizada. A manutenção da velocidade de pairar em baixos valores ocorre pela inversão dos comandos, e conseqüente redução da inclinação, quando a velocidade começa a tornar-se diferente de zero.

c) VARIÁVEIS DE ENTRADA E SAÍDA

Para executar esta tarefa são necessários quatro blocos, um para cada comando:

- o bloco de comando coletivo, para manter o helicóptero a uma altitude constante, é igual ao bloco utilizado na tarefa *Decolar*;
- o bloco de comando de cauda, para manter o direcionamento do helicóptero, é igual ao usado na tarefa *Guinada*;
- os blocos de comandos cíclicos longitudinal e lateral, cuja atuação permite controlar a posição do helicóptero sobre um ponto fixo no chão (posição XY).

No projeto destes dois últimos blocos é preciso estudar o comportamento do helicóptero no plano XY.

Como se vê na figura 4.9, dada uma posição no solo desejada (P_r), de coordenadas (X_r, Y_r), e a posição atual da aeronave (p), de coordenadas (x, y), deseja-se, através dos comandos cíclicos longitudinal e lateral, conduzir o helicóptero de p até P_r .

Seja:

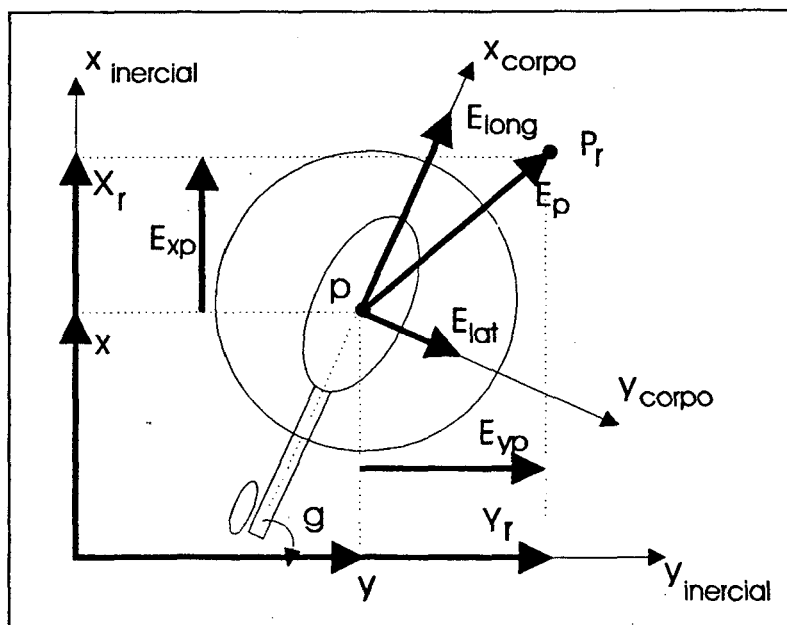


Fig. 4.9 - Vista Superior do Helicóptero Mostrando Variáveis para Controle da Posição XY

$$\mathbf{E}_p = \mathbf{P}_r - \mathbf{p},$$

o erro entre a posição desejada e a posição atual do helicóptero. O objetivo é, portanto, obter:

$$\mathbf{E}_p = \mathbf{0},$$

As coordenadas de \mathbf{E}_p (E_{xp}, E_{yp}), definidas por:

$$E_{xp} = X_r - x$$

$$E_{yp} = Y_r - y.$$

O comando longitudinal, quando aumentado, leva o helicóptero para frente, na direção apontada pelo nariz (ângulo de guinada g). Portanto, ele deve ser função de E_{long} , que é a projeção de \mathbf{E}_p no eixo X no corpo do helicóptero, conforme se vê na figura 4.10.

Já o comando lateral, quando aumentado, leva o helicóptero para a direita do corpo da aeronave. Ele, então, deve ser função de E_{lat} , que é a projeção de \mathbf{E}_p no eixo Y no corpo do helicóptero.

Equacionando, temos:

$$E_{long} = E_{xp} * \cos(g) + E_{yp} * \sin(g) \quad (1)$$

$$E_{lat} = -E_{xp} * \sin(g) + E_{yp} * \cos(g). \quad (2)$$

Como:

$$\Delta E_{xp} = -\Delta x = -V_x$$

$$\Delta E_{yp} = -\Delta y = -V_y$$

temos:

$$\Delta E_{long} = -V_x * \cos(g) - V_y * \sin(g) \quad (3)$$

$$\Delta E_{lat} = V_x * \sin(g) - V_y * \cos(g). \quad (4)$$

As equações (1), (2), (3) e (4) mostram como calcular E_{long} , E_{lat} , ΔE_{long} e ΔE_{lat} , que são as variáveis de entrada dos blocos cíclico longitudinal e lateral, respectivamente.

Para evitar que a inclinação seja demasiada, é necessário colocar os ângulos de inclinação e suas variações: arfagem no caso do longitudinal e rolagem no caso do lateral.

Cada bloco, então, utiliza quatro variáveis de entrada: erro de posição, variação do erro de posição, ângulo de inclinação e variação do ângulo de inclinação.

A variável de saída desses blocos é o próprio comando, não sendo necessária a integração, porque as alavancas dos comandos cíclicos possuem uma posição de equilíbrio (Trim) fixa, os comandos consistindo de rápidos pulsos em torno de zero na direção do movimento desejado.

	E	NM	NS	ZE	PS	PM	NM	NS	ZE	PS	PM	NM	NS	ZE	PS	PM
R	ΔE	N	N	N	N	N	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	P	P	P	P	P
ΔR	N	Estados Indesejáveis														
N	ZE	Correção dos ângulos de atitude										Estados de espera				
N	P	Estados de espera										Correção dos ângulos de atitude				
ZE	N	Estados Indesejáveis										Estados Indesejáveis				
ZE	ZE	Estados Indesejáveis										Estados Indesejáveis				
ZE	P	Estados Indesejáveis										Estados Indesejáveis				
P	N	Estados Indesejáveis										Estados Indesejáveis				
P	ZE	Estados Indesejáveis										Estados Indesejáveis				
P	P	Estados Indesejáveis										Estados Indesejáveis				



	Estado de Equilíbrio
	Estados de Prevenção de Sobrepasso

Fig. 4.10 - Tabela de Busca do Comando Cíclico Lateral da Tarefa Pairar

d) CONJUNTOS NEBULOSOS

Como os blocos possuem quatro variáveis de entrada, um número grande de conjuntos resultaria em uma grande quantidade de regras, aumentando a complexidade do controlador nebuloso, razão pela qual a quantidade de conjuntos por variável nessa tarefa foi diminuída.

Para as variáveis E_{long} e E_{lat} , utiliza-se cinco conjuntos: *Negative Medium*, *Negative Small*, *Zero*, *Positive Small* e *Positive Medium*. O conjunto *Zero* indica a situação de equilíbrio, bem como a tolerância de erro em regime permanente. Os conjuntos *Small* indicam a situação de prevenção de sobrepasso, enquanto os conjuntos *Medium* servem para as correções de posição normais.

Para as variáveis ΔE_{long} e ΔE_{lat} , bastam três conjuntos: *Negative*, *Zero* e *Positive*, para indicar a direção do movimento.

Os ângulos de inclinação (rolagem e arfagem) também utilizam três conjuntos *Negative*, *Zero* e *Positive*, assim como as variações dos ângulos. Esses três conjuntos bastam para prever a tendência de aumentar o ângulo descontroladamente.

e) REGRAS

Na figura 4.10, vê-se como as regras se distribuem na tabela de busca do controle do erro lateral. Os estados indesejáveis consistem de situações que indicam a rolagem crescendo ilimitadamente. Os estados de prevenção de sobrepasso indicam a situação onde a trajetória

desejada e a trajetória com sobrepasso divergem. Os estados de espera ocorrem quando já se atuou nos comandos, mas não houve resposta ainda devido os atrasos inerentes do helicóptero. Nestes estados o comando deve ser *Zero*.

f) ACOPLAMENTOS

Nesta tarefa, todos os comandos estão ativos através dos blocos de regras, sendo que quaisquer acoplamentos são simultaneamente corrigidos.

g) PRECISÃO

Esta tarefa prevê, para os blocos de comandos coletivo e de cauda, as mesmas precisões das tarefas *Decolar* e *Guinada*. Para os blocos de comandos cíclicos, a precisão utilizada é de 10 centímetros, considerada boa se comparada com a conseguida por um piloto, já que esta última depende da distância do piloto ao helicóptero.

4.2.4 TAREFA VÔO A FRENTE

a) OBJETIVO E COMANDOS

Esta tarefa consiste em fazer o helicóptero voar na direção apontada pelo nariz da aeronave, até uma posição especificada, a uma altitude constante.

Para voar a frente, o comando cíclico longitudinal é utilizado para acelerar e desacelerar o helicóptero.

b) TÉCNICA DE PILOTAGEM

No caso da tarefa *Vôo a Frente*, o piloto controla a altitude e o ângulo de guinada conforme a tarefa *Pairar*. Mas, para os comandos cíclicos, ele adota uma estratégia diferente. A posição lateral é corrigida de modo semelhante a tarefa *Pairar*, mas a alavanca é movimentada somente lateralmente na forma de pulsos rápidos e pequenos.

O vôo a frente é alcançado por atuação na alavanca dos cíclicos para frente, com pulsos rápidos e inversamente proporcionais à velocidade, sendo iguais a zero quando esta é média e constante. Quando o erro de posição for pequeno, e portanto o helicóptero estiver próximo da posição final desejada, a alavanca é invertida para freiar a aeronave e o controle fino de posição é feito de forma equivalente a tarefa *Pairar*.

c) VARIÁVEIS DE ENTRADA E SAÍDA

Todos os quatro blocos de comandos devem estar ativos, já que tanto a altitude (coletivo), quanto a guinada (cauda) e a posição XY (cíclicos longitudinal e lateral) devem ser controlados.

O bloco de coletivo é o mesmo usado na tarefa *Decolar*, assim como o bloco de cauda é o mesmo utilizado na tarefa *Guinada*. O bloco de cíclico lateral também é o mesmo usado na tarefa *Pairar*.

A diferença básica é no bloco do cíclico longitudinal, principalmente nos conjuntos de E_{long} e nas regras.

d) CONJUNTOS NEBULOSOS

Os conjuntos da variável de entrada E_{long} devem estender-se por todo o novo universo de distâncias que o helicóptero pode percorrer (aproximadamente de -5000 a 5000 metros).

e) REGRAS

As regras diferem no fato de se ter como objetivo manter uma velocidade constante quando o erro é classificado como *Medium*, reduzindo essa velocidade quando estiver próximo (conjunto *Small*), evitando o sobrepasso. A correção de atitude (inclinação) deve ser feita, mas somente se isso causar uma deriva no helicóptero.

f) ACOPLAMENTOS

Os acoplamentos, como no caso da tarefa *Pairar*, já são corrigidos naturalmente, pois todos os comandos estão ativos.

g) PRECISÃO

Como na tarefa *Pairar*, para os blocos de comando coletivo e de cauda, as mesmas precisões das tarefas *Decolar* e *Guinada* são utilizadas. Para os blocos de comandos cíclicos, a precisão de 10 centímetros também é utilizada.

4.2.5 TAREFA POUSAR

a) OBJETIVO E COMANDOS

A tarefa *Pousar* objetiva tornar a altitude do helicóptero igual a zero, ou seja, colocá-lo no solo.

Para controlar a altitude da aeronave nesta tarefa, o comando coletivo é utilizado, sendo diminuído para alcançar velocidade para baixo.

Esta tarefa é semelhante à tarefa *Decolar*, entretanto há uma diferença importante: no pouso não pode haver sobrepasso. Se a velocidade de descida for grande, podem ocorrer estragos, ou mesmo destruição da aeronave, devido ao impacto com o solo.

b) TÉCNICA DE PILOTAGEM

Para imprimir uma velocidade vertical positiva (descida), o piloto diminui o comando coletivo até alcançar uma velocidade de aproximação do solo média e constante.

O sobrepasso é evitado invertendo a alavanca do comando coletivo, ou seja aumentando-o, quando o helicóptero está bem próximo do chão, de forma a fazê-lo subir um pouco. Então, ele inverte a alavanca novamente (diminui o comando), fazendo o helicóptero tocar o solo a baixa velocidade.

e) VARIÁVEIS DE ENTRADA E SAÍDA

As variáveis de entrada são altitude (h) e velocidade vertical (V_z). A variável de saída é a variação de coletivo, como na tarefa *Decolar*.

d) CONJUNTOS NEBULOSOS

Utilizam-se sete conjuntos para as variáveis de entrada e cinco para as de saída, como no caso da tarefa *Decolar*.

O conjunto de variação do erro devem ser mais sensíveis à velocidade, com conjuntos *Small* menores. Isso evitará aproximações com velocidade grandes.

e) REGRAS

As regras devem ser mais rigorosas na prevenção do sobrepasso, do que no caso da tarefa *Decolar*, usando um conjunto de saída *Small* mais estreito para possibilitar uma aproximação mais lenta do solo.

f) ACOPLAMENTOS

Nesta tarefa não existiriam acoplamentos se o helicóptero estivesse nivelado e parado antes de começar a pousar. Como nem sempre isso acontece, os blocos de comando de cauda e de comandos cíclicos da tarefa *Pairar* devem ser ativados simultaneamente ao bloco de comando coletivo da tarefa *Pousar*.

g) PRECISÃO

Nesta tarefa, a precisão é absoluta, já que o helicóptero somente terá pousado realmente quando tocar o solo, alcançando a altitude zero.

4.3 CONCLUSÕES

O nível de controle do sistema de navegação consiste em um controlador nebuloso, com mecanismo de inferência fixo e base de conhecimento variável de acordo com a tarefa correntemente sendo executada.

Foram descritas neste capítulo as características fixas (fuzificação, defuzificação e funções de implicação e composição) e o projeto da base de conhecimento das tarefas *Decolar*, *Guinada*, *Pairar*, *Vôo à Frente* e *Pousar*.

Com essas cinco tarefas básicas, pode-se executar missões que não exijam acrobacias.

A implementação do controlador nebuloso, o ambiente de simulação utilizado e a fase de ajustes do controlador são descritos no próximo capítulo.

CAPÍTULO 5

IMPLEMENTAÇÃO, SIMULAÇÕES E AJUSTES

Nos capítulos anteriores, foram descritos a estrutura hierárquica proposta do sistema de navegação e o projeto do controlador nebuloso, que forma o nível de controle, o mais baixo dessa estrutura.

Neste capítulo, inicialmente é apresentada a implementação realizada do sistema de navegação, descrevendo o ambiente de simulação, o algoritmo e a estrutura de dados utilizada.

A seguir, são mostrados os resultados de simulação do sistema de navegação, com o controlador nebuloso cujo projeto foi apresentado no capítulo 4. A análise desses resultados conduz a fase de ajustes, descrita ao final deste capítulo. Por último são apresentados os resultados obtidos após a fase de ajustes.

5.1 IMPLEMENTAÇÃO

Como primeira versão, não houve preocupações com otimização do código, memória utilizada ou tempo de execução. Este protótipo visa testar e ajustar o controlador nebuloso, não pretendendo ser o código final do sistema de navegação.

O sistema de navegação é testado através da interação com o simulador HSIM, desenvolvido pela Gyron Tecnologia. Como este simulador roda no sistema operacional MS-DOS, em IBM-PC, o sistema de navegação também foi desenvolvido para essa plataforma.

O simulador HSIM foi desenvolvido em linguagem C, tendo uma saída gráfica animada tridimensional. A entrada provém de um joystick, representando as alavancas de comando usadas pelo piloto.

O sistema de navegação interage com o simulador HSIM substituindo o joystick, enviando ao simulador os valores dos comandos equivalentes ao que seriam gerados no joystick, conforme se vê na figura 5.1. O sistema de navegação foi implementado como uma rotina do simulador, substituindo a rotina que lê os valores do joystick, tendo sido utilizada a mesma linguagem de programação em que foi desenvolvido o simulador HSIM.

A seguir, é descrito o algoritmo utilizado nessa implementação do sistema de navegação e, depois, a estrutura de dados para armazenar a base de conhecimento é apresentada.

5.1.1 ALGORITMO

O algoritmo para implementar o sistema de navegação proposto deve considerar a existência dos níveis da estrutura hierárquica.

O nível de Interpretação de Missão deve ler a missão de um arquivo texto, por exemplo, e analisá-la, dividindo-a em tarefas seqüenciais. Após o que, deve encarregar o nível de tarefa de executar uma tarefa por vez.

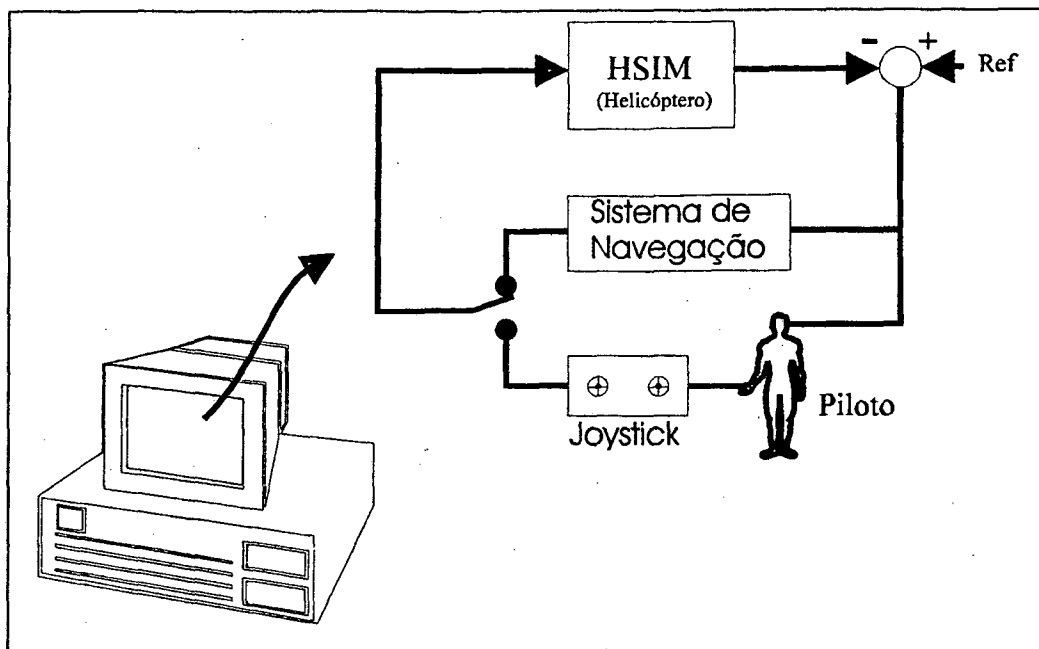


Fig. 5.1 - Interação do Sistema de Navegação com o simulador HSIM

O nível de tarefas, por sua vez, ao receber a tarefa a ser executada do nível de Interpretação de Missão, deve escolher os blocos da base de conhecimento necessários para executar a tarefa e corrigir os acoplamentos. Este nível deve, a cada iteração, verificar se a tarefa pode ser considerada estável, sinalizando ao nível de Interpretação de Missão quando outra tarefa puder ser executada.

O nível de Controle, que nesse trabalho consiste de um controlador nebuloso, deve a partir dos estado do helicóptero simulado, inferir os comandos a serem aplicados ao simulador. A inferência desses comandos depende da base de conhecimento utilizada, que por sua vez, depende da tarefa executada atualmente.

A cada iteração, o controlador nebuloso deve:

- classificar estados do helicóptero de acordo com conjuntos nebulosos definidos na base de conhecimento da tarefa;
- avaliar as regras de controle;
- defuzificar os valores nebulosos inferidos, obtendo os valores para os comandos do helicóptero.

Após o cálculo dos valores dos comandos, esses são utilizados pelo simulador HSIM, para calcular o comportamento do helicóptero.

O fluxograma completo do sistema de navegação, com todos os níveis, pode ser visto na figura 5.2.

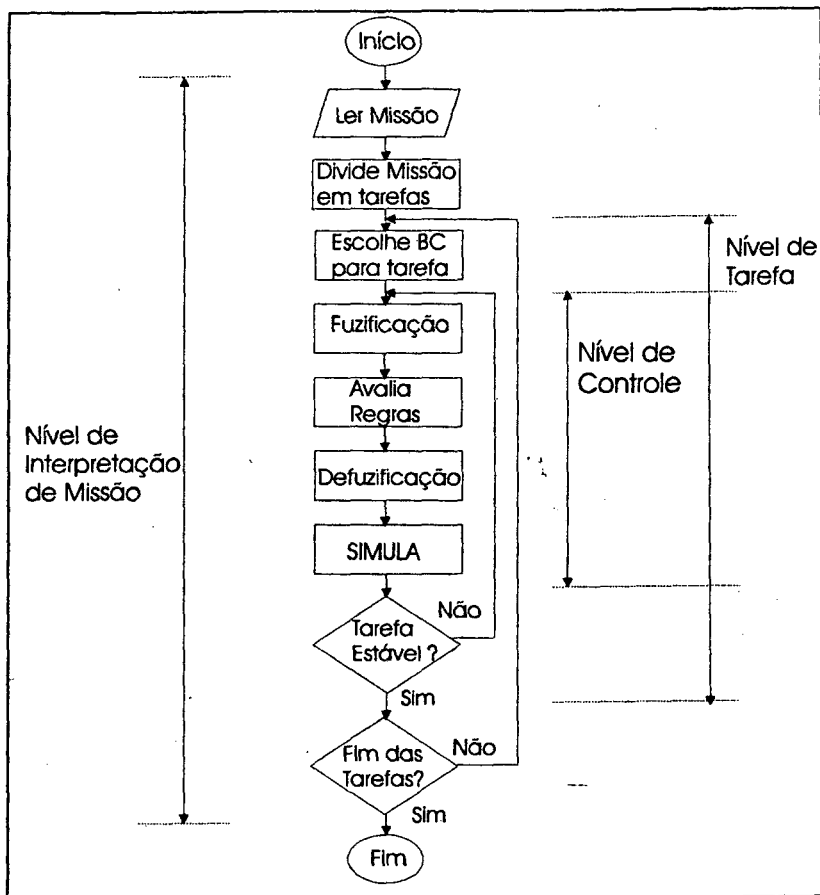


Fig. 5.2 - Fluxograma completo do Sistema de Navegação

5.1.2 ESTRUTURA DE DADOS

É necessário uma estrutura de dados que possibilite representar conjuntos nebulosos e regras.

Como a linguagem escolhida para implementar o sistema de navegação foi a linguagem C, optou-se por utilizar a estrutura proposta em [Viot 93], que é descrita a seguir.

Para permitir um código independente do tamanho da base de conhecimento (número de variáveis, de conjuntos ou de regras), utiliza-se listas encadeadas, com alocação dinâmica de memória. Desta forma, a memória utilizada pelo programa depende do tamanho da base de conhecimento, só sendo alocada a quantidade de memória necessária para armazenar os dados definidos.

A seguir, a estrutura da lista encadeada utilizada para definir as variáveis e conjuntos é descrita, bem como a estrutura de regras e o método de avaliá-las.

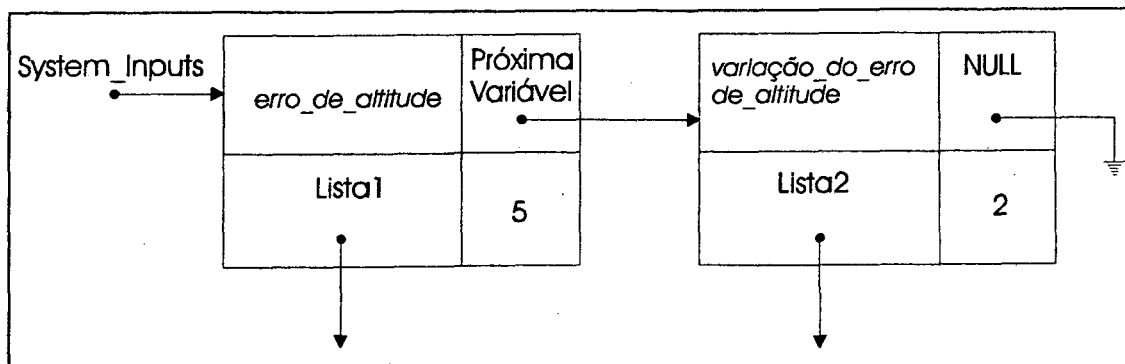


Fig. 5.3 - Nós da lista de Variáveis de Entrada

VARIÁVEIS E CONJUNTOS

As variáveis de entrada da base de conhecimento são armazenadas em uma lista onde cada nó possui as informações de nome da variável e um ponteiro para o próximo elemento da lista. O valor da variável, que é atualizado a cada iteração de controle, também é armazenado em cada nó, bem como um outro ponteiro para a lista de conjuntos definidos para essa variável. A figura 5.3 ilustra um nó dessa lista e como eles são estruturados para formar a lista de variáveis de entrada. Esta lista é composta de tantos nós quantas sejam as variáveis, alocados na inicialização da base de conhecimento, um a um. O tamanho dessa lista não é fixo, sendo o final marcado por uma referência à próxima variável com valor NULL.

Como pode ser visto na figura 5.3, uma variável chamada *System_Inputs* contém a referência para o primeiro nó da lista. Este nó contém, em seus campos, o nome da variável (*erro_de_altitude*), o valor desta variável nessa iteração (5), uma referência para a lista de conjuntos nebulosos definidos para esta variável (*lista1*) e uma referência para a próxima variável da lista.

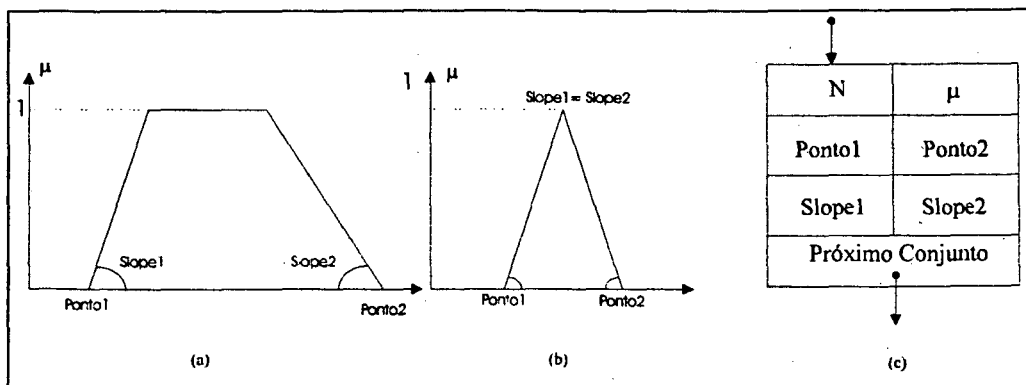


Fig. 5.4 - Formato escolhido dos conjuntos nebulosos

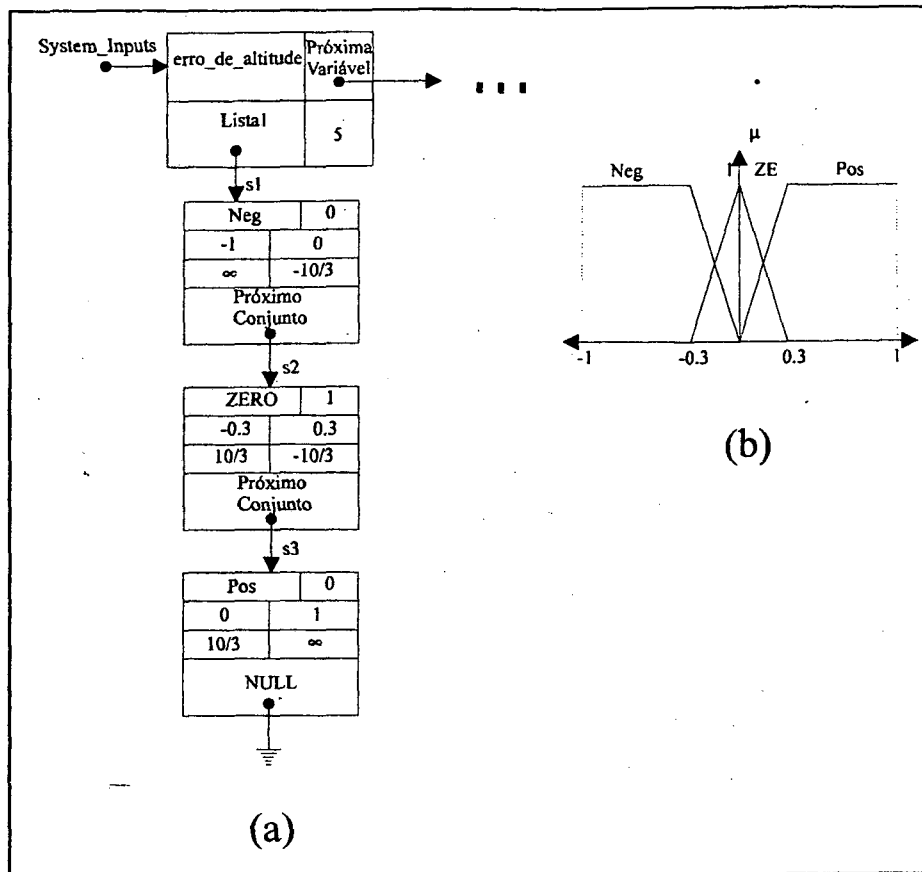


Fig. 5.5 - Lista de conjuntos associada a uma variável

Esta referência leva ao nó da próxima variável (variação_do_erro_de_altitude), cujo valor nessa iteração é dois, possuindo sua própria lista de conjuntos (lista2) e cuja referência ao próximo elemento da lista possui valor NULL, indicando o final da lista.

Os conjuntos nebulosos possuem em geral o formato trapezoidal, e são representados como na figura 5.4a, podendo também possuir forma triangular como na figura 5.4b. Os valores de ponto1, ponto2, slope1 e slope2 permitem determinar os valores do suporte e do núcleo do conjunto nebuloso, com os quais este é individualmente definido. Para se definir um conjunto com forma triangular basta que slope1 e slope2 sejam iguais e de maneira a terem o ponto $[(\text{ponto2}-\text{ponto1})/2 + \text{ponto1}, 1]$ em comum.

A lista de conjuntos nebulosos de cada variável é formada por nós, um para cada conjunto, contendo, como se pode ver na figura 5.4c para o conjunto nebuloso da figura 5.4a:

- nome do conjunto nebuloso, Neg;
- valor da pertinência $\mu_N(x)$ do valor x da variável ao conjunto Neg, atualizado a cada iteração;
- definições dos valores do núcleo e do suporte (valores de ponto1, ponto2, slope1 e slope2) do conjunto;
- referência para o próximo conjunto da lista, ou NULL se final da lista.

Na figura 5.5a, é mostrada uma lista de conjuntos, com 3 nós associados à variável erro_de_altitude, representando os conjuntos nebulosos da figura 5.5b.

O final da lista é determinado pelo nó com o campo de referência igual a NULL.

As variáveis de saída e seus conjuntos são definidos de maneira semelhante, utilizando a variável System_Outputs para referenciar o primeiro nó da lista de variáveis de saída. Um exemplo é ilustrado na figura 5.6, usando a variável de saída, variação_do_coletivo, caracterizando uma lista de um único elemento.

A esta variável de saída são associados três conjuntos (Negativo, Zero e Positivo), descritos pelos pontos e inclinações, conforme gráfico das funções na figura 5.6. O símbolo (?) no campo do valor de μ indica que este é indeterminado, mostrando que estes valores são atribuídos após a avaliação das regras. Inicialmente são inferidos os valores das funções de pertinência dos conjuntos, tirados dos consequentes das regras. Depois, um método de defuzificação é utilizado para encontrar o valor que deve ser atribuído à variável de saída, preenchendo o campo valor no nó da variável. Neste trabalho foi utilizado o método de

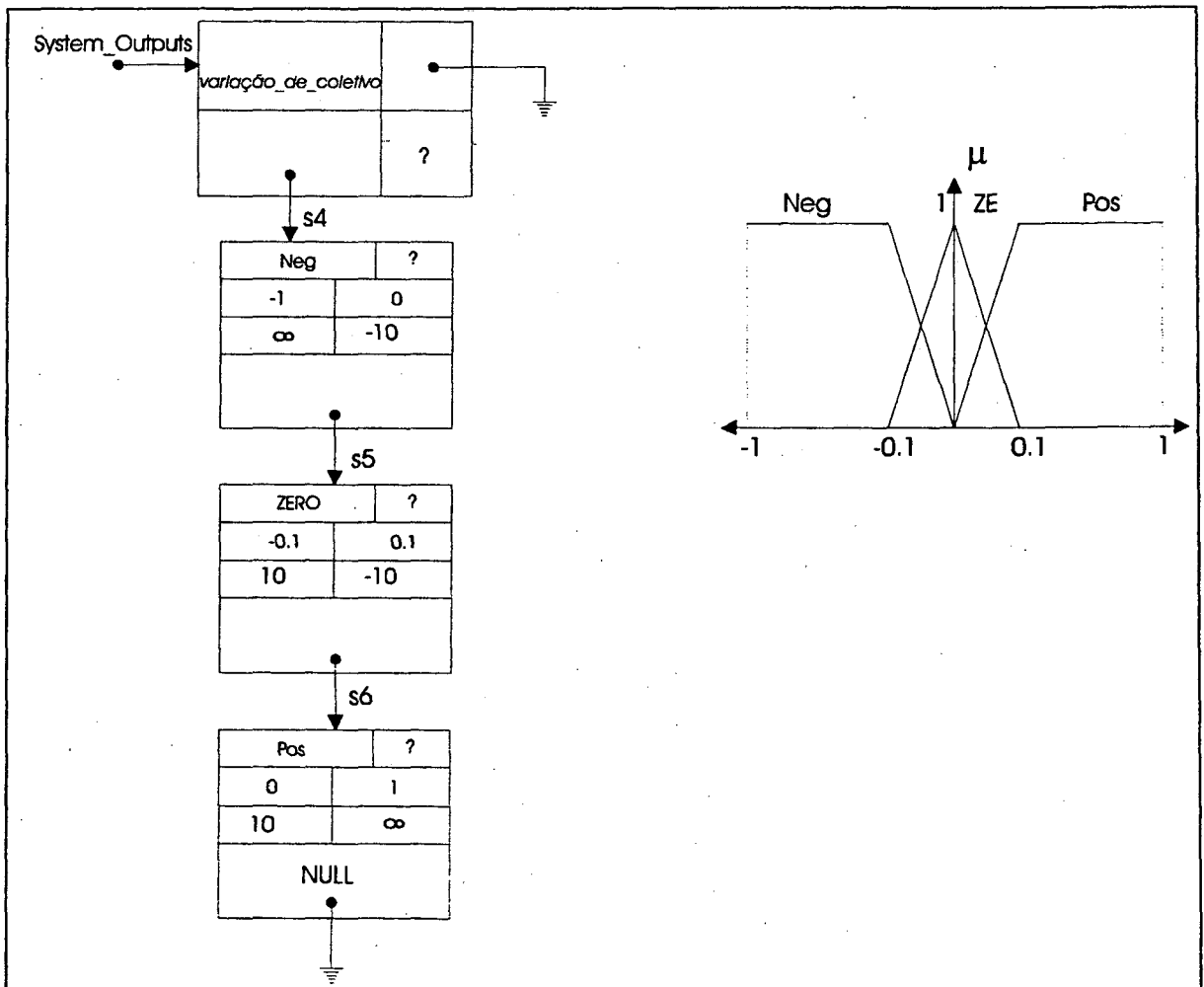


Fig. 5.6 - Lista de variáveis de saída com conjuntos associados

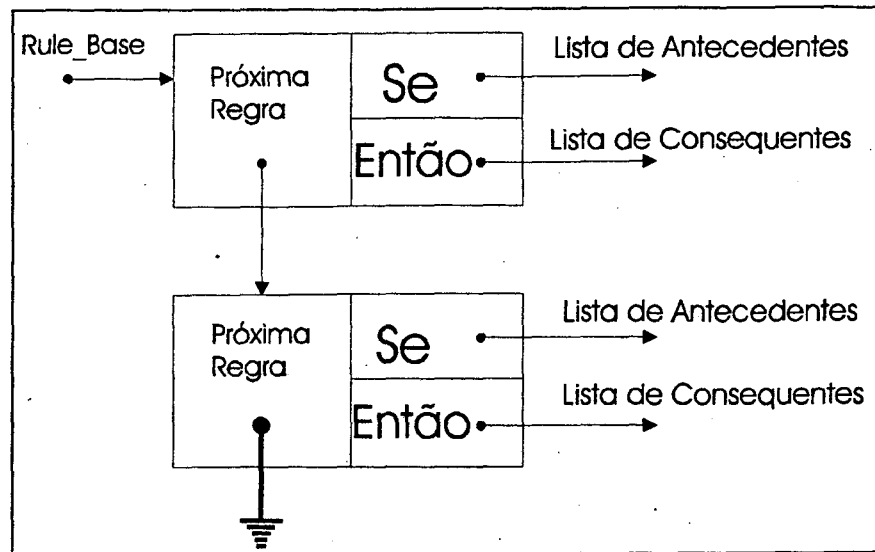


Fig. 5.7 - Lista de regras

defuzificação conhecido como centróide ou centro de massa, conforme projeto no capítulo 4.

REGRAS

As regras de controle também são armazenadas em uma lista encadeada, onde a variável *Rule_Base* é a referência para a primeira regra da lista.

Cada regra corresponde a um nó da lista. Neste nó, são definidas duas referências: uma para a lista encadeada de antecedentes da regra e outra para a lista encadeada de consequentes da regra. A lista de antecedentes diz respeito às variáveis de entrada, enquanto a lista de consequentes relaciona-se com as variáveis de saída. Uma outra referência aponta para a próxima regra da lista. Um exemplo de lista de regras é mostrada na figura 5.7.

A lista de antecedentes, parte SE da regra, possui nós com dois campos:

- um é responsável por indicar a variável e o conjunto nebuloso considerado no antecedente da regra. Neste campo é armazenado o endereço do nó da lista de conjuntos da variável de entrada;
- outro indica o nó do próximo antecedente.

Na figura 5.8, vê-se a lista de antecedentes da primeira regra da lista de regras. Vê-se que no campo do primeiro nó de antecedentes está escrito S2. Este código corresponde ao endereço do nó erro_de_altitude ZERO, visto na figura 5.5.

A lista de consequentes é feita da mesma forma. Pela figura, vê-se que o consequente é S5, o endereço do nó variação_do_coletivo ZERO, visto na figura 5.6.

A regra mostrada na figura 5.8 pode ser traduzida, portanto, como:

SE erro_de_altitude ZERO ENTÃO variação_do_coletivo ZERO.

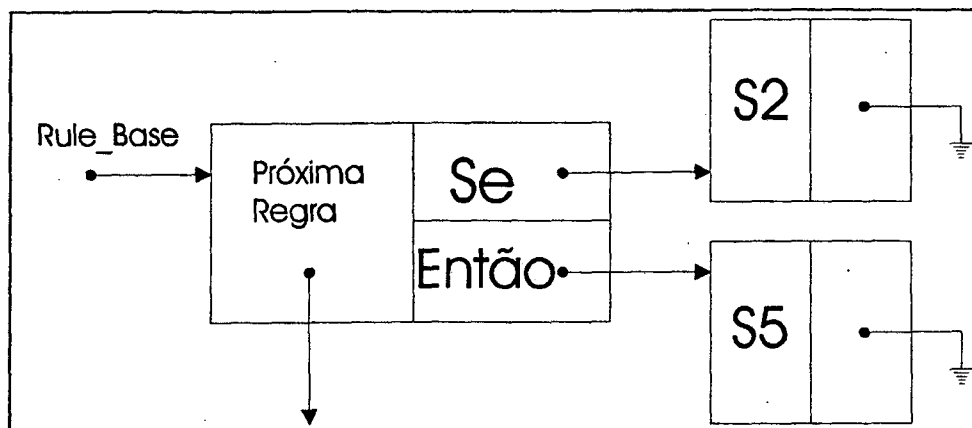


Fig. 5.8 - Lista de antecedentes e consequentes de uma regra

5.2 SIMULAÇÃO

O projeto do controlador nebuloso descrito no capítulo 4 foi implementado conforme mostrado no item anterior deste capítulo.

As simulações têm como objetivo avaliar o desempenho do sistema proposto, possibilitando o ajuste e validação das bases de conhecimento projetadas.

Neste trabalho foram implementadas as tarefas Decolar, Guinada e Pairar. As tarefas Vôo a Frente e Pousar ainda estão sendo implementadas.

Para análise do desempenho do sistema, foi realizada a simulação da missão:

- decolar até a altitude de 5 metros;
- fixar o ângulo de guinada em 0.5 radianos;
- permanecer pairado na posição atual.

Durante a implementação de cada uma dessas tarefas, foi feita uma análise de desempenho e ajustes na base de conhecimento de forma a obter o melhor resultado. Esta análise de desempenho consiste em verificar a existência de sobrepasso, erro e oscilação em regime permanente e se o tempo de resposta é razoável.

A primeira forma de análise é através da resposta no tempo, que permite avaliar se os critérios mencionados acima existem e, se existirem, de que ordem são. No entanto, esta forma de análise só apresenta eventuais problemas a serem corrigidos, não auxiliando na determinação de onde e como devem ser realizados ajustes no controlador.

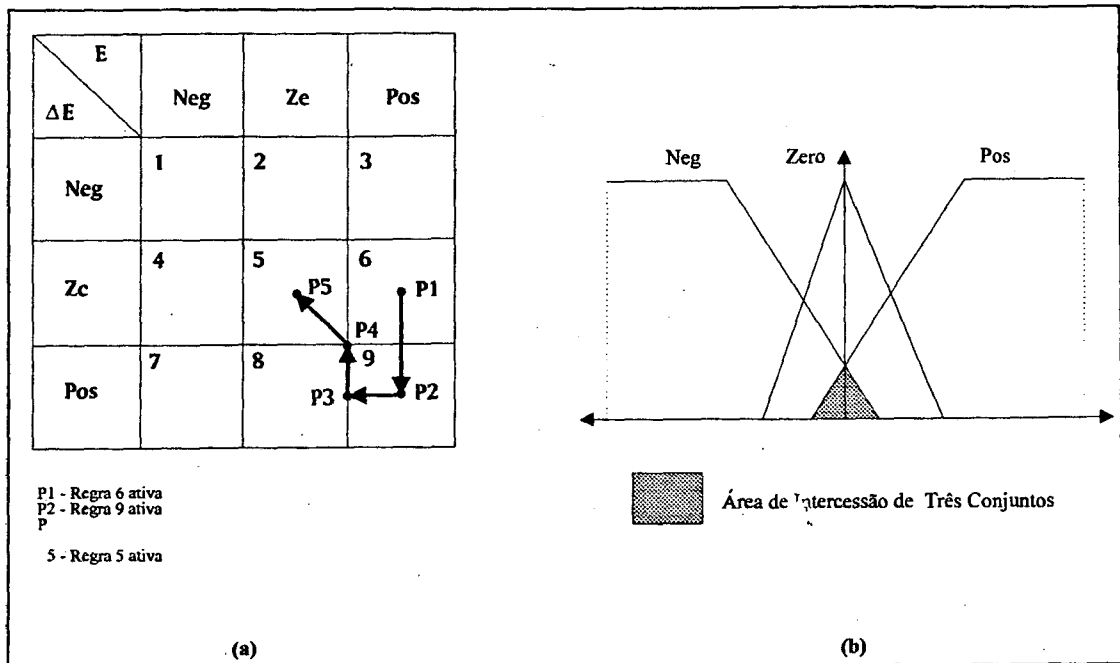


Fig. 5.9 - a) Exemplo de evolução de regras ativas; b) conjuntos com interseção com conjuntos não vizinhos.

Os métodos existentes na literatura, conforme mostrado no item 2.4.2, possibilitam a análise de estabilidade a partir do modelo nebuloso do sistema a ser controlado, inexistente neste caso.

Assim, para permitir analisar a evolução das regras, a seqüência de ativação e a transição entre elas, é utilizado neste trabalho um método chamado de evolução das regras na tabela lingüística de regras. Esta forma de analisar a evolução das regras é baseada em [Braae and Rutherford 79] e auxilia a determinação das regras e transições que necessitam ser alteradas na fase de ajustes.

A evolução das regras é mostrada na tabela lingüística de regras, através de setas que mostram a seqüência de regras ativas e representam a transição entre elas. As setas ligam pontos, que indicam qual ou quais regras estão ativas no momento:

- se o ponto está no centro do espaço da regra na tabela, somente esta regras está ativa;
- se o ponto está sobre a linha que separa duas regras, estas duas regras estão ativas;
- se o ponto está no ponto do cruzamento das linhas que separam as regras, as quatro regras vizinhas estão ativas.

Não está indicado nesta forma de representação da evolução das regras a composição final das regras ou o peso com o qual são disparadas, mas somente quais estão ativas e a seqüência em que elas são ativadas.

Esta forma de mostrar a evolução das regras só se aplica a sistemas controlados com até duas variáveis. A curva formada pelas setas, então, se assemelha ao formato da trajetória no

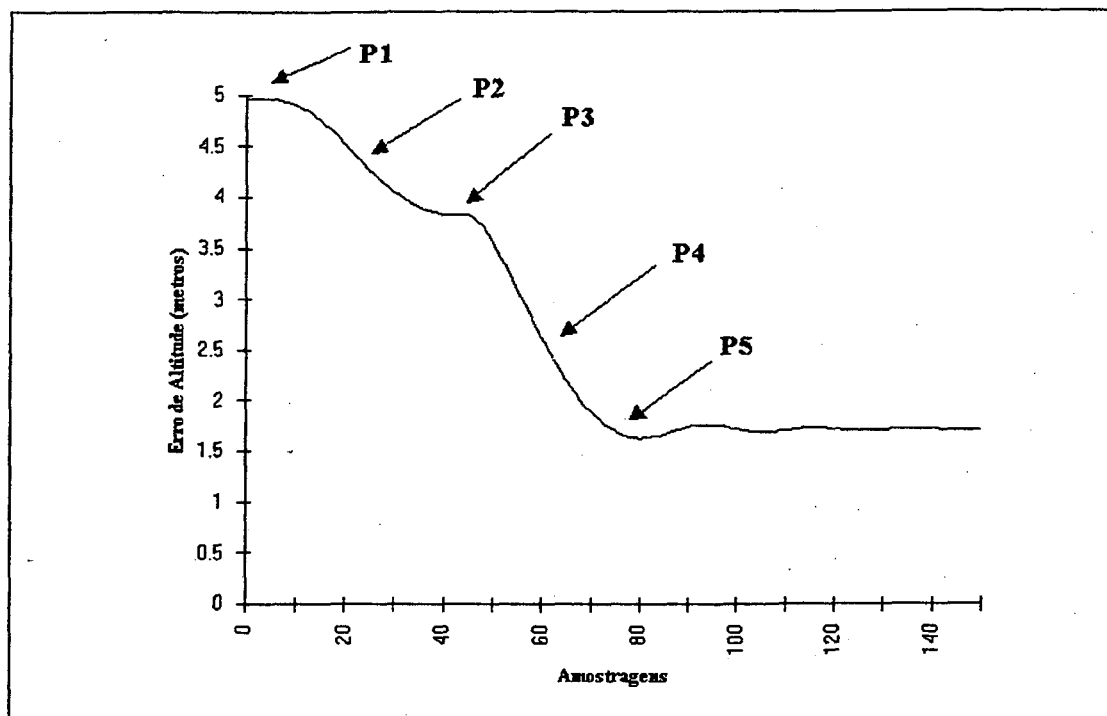


Fig. 5.10 - Simulação da Tarefa Decolar

espaço de estados. Outra restrição ao uso deste método de analisar a evolução das regras é de que os conjuntos nebulosos das variáveis de entrada só possam ter interseção com os conjuntos vizinhos. A interseção de conjuntos não vizinhos, ilustrada na figura 5.9b, faz surgir a possibilidade de que 3, 6 ou 9 regras possam estar ativas simultaneamente, condição que não pode ser representada. Na figura 5.9a é mostrado um exemplo de evolução de regras ativas em uma tabela lingüística de regras.

Outra forma de analisar o intervalo de variação das variáveis, e assim obter os conjuntos nebulosos que melhor as representam, é através da trajetória no espaço de estados, erro versus variação do erro.

Portanto, neste trabalho foram utilizadas as seguintes formas de análise na avaliação dos resultados:

- resposta no tempo;
- trajetória no espaço de estados;
- evolução das regras na tabela lingüística de regras.

Um aspecto importante a ser ressaltado na fase de ajustes é que a simetria não deve ser alterada, tanto nos conjuntos como nas regras. Assim, se o conjunto Negative Small for modificado, o conjunto Positive Small também deve ser alterado de forma equivalente, preservando a simetria dos conjuntos em torno do zero. Já se a alteração for de regras, como por exemplo a regra (PS, NS) é alterada para saída NS, a regra (NS,PS) deve também ser alterada, para PS, assegurando a simetria das regras.

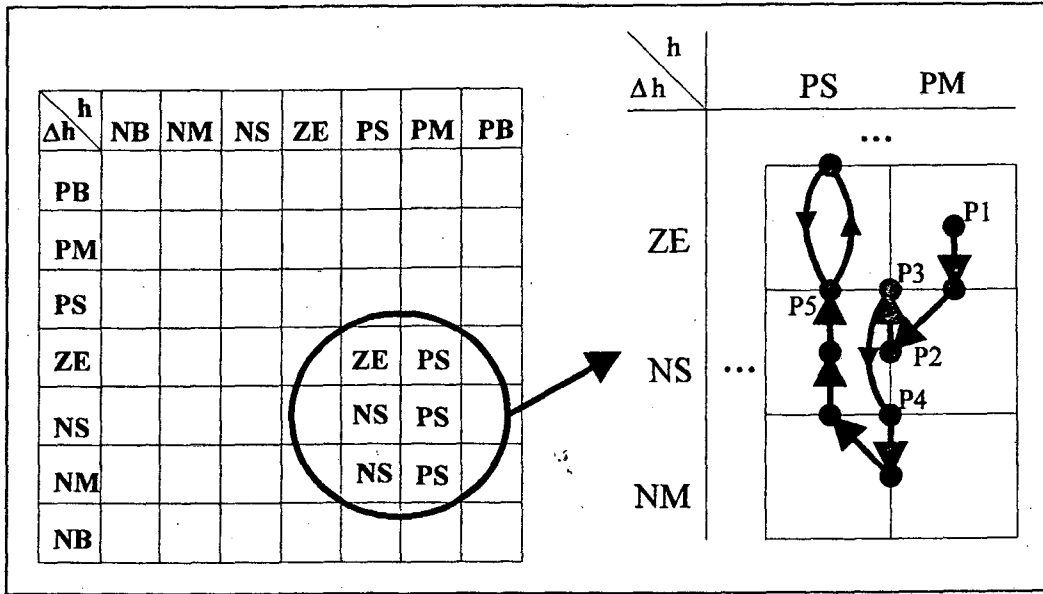


Fig. 5.11 - Evolução das Regras da Tarefa Decolar

A fim de evitar repetições sobre o ajuste, que se caracteriza como uma etapa cheia de análises repetitivas, somente a tarefa Decolar será descrita em detalhes.

Inicialmente serão mostrados os resultados obtidos com a base de conhecimento projetada no capítulo 4, item 4.2.1. Esses resultados são avaliados e as modificações necessárias

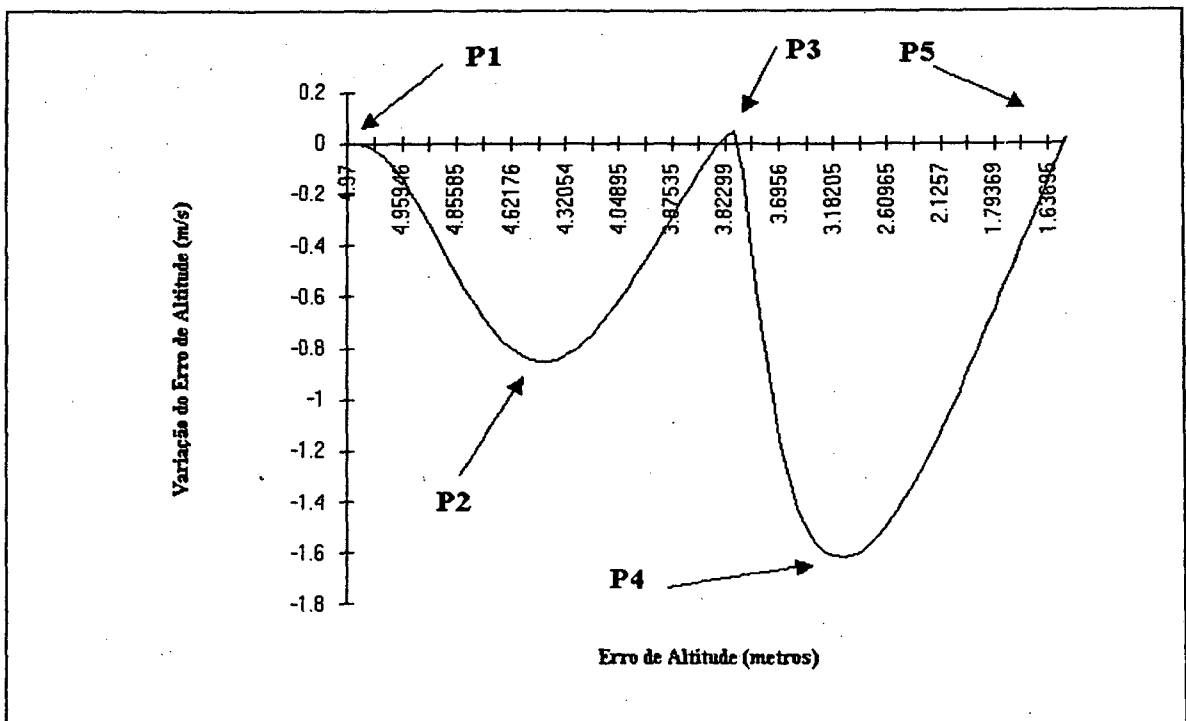


Fig. 5.12 - Trajetória no espaço de estados da tarefa Decolar

são descritas. Os resultados finais, com a base de conhecimento ajustada, são apresentados no final.

Para as tarefas Guinada e Pairar, somente os resultados finais são apresentados.

5.2.1 TAREFA DECOLAR

A tarefa decolar foi simulada com o objetivo de alcançar 5 metros de altitude. Como o simulador HSIM não prevê situações como rajadas de vento e terrenos inclinados, não foram considerados acoplamentos, atuando-se somente no comando coletivo.

O resultado pode se visto na figura 5.10, onde está traçada a curva de altitude versus amostragens. A taxa de amostragem é de, aproximadamente, 50ms.

Conforme o gráfico, o erro para de diminuir na altura da amostra 30, voltando a diminuir na amostra 50, aproximadamente. Este degrau causa retardo, diminuindo o tempo de subida. Este retardo é chamado de retardo r.

A estabilização ocorre na amostra 90, com sobrepasso de 5%, aproximadamente, e com erro em regime permanente na ordem de 35%. Existe ainda um pequena oscilação na saída após a estabilização.

Através da análise da evolução das regras, mostrada na figura 5.11, pode-se explicar a diminuição da velocidade de aproximação na amostra 30 (retardo r). A transição entre os pontos P2 e P3 é responsável por este retardo, mostrando que as regras disparadas anteriormente a esta transição não conduziram o sistema a velocidade de aproximação adequada.

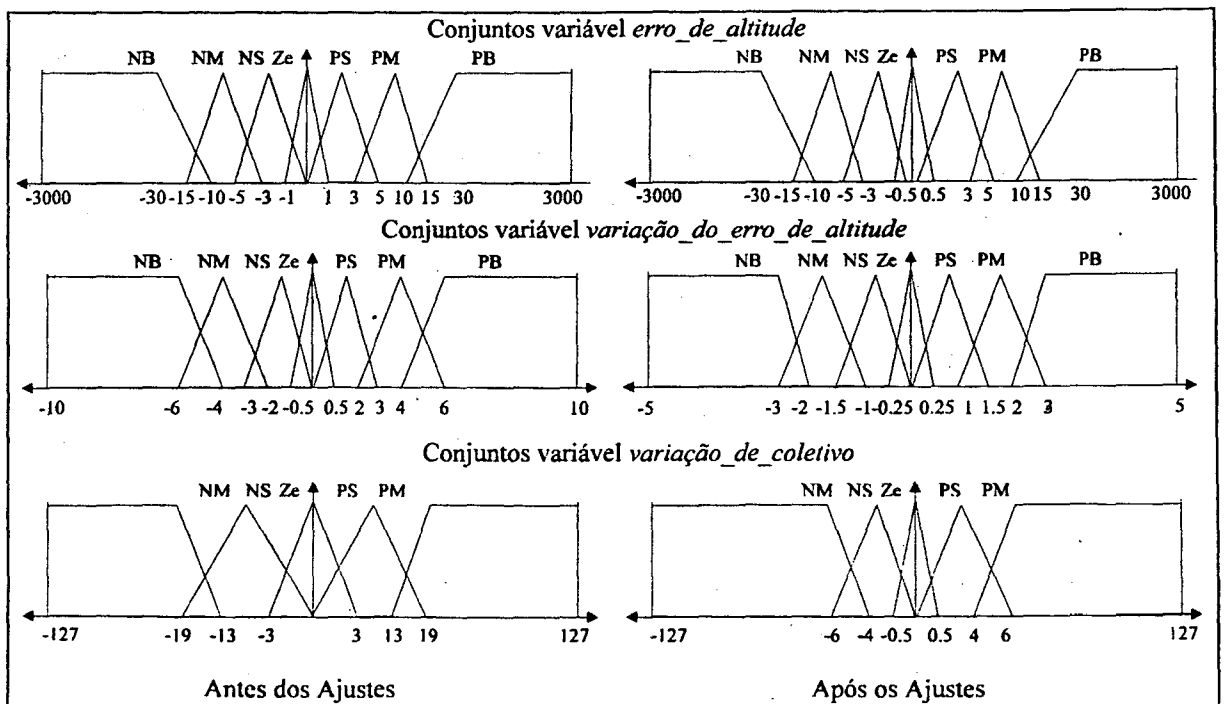


Fig. 5.13 - Conjuntos nebulosos da tarefa Decolar antes e após ajustes.

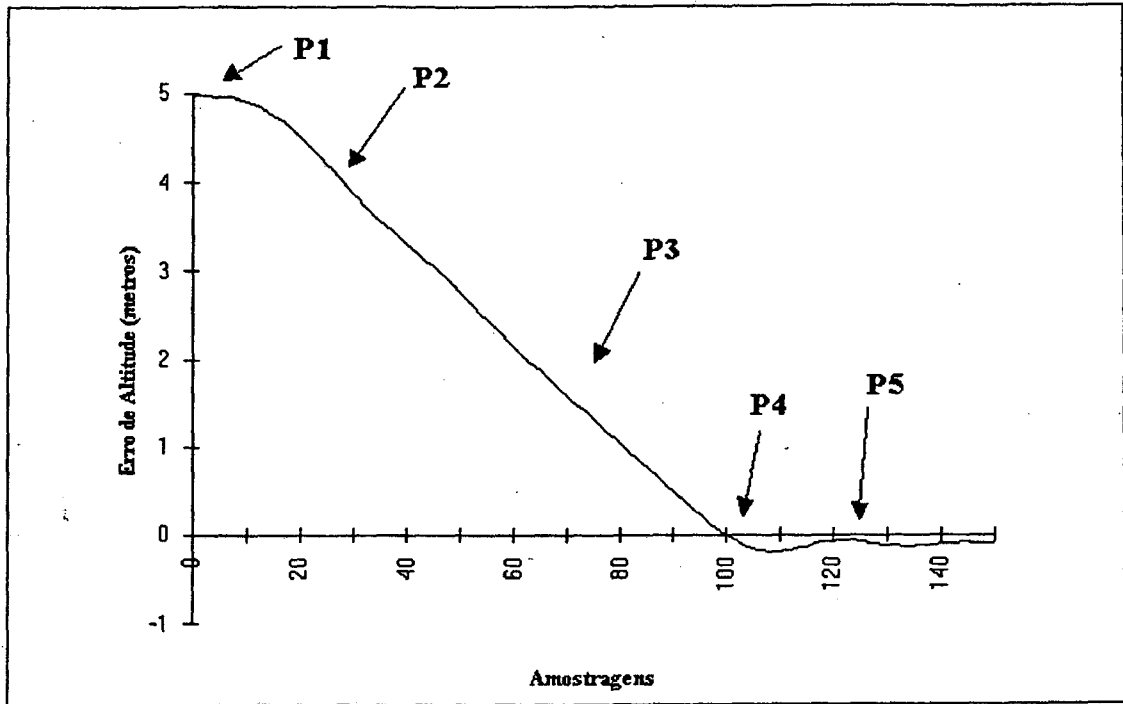


Fig. 5.14 - Simulação da tarefa Decolar após ajustes.

Ainda nessa tabela, percebe-se que as regras ativas em regime permanente possuem erro Positive Small, causando o erro em regime permanente de 35%. Estas regras ativas em regime permanente formam um laço, razão da oscilação após a estabilização.

Examinando o gráfico de erro de altitude versus velocidade de erro de altitude (espaço de estados) na figura 5.12, pode-se associar o pico P1 ao retardo τ causado pela transição entre P2 e P3. Pode-se ver também que o ponto P2 na posição 1.75 m, em torno do qual o sistema oscila em regime permanente, mostra a estabilização com erro em regime permanente. Neste

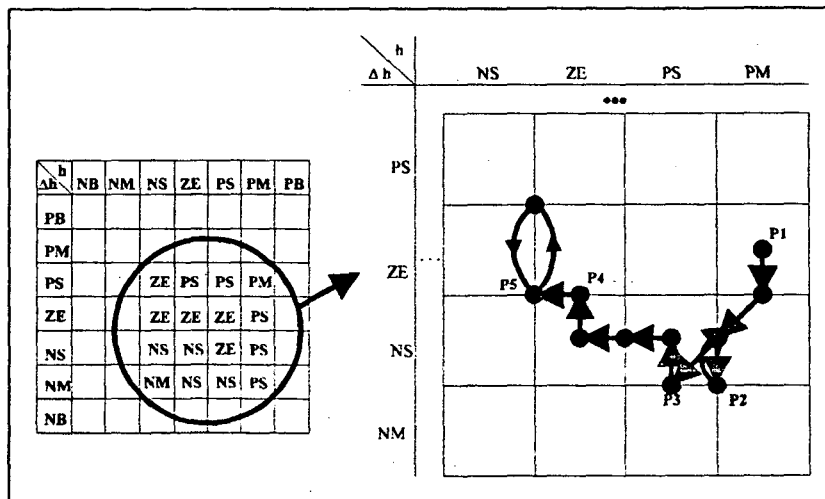


Fig. 5.15 - Evolução das regras da tarefa Decolar após ajustes

gráfico, percebe-se que a velocidade atinge valor máximo da ordem de 1.8 m/s.

Baseado no descrito acima, os ajustes propostos são:

- diminuir a ordem da variável *variação_do_erro_de_altitude*, diminuindo de 10 m/s, para 5 m/s. Os conjuntos desta variável segundo o projeto e após este ajuste são mostrados na figura 5.13.

- alterar a regra de prevenção de sobrepasso:

SE erro_de_altitude PS E variação_do_erro_de_altitude NS ENTÃO variação_do_coletivo NS
para:

SE erro_de_altitude PS E variação_do_erro_de_altitude NS ENTÃO variação_do_coletivo ZE.
Isto forçará o sistema a atingir uma velocidade de aproximação maior, eliminando o retardo r e reduzindo o erro em regime permanente. A prevenção do sobrepasso fica por conta da regra

SE erro_de_altitude ZE E variação_do_erro_de_altitude NS ENTÃO variação_do_coletivo NS;

- estreitar os conjuntos da variável de saída, para reduzir o sobrepasso, tentando fazer com que o comando aumente lentamente, não ultrapassando o valor necessário para manter o erro de altitude em zero. Os conjuntos projetados e os conjuntos após este ajuste são mostrados na figura 5.13;

- estreitar conjunto de erro ZERO, para reduzir o erro em regime permanente. Esta modificação pode causar aumento na oscilação em regime permanente;

- modificar os conjuntos de erro SMALL, fazendo com que exista valores de erro bem próximos de zero que não sejam classificados como Positive Small nem como Negative Small. Esta mudança objetiva reduzir a oscilação em regime permanente. As alterações nos conjuntos da

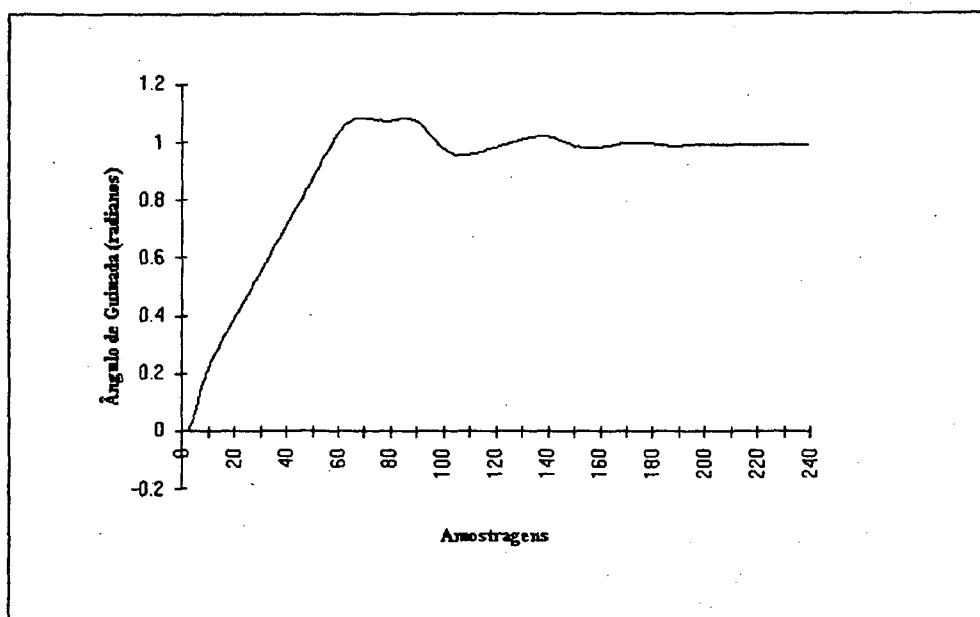


Fig. 5.16 - Simulação da tarefa Guinada

variável erro de altitude são mostrados na figura 5.13, onde se vê os conjuntos projetados e após este ajuste.

A curva do erro de altitude versus amostragens após os ajustes acima pode ser vista na figura 5.14. O erro em regime permanente foi reduzido a menos de 2%, o retardo r deixou de existir e a oscilação em regime permanente, apesar de ainda presente, é de pequena amplitude (5 cm).

O tempo de estabilização não é comprometido e o sobrepasso é da ordem de 4%.

A evolução das regras após o ajuste é mostrada na figura 5.15, onde se vê que a transição responsável pelo retardo r não existe mais. Pode-se notar também que as regras ativas em regime permanente são aquelas com erro de altitude Negative Small e Zero, o que justifica o pequeno erro em regime permanente de aproximadamente 0.10 m.

5.2.2 TAREFA GUINADA E TAREFA PAIRAR

O gráfico do ângulo de guinada no tempo é mostrado na figura 5.16. Este resultado, já ajustado, possui um sobrepasso de 10%, com oscilações até estabilização. O erro em regime permanente é quase nulo e o tempo de estabilização (5.4 s) é considerado bom.

Os gráficos dos erro longitudinal e lateral da tarefa Pairar são mostrados na figura 5.17. Esta tarefa foi a mais difícil de ajustar devido aos atrasos de resposta inerentes ao helicóptero e aos acoplamentos existentes entre os modos lateral e longitudinal.

Os ajustes realizados nos blocos de comandos cíclicos foram basicamente de conjuntos, já que a grande quantidade de regras (135 em cada bloco) dificultou a análise da seqüência de ativação e transição entre as regras. A evolução das regras na tabela lingüística de regras não pode ser utilizada neste caso, já que os blocos de comandos cíclicos possuem quatro variáveis de

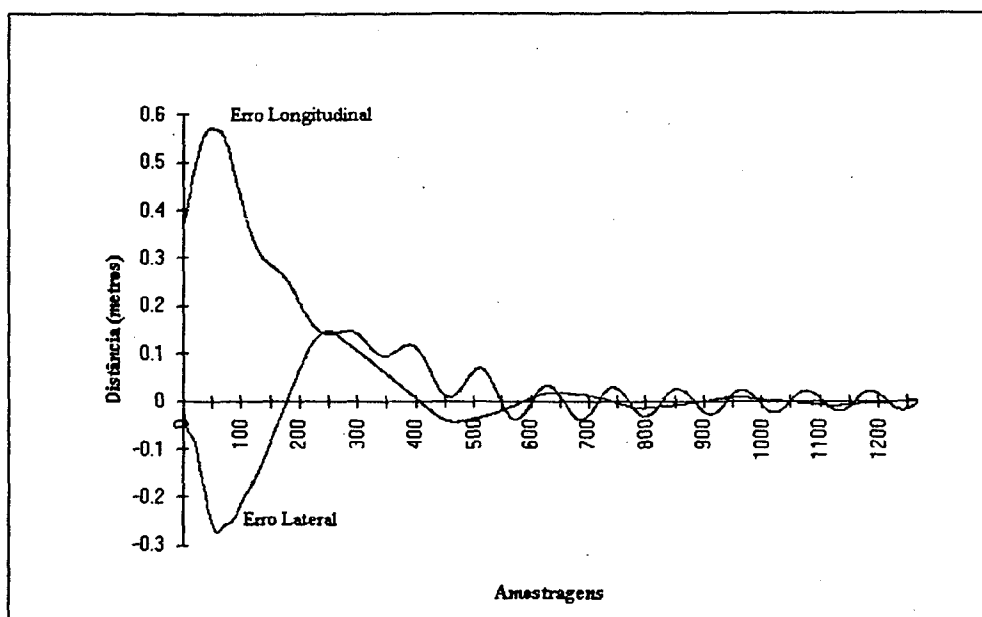


Fig. 5.17 - Simulação tarefa Pairar: erros longitudinal e lateral

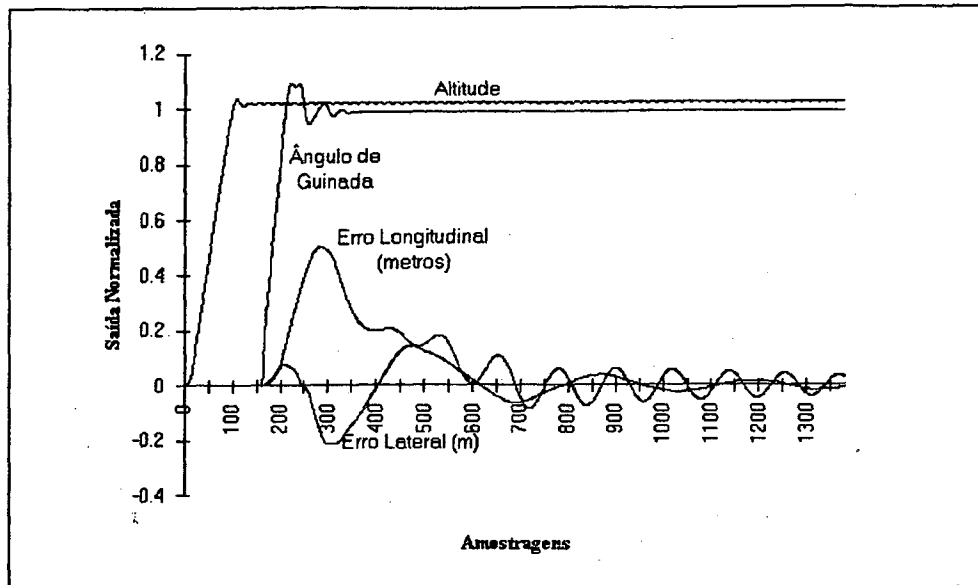


Fig. 5.18 - Simulação da missão

entrada. Assim, somente a resposta no tempo e a trajetória no espaço de estados foram utilizadas.

A curva do erro longitudinal exhibe um erro em regime permanente de aproximadamente 7 cm, com oscilações em torno de 1.5 cm e frequência de 0.20 Hz, aproximadamente. Praticamente não existe sobressaio, havendo oscilações em torno da posição de equilíbrio da ordem de 5 cm.

A curva do erro lateral é bem mais precisa que a do erro longitudinal, com oscilações da ordem de 1cm, mas possui um sobressaio considerável de 50%, que não pode ser reduzido.

5.2.3 SIMULAÇÃO DA MISSÃO

A missão descrita no início desta seção foi simulada e o resultado no tempo pode ser visto na figura 5.18.

A primeira tarefa da missão é Decolar, sendo a curva da altitude a primeira a sofrer alteração na simulação. Quando a altitude se estabiliza dentro do erro previsto, a tarefa Guinada passa a ser executada. A partir daí, a curva do ângulo de guinada se altera.

A partir do momento que se atua no comando de cauda, as curvas de erros longitudinal e lateral se alteram, devido aos acoplamentos descritos no item 4.2.3.f. Conforme explicado naquele item, este acoplamento só é corrigido quando a tarefa Guinada se estabiliza, após a tarefa Parar ser executada.

5.3 CONCLUSÕES

Este capítulo apresenta a implementação do sistema de navegação proposto no capítulo 3, utilizada para simular as bases de conhecimento projetadas no capítulo 4. O algoritmo e a estrutura de dados usada nesta implementação são descritos.

As tarefas foram simuladas separadamente, quando então suas bases de conhecimento sofreram ajustes para melhorar os resultados. Os métodos de análise utilizados foram de valiosa ajuda, pois permitiram verificar quais regras deveriam ser modificadas e quais conjuntos deveriam ser ampliados ou reduzidos, tornando a fase de ajustes menos subjetiva e mais rápida.

Depois, a missão completa foi simulada, o resultado obtido avaliado e julgado satisfatório.

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Neste trabalho foi proposto um sistema de navegação baseado no controle nebuloso de posição e atitude do H2, um helicóptero não tripulado com rotor de 2m da Gyron Tecnologia, com o objetivo de substituir o piloto por um operador menos treinado na tarefa de guiar a aeronave.

O sistema de navegação proposto consiste em um sistema especialista que incorpora o conhecimento do piloto, utilizando lógica nebulosa para modelar a incerteza e imprecisão do raciocínio humano. A base de conhecimento foi projetada através de técnicas de aquisição baseadas em bibliografia especializada e na experiência do piloto.

A complexidade das informações e da estrutura de decisões do sistema de navegação levou a escolha de uma estrutura hierárquica, composta dos seguintes níveis:

- nível de Interpretação de Missão;
- nível de Tarefas;
- nível de Controle.

O nível mais alto encarrega-se da identificação das tarefas que compõe a missão, enquanto o nível de Tarefas as executa. No último nível é utilizado o controlador nebuloso para controle de atitude e posição em função da tarefa sendo executada, sendo este nível o mais discutido neste trabalho.

Foi projetado um protótipo do sistema de navegação proposto, testado em conjunto com o simulador HSIM, da Gyron Tecnologia, com o objetivo de analisar a viabilidade da utilização de lógica nebuloso em navegação de helicópteros. A análise dos resultados de simulação ocorreu através da utilização de um método de auxílio aos ajustes, que mostra a seqüência de ativação das regras na tabela lingüística de regras. Este método mostrou a necessidade de ajustes nas regras e conjuntos. Após estes ajustes, os resultados finais demonstram que o sistema de navegação proposto realiza as tarefas de decolar, mudar o ângulo de guinada e pairar de maneira satisfatória. Tais tarefas foram executadas, dentro de uma precisão escolhida, com um bom desempenho tais como sobrepasso inexistente ou pequeno e erro em regime desprezível.

Pode-se citar como principais contribuições deste trabalho:

- revisão bibliográfica sobre controladores nebulosos, aquisição de conhecimento especialista e sobre helicópteros;
- implementação de uma máquina de inferência de controlador nebuloso, com estrutura da base de dados utilizando lista encadeada e alocação dinâmica de memória;
- proposta de uma estrutura hierárquica para sistema de navegação de helicópteros, baseada em missões de vôo;
- utilização de técnicas de aquisição de conhecimento para desenvolvimento de uma base de conhecimento para o controlador nebuloso proposto;

- desenvolvimento de uma base de conhecimento para controle de posição e atitude de helicópteros, para as tarefas decolar, mudar o ângulo de azimute e pairar;
- proposta de um método de auxílio a fase de ajustes de um controlador nebuloso através da análise da seqüência de disparo das regras na tabela lingüística de regras.

Algumas perspectivas de continuidade deste trabalho são, entre outras:

- a implementação das tarefas vôo a frente e pousar, cujas bases de conhecimento são projetadas;
- otimização das bases de conhecimento, na tentativa de reduzir o número de conjuntos e regras;
- ampliação da validade das regras para outros modelos de helicópteros, utilizando vários pilotos para aquisição de conhecimento e utilizando outros simuladores;
- testes de utilização de outras funções de implicação e composição além das já utilizadas;
- utilização de técnicas de aquisição de conhecimento, conforme citadas no capítulo 4, item 4.1, para representar as incertezas e imprecisões do piloto, de forma a incorporar ao projeto dos conjuntos nebulosos a linguagem do piloto;
- utilização de meta-regras para correção dos acoplamentos, durante a execução das tarefas;
- aprimoramento da ferramenta de análise da evolução das regras, de forma a permitir intercessão de conjuntos não vizinhos e mais de duas variáveis de entrada;
- especificação e desenvolvimento de uma ferramenta genérica de auxílio ao projeto e ajustes de controladores nebulosos, incorporando características de aplicação e ensino;
- desenvolvimento dos níveis de Interpretação de Missão e de Execução de Tarefas, eventualmente integrando sistemas especialistas simbólicos e nebulosos.
- ampliação no nível conceito do nível de Interpretação de Missão com respeito a automação da geração das missões. A partir de pontos no espaço, o sistema de navegação deve inspecionar a seqüência de tarefas necessárias para percorrer estes pontos, gerando automaticamente a missão.
- implantação do sistema proposto a bordo do helicóptero H2, da Gyron Tecnologia.

BIBLIOGRAFIA

- [Aliev et al 91]: R.Aliev, F.T.Aliev, M.Babaev: *Fuzzy Process Control and Knowledge Engineering in Petrochemical and Robotic Manufacturing*, Verlag TÜV Rheinland, Bönn, 1991;
- [Altrock et al 92]: C.von Altrock, B.Krause, H.-J.Zimmermann, "Advanced Fuzzy Logic Control of a Model car in Extreme Situations", *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 48 pp. 41-52, 1992;
- [Andersen and Nielsen 85]: T.R.Andersen and S.B.Nielsen, "An Efficient Single Output Fuzzy Control Algorithm for Adaptative Applications", *Automatica*, vol.21, No.5, pp. 539-545, 1985;
- [Apronix 93]: *Fuzzy Logic- from Concept to Implementation*, Apronix Inc., 1993;
- [Batur and Kasparian `91]: C.Batur and V.Kasparian, "Adaptative Expert Control", *International Journal of Control*, vol. 54, No. 4, pp. 867-881, 1991;
- [Berardenis 92]: L.A.Berardenis, "Clear Thinking on Fuzzy Logic", *Machine Design*, Abril 1992;
- [Bernard 88]: J.A.Bernard, "Use of a Rule-Based System for Process Control", *IEEE Control System Magazine*, vol. 8, No. 5, pp. 3-13, outubro 1988.
- [Braae and Rutherford 79a]: M.Braae and D.A.Rutherford, "Selection of Parameters for a Fuzzy Logic Controller", *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 2, pp. 185-199, 1979.
- [Braae and Rutherford 79b]: M.Braae and D.A.Rutherford, "Theoretical and Linguistic Aspects of the Fuzzy Logic Controller", *Automatica*, vol. 15, pp. 553-577, 1979;
- [Buckley 91]: J.J.Buckley, "Fuzzy I/O Controller", *Fuzzy Sets and Systems*, (?), pp. 127-137, 1991;
- [Cavalcante et al 94]: C.Cavalcante, J. Cardoso, J.J.G.Ramos and O.R.Neves, "Application of Fuzzy Control to Helicopter Navigation", *Proceedings of First Brazil-Japan Joint Symposium on Fuzzy Systems 1994*, pp. 72-76;
- [Cao et al 90]: Z.Cao, A.Kandel, L.Li, "A New Model of Fuzzy Reasoning", *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 36, pp. 311-325, 1990;

- [Chang and Zadeh 72]: S.S.L.Chang and L.A.Zadeh, "On fuzzy mapping and control", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. SMC-2, No. 1, pp. 30-34, January 1972;
- [Chiu et al 91]: S.Chiu, S.Chag, D.Moore, A.Chaudhaary, "Fuzzy Logic for Control of Roll and Moment for a Flexible Wing Aircraft", *IEEE Control Systems*, vol. 11, N° 4, pp. 42-48, June 1991;
- [Collier and Thomas 86]: Collier, L., Thomas, K.: *How to Fly Helicopters - 2nd Edition*, TAB Books Inc., Blue Ridge Summit, 1986;
- [Czogala and Pedrycz 82a]: E.Czogala, W.Pedrycz, "Fuzzy Rules Generation for Fuzzy Control", *Cybernetics and Systems: an International Journal*, vol. 13, pp. 275-293, 1982;
- [Czogala and Pedrycz 82b]: E.Czogala, W. Pedrycz, "Control Problems in Fuzzy Systems", *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 7, pp. 257-273, 1982; ✕
- [DAHUS,1974]: Engineering Design Handbook, Helicopter Engineering, part one, Preliminary Design, Department of the Army Headquarters United States Army Materiel Command, Alexandria, VA, August 1974 (AMCP 706-201);
- [Daley and Gill 86]: S.Daley and K.F.Gill, "A Design Study of a Self-Organizing Fuzzy Logic Controller", *Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers*, vol. 200, No. C1, pp. 59-69, 1986;
- [Dalley and Gill 87]: S.Daley and K.F.Gill, "Attitude Control of a Spacecraft using an Extended Self-Organizing Fuzzy Logic Controller", *Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers*, vol. 201, No.C2, 1987;
- [DeYong et al 92]: M.DeYong, J.Polson, R.Moore, C.C.Wing, J.Lara, "Fuzzy and Adaptive Control Simulations for a Walking Machine", *IEEE Control System*, pp. 43-50, June 1992;
- [Dubois and Prade 88]: D.Dubois and H.Prade, "An Introduction to Possibilistic and Fuzzy Logics", in *Non-Standard Logics for Automated Reasoning*, pp. 288-326, Academic Press Limited, 1988.
- [Dubois and Prade 91]: D.Dubois, H.Prade, "Basic Issues on Fuzzy Rules and Their Application to Fuzzy Control", presented at "Fuzzy Control Workshop", held in Sydney, Australia, 1991;

- [Gupta et al 86]: M.M.Gupta, G.M.Trojan and J.B.Kiszka, "Controlability of Fuzzy Control Systems", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. SMC-16, No.4, pp. 576-583, July/August 1986;
- [He et al 93]: S.Z.He, S.Tan,C.C.Hang, P.Z.Wang, "Control of Dynamical Processes using an On-Line Rule-Adaptative Fuzzy Control System", *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 54, pp. 11-22, 1993;
- [Hickman et al 89]: F.R.Hickman, J.L.Killin, L.Land, T.Mulhall, D.Proter and R.M. Taylor, *Analysis for Knowledge-Based Systems: a Practical Guide to the KADS Methodology*, Ellis Horwood Limited, Sussex, 1989;
- [Higashi and Klir 84]: M.Higashi and G.J.Klir, "Identification of Fuzzy Relations Systems", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. SMC-14, No.2, pp.349-354, March/April 1984;
- [Kahaner 92]: D.Kahaner, "Helicopt.92", mailing list "fuzzy_server@til.com", January 1992;
- [Kahaner and Schwartz 91]: D.Kahaner and D.Schwartz, "Helicopter", mailing list "fuzzy_server@til.com", August 1991;
- [Ketata 92]: R.Ketata: *Methodologies de Regulation Numerique incluant la Logique Floue*, These (Spécialité Automatique-Informatique Industrielle), LAAS-CNRS, Toulouse, France, Juillet 1992;
- [Kickert 79]: W.J.M.Kickert, "Toward an Analysis of Linguistic Modelling", *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 2, pp. 293-307, 1979;
- [Kickert and van Nauta Lemke 76]: W.J.M.Kickert and H.R.van Nauta Lemke, "Application of a Fuzzy Controller in a Warm Water Plant", *Automatica*, vol. 12, pp. 301-308, 1976;
- [Kidd 87]: A.L.Kidd, "Knowledge Acquisition - An Introductory Framework", in *Knowledge Acquisition for Expert Systems - A practical Handbook*, Plenum Press, New York, 1987;
- [Klir and Folger 88]: G.J.Klir and T.A.Folger: *Fuzzy Sets, Uncertainty and Information*, Prentice-Hall, New Jersey, 1988;
- [King and Mandani 77]: P.J.King and E.H.Mandani, "The Application of Fuzzy Control Systems to Industrial Processes", *Automatica*, vol. 13, pp.235-242, 1977.

- [Kröhling 94]: R.A.Kröhling: "Algoritmos de Controle não Convencionais: Estudo de um Problema Clássico", Tese de Mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo, 1994;
- [Larkin 85]: L.I.Larkin, "A Fuzzy Logic Controller for Aircraft Flight Control", in *Industrial Applications of Fuzzy Control*, M.Sugeno, pp. 87-103, North-holland, 1985;
- [Larsen 80]: P.M.Larsen, "Industrial Applications of Fuzzy Logic Control", *International Journal Man-Machine Studies*, vol. 22, pp. 335-363, 1985;
- [Lee 90a]: C.C.Lee, "Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller - Part I", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vo.; 20, No. 2, pp. 404-418, March/April 1990;
- [Lee 90b]: C.C.Lee, "Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller - Part II", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 20, No. 2, pp. 419-435, March/April 1990;
- [Li and Lau 89]: Y.F.Li, C.C.Lau, "Development of Fuzzy Algorithms for Servo Systems", *IEEE Control Systems Magazine*, pp. 65-72, April 1989;
- [Liaw and Wang 91]: C.M. Liaw, J.B.Wang, "Design and Implementation of a Fuzzy Controller for a High Performance Induction Motor Drive", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 21, N° 4, pp 921-928, July/August 1991;
- [Lukasiewicz 75]: J.Lukasiewicz: *Estudios de Lógica y Filosofía*, Biblioteca de La Revista de Occidente, Madrid, 1975;
- [Maiers and Sherif 85]: J.Maiers and Y.S.Sherif, "Applications of Fuzzy Set Theory", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. SMC-15, No.1, pp.175-189, 1985;
- [Mitchell et al 89]: D.G.Mitchell, R.H.Hoh and J.M.Morgan, "Flight Investigation of Helicopter Low-Speed Response Requirements", *J. Guidance*, pp. 623-630, September/October 89;
- [Mizumoto and Zimmermann 82]: M.Mizumoto and H.J.Zimmermann, "Comparison of Fuzzy Reasoning Methods", *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 8, pp. 253-283 82, 1982;
- [Moore and Harris 92]: C.G.Moore and C.J.Harris, "Indirect Adaptive Fuzzy Control", *International Journal of Control*, vol. 56, No.2, pp. 441-468, 1992;

- [Ogata 82]: K.Ogata: *Engenharia de Controle Moderno*, Prentice/Hall do Brasil Ltda., Rio de Janeiro, 1982;
- [Olson and Rueter 87]: J.R.Olson, H.H.Rueter, "Extracting Expertise from Experts: Methods for Knowledge Acquisition", *Expert Systems*, vol. 4, N° 3, pp. 152-168, August 1987;
- [Pallet 83]: E.H.J.Pallet, *Automatic Flight Control*, Granada, Herts, 1983;
- [Pappis and Mandani 77]: C.P.Pappis and E.H.Mandani, "A Fuzzy Logic Controller for a Traffic junction", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. SMC-7, No.10, pp. 707-717, October 1977;
- [Pedrycz 81]: W.Pedrycz, "An Approach to the Analysis of Fuzzy Systems", *International Journal of Control*, vol. 34, No.3, pp. 403-421, 1981;
- [Pedrycz 84]: W. Pedrycz, "An Identification Algorithm in Fuzzy relational System", *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 13, pp. 153-167, 1984;
- [Pedrycz 85]: W.Pedrycz, "Structured Fuzzy Models",—*Cybernetics and Systems: an International Journal*, vol. 16, pp. 103-117, 1985;
- [Pedrycz 89]: W.Pedrycz: *Fuzzy Control and Fuzzy Systems*, Research Studies Press Ltda., Jonh Wiley, New York, 1989;
- [Procyk and Mandani 79]: T.J.Procyk and E.H.Mandani, "A linguistic Self-organizing Process Controller", *Automatica*, vol. 15, No. 1, pp.15-30, January 1979;
- [Prouty 90]: R.W.Prouty: *Helicopter Performance, Stability and Control*, Robert E. Krieger Publishing Company, Malabar, Florida 90;
- [Raju et al 91]: G.V.S.Raju, J.Zhou and R.A.Kisner, "Hierarchical Fuzzy Control", *International Journal of Control*, vol. 54, No4, pp. 867-881 91;
- [Ray et al 84]: K.S.Ray, A.M.Ghosh and D.D.Majumder, "L2-Stability and the Related Design Concept for SISO Llinear System Associated with Fuzzy Logic Controller", *IEEE Transactions on Systems, man and Cybernetics*, vol. SMC-14, No.6, pp.932-939, November/December 1984;

- [Ray and Majunder 84]: K.S.Ray and D.D.Majunder, "Application of Circle Criteria for Stability of Linear SISO and MIMO Systems associates with Fuzzy Logic Controller", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. SMC-14, No. 2, pp. 343-355, March/April 1984;
- [van de Rhee et al 90]: F. van de Rhee, H.R. van Nauta Lemke and J.G.Dijkman, "Knowledge Based Fuzzy Control of systems", *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 35, No. 2, pp. 148-155, February 1990;
- [Ruan and Kerre 93]: D.Ruan, E.E.Kerre, "Fuzzy Implication Operators and Generalized Fuzzy Method of Cases", *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 54, pp. 23-27, 1993;
- [Rutherford and Bloore 76]: D.A.Rutherford and G.C.Bloore, "The Implementation of Fuzzy Algorithms for Control", *Proceedings of the IEEE*, pp. 572-573, April 1976;
- [Santoro 92]: F.G.Santoro: "Aplicação da Técnica de Atribuição de Auto-estrutura Completa no Projeto de Sistemas Reguladores e Controladores de Vôo de Helicópteros", Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1992;
- [Schüler 81]: D.Schlüter: *Schlüter's Radio Controlled Helicopter Manual*, Argus Books Ltd., London, 1981.
- [Schwartz and Klir 92]: D.G.Schwartz and G.J.Klir, "Fuzzy Logic Flowers in Japan", *IEEE Spectrum*, pp. 32-35, July 1992;
- [Scliar-Cabral 91]: L.Scliar-Cabral: *Introdução a Psicolinguística*, Editora Ática, São Paulo 91;
- [Self 90]: K.Self, "Designing with Fuzzy Logic", *IEEE Spectrum*, pp. 42-44 e 105, November 1990;
- [Shao 88]: S.Shao, "Fuzzy Self-Organizing Controller and its Application for Dynamic Processes", *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 26, pp. 151-164, 1988;
- [Sibigtroth 92]: J.M.Sibigtroth, "Implementing Fuzzy Expert Rules in Hardware", *AI Expert*, pp. 25-31, April 1992;
- [Sripada et al 87]: N.R.Sripada, D.G.Fisher and A.J.Morris, "AI Application for Process Regulation and Servo Control", *IEE Proceedings*, vol. 134, Pt. D, No. 4, pp.251-259, July 1987;

- [Sugeno et al 1993]: M.Sugeno, M.F.Griffin, A.Bastian, "Hierarchical Control of an Unmanned Helicopter", presented at 17th IFSA World Congress, pp.179-182, 1993;
- [Sugeno and Kang 86]: M.Sugeno and G.T.Kang, "Fuzzy Modeling and Control of Multilayer Incineration", *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 18, pp. 329-346, 1986;
- [Sugeno and Nishida 85]: M.Sugeno and M.Nishida, "Fuzzy Control of Model Car", *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 16, pp. 103-113, 1985;
- [Takagi and Sugeno 83]: T.Takagi and M.Sugeno, "Derivation of Fuzzy Control Rules from Human Operator's Control Actions", in *Proc. of the IFAC Symp. on Fuzzy Information Knowledge Representation and Decision Analysis*, Marseilles, France, pp. 55-60, July 83;
- [Takagi and Sugeno 85]: T.Takagi and M.Sugeno, "Fuzzy Identification of Systems and its Application to Modeling and Control", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. SMC-15, No. 1, pp. 116-132, January/February 1985;
- [Tanaka and Sugeno 92]: K.Tanaka, M.Sugeno, "Stability Analysis and Design of Fuzzy Control Systems", *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 45, pp. 135-156, 1992;
- [Tang and Mulholland 87]: K.L.Tang, R.J.Mulholland, "Comparing Fuzzy Logic with Classical Controller Design", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. SMC-17, N°6, pp. 1085-1087, November/December 1987;
- [Togai Infralogic 92]: Togai Infralogic, "Motor Control: Fuzzy Logic Wins out over Classical Method", mailing list "fuzzy_server@til.com", 1992;
- [Togai and Wang 85]: M.Togai, P.P.Wang, "Analysis of a Fuzzy Dynamic System and Synthesis of its Controller", *International Journal Man-Machine Studies*, vol. 22, pp. 335-363, 1985;
- [Tong 76]: R.M.Tong, "Analysis of Fuzzy Control Algorithms using the Relation Matrix", *International Journal Man-Machine Studies*, N° 8, pp. 679-686, 1976;
- [Tong 77]: R.M.Tong, "A Control Engineering Review of Fuzzy Systems", *Automatica*, vol. 13, pp.559-569, 1977;
- [Tong 78a]: R.M.Tong, "Analysis and Control of Fuzzy Systems using Finite Discrete Relations", *International Journal of Control*, vol. 27, No. 3, pp.431-440, 1978;

- [Tong 78b]: R.M.Tong, "Synthesis of Fuzzy Models for Industrial Processes - some Recent Results", *International Journal General Systems*, vol. 4, pp. 143-162, 1978;
- [Tong 80a]: R.M.Tong, "Some Properties of Fuzzy Feedback Systems", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. SMC-10, No.6, pp.327-330, June 1980;
- [Tong 80b]: R.M.Tong, "The Evaluation of Fuzzy Models Derived from Experimental Data", *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 4, pp. 1-12, 1980;
- [Tong et al 80]: R.M.Tong, M.B.Beck and A.Latten, "Fuzzy Control of the Activated Sludge Wastewater Treatment Process", *Automatica*, vol.16, No. 6, pp. 695-701, November 1980;
- [Tradelius 88]: P.Tradelius, "Basics of Radio Control Helicopters", Publishers of Model Airplane News Magazine, 1988;
- [Vachtsevanos 93]: G.Vachtsevanos, S.S.Farinwata, D.K.Pirovolou, "Fuzzy Logic Control of an Automotive Engine", *IEEE Control Systems*, vol. 13, N° 3, pp. 62-68, June 1993;
- [Viot 93]: Greg Viot, "Fuzzy Logic in C", *Dr. Dobb's Journal*, February 1993;
- [Waterman 86]: D.A.Waterman: *A Guide to Expert System*, Addison-Wesley Publishing Company, Massachusetts 86;
- [Weiss and Kulikowski 84]: S.M.Weiss, C.A.Kulikowski, "A practical Guide to Designing Expert Systems", Rowman & Allanheld Publishers, New Jersey, 1984;
- [Xu and Lu 87]: C.Xu and Y.Lu, "Fuzzy Model Identification and Self-Learning for Dynamic Systems", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, SMC-17, No.4, pp 683-685, November/December 1987.
- [Ying et al 90]: H.Ying, W.Siler and J.J.Buckley, "Fuzzy Control Theory: a Nonlinear Case", *Automatica*, vol. 26, No. 3, pp. 513-520, 1990;
- [Yoshida and Wakabayashi 92]: S.Yoshida, N.Wakabayashi, "A Fuzzy Logic Controller for a Rigid Disk Drive", *IEEE Control Systems*, pp. 65-70, June 1992;
- [Zadeh 73]: L.A.Zadeh, "Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. SMC-3, No. 1, pp. 28-44, January 1973;

-
- [Zadeh 84]: L.A.Zadeh, "Making Computers Think like People", *IEEE Spectrum*, pp. 26-32, August 1984.