

**WAGNER JOSÉ GOMES PEREIRA**

**UM ESTUDO DA APLICAÇÃO DE CONTROLADOR FUZZY EM PILOTO AUTOMÁTICO  
DE SUBMARINO**

**Dissertação apresentada à Escola Politécnica  
da Universidade de São Paulo para a obtenção  
do Título de Mestre em Engenharia**

**São Paulo  
2004**

**WAGNER JOSÉ GOMES PEREIRA**

**UM ESTUDO DA APLICAÇÃO DE CONTROLADOR FUZZY EM PILOTO AUTOMÁTICO  
DE SUBMARINO**

**Dissertação apresentada à Escola Politécnica  
da Universidade de São Paulo para a obtenção  
do Título de Mestre em Engenharia**

**Área de Concentração;  
Engenharia Naval**

**Orientador:  
Prof. Titular  
Hernani L. Brinati**

**São Paulo  
2004**

A minha esposa e aos meus cachorros prin, mi, e bom.

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Hernani L. Brinati e ao Prof. Dr Ademar Ferreira, pelas diretrizes seguras e permanente incentivo.

A minha esposa pelo estímulo e incansável apoio.

A todos que direta e indiretamente, colaboraram na execução deste trabalho.

## RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo estabelecido para a pesquisa o desenvolvimento e estudo da aplicação de controlador "fuzzy" para um submarino em manobras de profundidade. Mas do que projetar um controlador ideal que atue em uma planta específica, este trabalho busca estudar as diversas formas como pode ser projetado um controlador "fuzzy" tanto em modelo lineares como em modelos não lineares.

São estabelecidas missões para o controlador : manutenção de uma dada profundidade ( cota periscópica ) e manobra de mudança de cota.

A aplicação do piloto nos submarinos em manobras de profundidade permite que estas manobras fiquem mais precisas e econômicas.

Os testes realizados a partir das simulações de manobras do submarino mostraram que o piloto automático tem um bom desempenho inclusive em condições ambientais diversas .

## ABSTRACT

The main research point of this following piece of work is to develop and study the application of the “fuzzy” controller for submarine depth manoeuvrings. More than projecting and ideal controller acting in a specific plan , this present work seeks the study and analysis of the many forms for which a fuzzy controller can be projected to , considering the linear and non-linear models.

During this research, different missions are going to be established for the controller , such as: keeping a certain depth ( periscope quota); and quota change manoeuvring.

The application of pilot to the submarines in depth manoeuvres are going to allow such manoeuvres to be kept in a more economical and precise way.

In conclusion , accordingly to the submarine manoeuvring simulations , we shall demonstrate that the automatic pilot possess a good performance even when submitted to adverse weather situations.

PEREIRA, Wagner José Gomes.

Um estudo da aplicação de controlador fuzzy em piloto automático de submarino. São Paulo, 2004.

100 fls.

Dissertação – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Naval.

1. Controle Fuzzy. 2. Piloto automático. 3. Modelagem de submarino.

I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Naval.

CDD

<b>CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Identificação do problema</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Revisão bibliográfica</b>	<b>3</b>
<b>1.3 Objetivo do trabalho</b>	<b>7</b>
<b>1.4 Seqüência de trabalho</b>	<b>8</b>
<b>1.5 Escolha da metodologia</b>	<b>9</b>
<b>CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b>	<b>12</b>
<b>2.1. Conceitos da Lógica "Fuzzy"</b>	<b>12</b>
<b>2.1.1 Princípios matemáticos da Incerteza</b>	<b>12</b>
a) Incerteza estocástica	12
b) Incerteza Léxica	13
<b>2.1.2 Lógica "Fuzzy" como lógica humana</b>	<b>15</b>
<b>2.1.3 Um conjunto "Fuzzy"</b>	<b>15</b>
<b>2.2 Fundamentos de Sistemas "Fuzzy"</b>	<b>17</b>
<b>2.2.1 Normas triangulares</b>	<b>18</b>
<b>2.2.2 Metodologia de controle "Fuzzy"</b>	<b>18</b>
a) Codificador	20
b) Mecanismo de inferência:	21
b1) Implicação	21
b2) Agregação das regras	22
c) Decodificador	24
<b>CAPÍTULO 3 - DINÂMICA DO MOVIMENTO DO SUBMARINO</b>	<b>29</b>
<b>3.1 Equações do movimento</b>	<b>30</b>
<b>3.1.1 Descrição do movimento</b>	<b>30</b>
<b>3.1.2 Considerações Gerais</b>	<b>32</b>
<b>3.2 Modelos matemáticos</b>	<b>35</b>
<b>3.2.1 Modelo completo</b>	<b>36</b>
a) Casco	36



<b>b) Propulsor</b>	<b>36</b>
<b>c) Máquina do leme</b>	<b>37</b>
<b>3.2.2 Linearização da Modelo</b>	<b>38</b>
<b>3.2.3 Modelo matemático dos efeitos ambientais</b>	<b>40</b>
<b>3.3 Implementação dos Modelos</b>	<b>41</b>
<b>3.3.1 Modelos no software utilizado</b>	<b>42</b>
<b>3.3.2 Validação dos modelos</b>	<b>44</b>
<b>CAPÍTULO 4 PROJETO DO SISTEMA DE CONTROLE</b>	<b>45</b>
<b>4.1 Concepção do sistema de controle</b>	<b>45</b>
<b>4.2. Estrutura do controlador</b>	<b>49</b>
<b>4.2.1 Controlador fuzzy tipo 1 ( duas entradas )</b>	<b>50</b>
<b>4.2.2 Controlador fuzzy tipo 2 ( 3 entradas )</b>	<b>57</b>
<b>4.3 Controlador fuzzy para o modelo não linear</b>	<b>63</b>
<b>4.4 Projeto dos controladores</b>	<b>64</b>
<b>CAPÍTULO 5 - AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE</b>	<b>67</b>
<b>5.1- Testes de validação</b>	<b>67</b>
<b>5.2 Mudança de profundidade</b>	<b>69</b>
<b>5.2.1 Escolha dos parâmetros de análise</b>	<b>70</b>
<b>5.2.2 Requisitos Mínimos</b>	<b>72</b>
<b>5.2.3 Resultados dos testes</b>	<b>72</b>
<b>5.3 Manutenção de profundidade</b>	<b>80</b>
<b>5.3.1 Escolha dos parâmetros de análise</b>	<b>81</b>
<b>5.3.2 Requisitos mínimos</b>	<b>82</b>
<b>5.3.3 Resultados dos testes</b>	<b>82</b>
<b>5.4 Análise dos resultados</b>	<b>91</b>
<b>CAPÍTULO 6- CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b>	<b>94</b>
<b>6.1 Síntese do trabalho</b>	<b>94</b>
<b>6.2 Principais conclusões</b>	<b>96</b>

<b>6.2.1 Aspectos gerais</b>	<b>96</b>
<b>6.2.2 Controladores</b>	<b>97</b>
<b>6.2.3 Testes de avaliação</b>	<b>99</b>
<b>6.3 Recomendações</b>	<b>100</b>

**Lista de anexos**

Anexo A	Valores adotados e derivadas hidrodinâmicas	102
Anexo B	Equações de movimento	104
Anexo C	Equações auxiliares	107
Anexo C1	Equação do propulsor	108
Anexo D	Modelos	109
Controlador f1	modelo linear mudança de profundidade	110
Controlador f1	modelo não linear mudança de profundidade	111
Controlador f2	modelo linear mudança de profundidade	112
Controlador f2	modelo não linear mudança de profundidade	113
Controlador f1	modelo linear manutenção de profundidade	114
Controlador f1	modelo não linear manutenção de profundidade	115
Controlador f2	modelo linear manutenção de profundidade	116
Controlador f2	modelo não linear manutenção de profundidade	117

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Conjunto "Fuzzy" simples	16
Figura. 2.2 Controlador "fuzzy"	19
Figura 2.3 Variável de entrada TEMPERATURA	20
Figura 2.4 Exemplo de implicação do tipo MIN	22
Figura 2.5 Agregação de regras	24
Figura 2.6 Cálculo pelos métodos CoM e MoM (Lin, 1996)	26
Figura 2.7 Formas diferentes de defuzzificação	27
Figura 3.1 Eixos de coordenadas	30
Figura 3.2 Variáveis do movimento	31
Figura 3.3 Ângulo de leme	32
Figura 4.1 Variáveis "fuzzy" para o controlador F1.	51
Figura 4.2 Variável Erro de profundidade	52
Figura 4.3 Variável taxa de variação de profundidade	53
Figura 4.4 variável de saída :ângulo de leme	53
Figura 4.5 janela do TOOLBOX/MATLAB para edição de regras	55
Figura 4.6 Controlador "fuzzy" (duas entradas) atuando no modelo linear tipo M2	57
Figura 4.7 Variável Caturro - Controlador Fuzzy tipo 2	58
Figura 4.8 Controlador FUZZY TIPO 2 atuando no modelo M1	59
Figura 4.9 Janela de variáveis do TOOLBOX para o controlador FUZZY TIPO 2.	60
Figura 4.10 janela do TOOLBOX referente a edição das regras para o controlador FUZZY TIPO 2.2	63
Figura 4.11 atuação do Controlador FUZZY TIPO 2 no modelo M4	64
Figura 5.1 Manobra de mudança de profundidade	69
Figura 5.2 Controlador F1 aplicado ao modelo linear (profundidade)	73
figura 5.3 Controlador F1 aplicado ao modelo linear (leme e caturro)	74
Figura 5.4 Controlador F1 aplicado ao modelo não linear (profundidade)	75

Figura 5.5 Controlador F1 aplicado ao modelo não linear (leme e caturro)	75
Figura 5.6 Controlador F2 aplicado ao modelo linear (profundidade)	76
figura 5.7 Controlador F2 aplicado ao modelo linear (leme e caturro)	77
Figura 5.8 Controlador F2 aplicado ao modelo não linear (profundidade)	77
Figura 5.9 Controlador F2 aplicado ao modelo não linear (leme e caturro)	78
Figura 5.10 Manobra de manutenção controlador F1 aplicado ao modelo linear (profundidade)	83
Figura 5.11 Manobra de manutenção controlador F1 aplicado ao modelo linear (leme e caturro)	84
Figura 5.12 Manobra de manutenção controlador F1 aplicado ao modelo não linear (profundidade)	84
Figura 5.13 Manobra de manutenção controlador F1 aplicado ao modelo não linear (leme e caturro)	85
Figura 5.14 Manobra de manutenção controlador F2 aplicado ao modelo linear (profundidade)	86
Figura 5.15 Manobra de manutenção controlador F2 aplicado ao modelo linear (leme e caturro)	86
Figura 5.16 Manobra de manutenção controlador F2 aplicado ao modelo não linear (profundidade)	87
Figura 5.17 Manobra de manutenção controlador F2 aplicado ao modelo não linear (leme e caturro)	88
Figura 5.18 Modelo linear sem Controle (leme)	88
Figura 5.19 Modelo linear sem Controle (profundidade)	89
Figura 5.20 Modelo não linear sem Controle (profundidade)	89
Figura 5.21 Modelo não linear sem Controle (leme)	90

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 2.1 Comparação entre métodos de decodificação	28
Tabela 4.1 Características dos controladores "fuzzy"	48
Tabela 4.2 Características dos modelos	48
Tabela 4.3 . Regras fuzzy para o controladores TIPO 2	61
Tabela 5.1 Resultados da manobra de mudança de profundidade	79
Tabela 5.2 Resultados para a manobra de manutenção de profundidade	91

## CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 Identificação do Problema

Um corpo submerso está submetido a forças e a momentos que sobre ele atuam de forma contínua. Estas forças e momentos podem ser de natureza hidrostática ou hidrodinâmica. As forças e momentos de natureza hidrostática estão presentes em qualquer corpo submerso enquanto os de natureza hidrodinâmica ocorrem somente quando existe movimento relativo entre o corpo e o fluido. Um corpo submerso em movimento próximo à superfície do mar fica sujeito a esforços de ondas de natureza estocástica. Mas se o movimento do corpo submerso ocorre distante da superfície do mar, ele é influenciado somente pela ação de corrente, que neste caso pode ser admitida como constante em direção e intensidade.

Como um submarino deve possuir um comportamento especificado e ainda cumprir uma missão, torna-se importante não só a previsão correta das forças e momentos que atuam sobre ele, como é necessário também determinar eventuais perturbações que possam alterar o seu comportamento e influenciar seu desempenho.

Para minimizar os efeitos das perturbações, os submarinos são dotados de superfícies de controle (chamadas lemes) cuja deflexão gera forças e momentos sobre o veículo procurando restaurar ou manter a trajetória desejada. Estes elementos de controle podem ser acionados de forma manual ou automática.

Inicialmente o controle dos submarinos era feito de forma manual; contudo, este tipo de controle manual ficou ultrapassado em submarinos militares. Assim, a ação do piloto humano deve estar, se possível, restrita a manobras de adestramento ou ainda no caso de eventuais avarias no sistema automático, já que implica em um gasto considerável de homens-hora.

O acionamento dos lemes horizontais, para controle da profundidade, geralmente mobilizava dois operadores, um acionando os lemes horizontais de vante, que controlava a profundidade, e um outro, acionando os lemes de ré controlando o ângulo de caturro

do submarino. Deste modo, para que qualquer manobra no plano vertical fosse realizada com eficiência, era necessário que os homens fossem peritos no ofício e ainda que trabalhassem em perfeita sintonia. Os submarinos atuais são dotados de sistemas de controle acionados por um único operador "One Man Control". Neste caso, utiliza-se um elemento de comando tipo "manche" de avião para atuação nos lemes horizontais e verticais. Ao se movimentar o "manche" para frente ou para trás são acionados os lemes horizontais. Ao se movimentar o "manche" para direita ou esquerda é acionado o leme vertical.

Com a modernização dos meios navais e o surgimento de novas tecnologias de armas e sensores surgiu uma crescente preocupação com a melhoria operativa dos diversos tipos de embarcações de combate. As embarcações modernas passaram a incorporar características como alta velocidade, excelente manobrabilidade e melhor capacidade de ataque. Com isto, foram criados novos critérios operativos para os diversos meios navais o que implicou em novos requisitos de construção, principalmente os relacionados com a manobrabilidade. Esta mudança na concepção dos novos meios navais se fez presente também no submarino de guerra. Ele era empregado antes em operações onde se posicionava previamente em um ponto da rota do inimigo e com uma espera silenciosa conseguia atacar os navios inimigos. O elemento surpresa era a principal característica operacional dos submarinos. Com a evolução natural dos meios navais o submarino moderno passou a ter maior velocidade, agilidade e flexibilidade possibilitando que ataque pela retaguarda da força inimiga e possa de forma rápida e segura, se retirar mediante manobras mais ágeis e precisas. Houve também um crescimento nas dimensões dos navios e surgiram alterações na forma do casco que diminuem a possibilidade de detecção e aumentam a capacidade de transportar armamento e sensores. Por tudo que foi exposto fica clara a importância do estudo do controle nos meios navais modernos

É importante ressaltar que a modelagem, simulação e construção de um piloto-automático estão intimamente ligadas aos anseios de dominar toda a tecnologia de construção de submarinos, sejam eles convencionais ou nucleares. Deve-se atentar para



o fato de que o estudo do controle de uma embarcação (empregado em épocas anteriores apenas no dimensionamento do próprio sistema de controle) tem crescido em importância no projeto completo do submarino. Características operacionais e de manobrabilidade como velocidade de descida, tempo de retomada de uma dada profundidade etc. são requisitos extremamente importantes em um submarino militar já que hoje um submarino é um veículo militar de grande flexibilidade e habilidade podendo atuar com destreza e rapidez em diversos cenários de operação de combate. Isto é necessário no moderno teatro de operações de guerra a que são submetidos os meios operacionais navais. Disto surge a necessidade progressiva do estudo do comportamento do submarino visando permitir a correta execução de diversas manobras. Estes novos requisitos operacionais (que derivam da manobrabilidade do submarino) cresceram de tal forma em importância que o Sistema de Controle que possibilita a execução das manobras passa ser de valor vital para o desempenho operacional do submarino e assim influencia inclusive nas dimensões e características principais do submarino.

Uma atuação automática nas superfícies de controle pode ser estabelecida com um Sistema de Guiagem Automática, comumente chamado de "piloto automático", que através de informações obtidas dos sensores e com a utilização de um sistema de processamento permite o cálculo dos valores a serem comandados nos elementos de controle. O sistema de guiagem possibilita ao submarino cumprir a missão especificada, mesmo quando sujeito a perturbações de ordem externa e de natureza aleatória como ocorre quando o submarino está sujeito à ação das ondas do mar. A utilização de técnicas modernas de controle envolvendo lógica "fuzzy" merece ser examinada, haja vista a complexidade do modelo e a facilidade com que estas técnicas podem ser empregadas em problemas de guiagem de veículos terrestres ( Mandami , 1996 ) , ( Kosko , 1992 ) , ( Pedrycz , 1998 ) , ( Lin , 1996 ) .

## **1.2 Revisão bibliográfica**

No decorrer dos últimos anos houve um aumento considerável na produção

literária e científica de trabalhos e estudos na área de manobrabilidade de embarcações. Isto foi impulsionado pelos novos requisitos operacionais exigidos dos meios navais. Em paralelo, tem-se a cada dia novas aplicações de lógica "fuzzy" principalmente em problemas de controle e de identificação de padrões. A vasta bibliografia encontrada serviu de base para a condução deste trabalho. A seguir será apresentada uma pequena revisão dos trabalhos já realizados e que apresentam uma correlação mais forte com a proposta desta dissertação.

Dentre os diversos artigos e trabalhos relacionados com modelagem e controle de submarinos são destacados os seguintes.

Viana (1983) elaborou um modelo para análise da trajetória e controle automático de um submarino, empregando um modelo linear para o movimento do veículo. Apesar deste modelo não representar com precisão alguns tipos de manobras, ele serve como parâmetro inicial de avaliação do controle.

Gueler (1987) implementa um piloto-automático para manobras de submarinos no plano vertical, com a utilização de técnicas de controle ótimo para o projeto do controlador e o filtro de Kalman para estimar o estado do sistema.

Canhetti (1998) utiliza controle tipo PID em um Modelo Livre de submarino linearizado. Este modelo linearizado permite, através do desacoplamento dos diversos movimentos, a análise dos movimentos do submarino de forma isolada e assim facilita o projeto de controladores específicos para um deles.

Papoulias (1995) apresenta diversos trabalhos na área de controle, compreendendo o estudo de estabilidade de submarinos no plano vertical, além de ter se dedicado também ao estudo das não linearidades envolvidas no movimento vertical de submarinos.

Russell et alli (1981) apresentam a descrição de um procedimento de simulação para investigar o movimento de um submersível não tripulado em seis graus de liberdade. O veículo é controlado remotamente em tempo real por meio de um operador,

que envia os sinais de controle para o computador, por meio de manches, enquanto observa o movimento do veículo em terminais de vídeo.

Summey et alli (1981) apresentam métodos teóricos-empíricos para o cálculo de coeficientes hidrodinâmicos de veículos submersos e aplicam estas técnicas no projeto, fabricação e teste de um veículo submerso rebocado.

Kazerooni (1981) apresenta um procedimento de simulação de veículos submersíveis e caracteriza várias tarefas de controle automático do veículo, entre as quais pode-se citar acompanhamento do fundo do oceano, isto é, guiagem do veículo a uma distância constante de um dado contorno sólido.

Carmichael et alli (1981) descrevem o ROBOT II, um submarino não tripulado cuja missão principal é a inspeção e comunicação. O submarino opera sob a supervisão de um micro computador baseado no microprocessador Z80, cujas tarefas são: piloto automático, controle dos tanques de lastro e controle de comunicações. O sistema é capaz de responder a uma série de comandos recebidos da base firme de terra.

A descrição da dinâmica e de sistemas de controle para outros submarinos não tripulados pode ser encontrada nos trabalhos de Nodland et alli (1981), Glynn et alli (1981), Hattori (1981) e Nomoto (1981). Alguns destes veículos são dotados de manipuladores para recolhimento de material do fundo do oceano ou para reparos em estruturas oceânicas. Trabalhos sobre manipuladores podem ser encontrados em Collins (1981), Iwanowski (1981), Yoerger (1981) e Eppig (1981).

A seguir são mencionados alguns trabalhos relacionados com o controle para navios de superfície.

Bildberg (1981) examina a utilização de microprocessadores em veículos autônomos não tripulados e analisa o impacto deste advento sobre a capacidade das missões e os avanços na comunicação, navegação e controle.

Russel et alli (1981) apresentam um sistema de controle para veículo não

tripulado. É descrita uma estratégia de controle e guiagem, baseada em prioridades que definem níveis hierárquicos de controle para satisfazer os vários objetivos do controlador.

Sotelo (1976) estudou a modelagem do timoneiro sob o enfoque da "Teoria de Controle Moderno", resolvendo um problema de controle ótimo, por processo numérico, com o objetivo de obter funções de controle do leme similar àquela executada por controlador humano ao conduzir embarcações em canal.

Cruz (1981) desenvolveu um piloto automático para embarcações de superfície, com emprego de conceitos de controle estocástico, sendo o movimento da embarcação descrito através do modelo clássico das derivadas hidrodinâmicas proposto por Abkowitz (1972).

Brinati (1991) desenvolve um estudo completo e complexo sobre a dinâmica de diversos veículos navais desde navios de superfície passando por plataformas e abordando inclusive aspectos da dinâmica de submarinos e a aplicabilidade de um piloto automático.

Na área de lógica "fuzzy" e controle "fuzzy", vale destacar os seguintes trabalhos.

Kang (1993) estabeleceu critérios para o estudo da estabilidade e controle de sistemas dinâmicos por células de transição em hipercubos. Kosko (1992) estudou e implementou diversas aplicações de controladores tipo "fuzzy" em sistemas lineares.

Tanaka e Sano (1992) apresentam um estudo da estabilidade de sistemas não lineares quando utilizando um controlador "fuzzy" com feedback.

Ferreira (1999) apresenta um sistema de controle "fuzzy" de sinais de trânsito, onde se analisa a conveniência de tecnologia "fuzzy" para realizar esta tarefa. Neste trabalho é previsto um controle incremental independente de cada um dos parâmetros de

tempo dos sinais.

Deve-se observar que nenhum dos trabalhos acima aborda especificamente a utilização de controle "fuzzy" em veículos oceânicos e, especialmente, em submarinos. Existem diversas técnicas empregadas no controle de embarcações mediante piloto automático, dentre elas, podendo ser citados, por exemplo: a utilização por Sotelo (1976) e Gueler (1987) de controle ótimo, o emprego por Cruz (1981) de controle estocástico para a pilotagem automática de embarcações, o uso por Canhetti (1998) de um controlador tipo PID. Outro exemplo tem sido o estudo de Papoulias (1995) na utilização das mais diversas formas de controle clássico e de controle moderno na pilotagem automática de submarinos.

A utilização de controle "fuzzy", tem ficado, na maioria dos casos, restrita a plantas linearizadas e com ausência de perturbações ou ainda em problemas de tomada de decisão ou de classificação, chamados erroneamente de problemas de controle.

### **1.3 Objetivo do trabalho**

O objetivo principal deste trabalho é projetar um sistema de guiagem automática para um submarino no plano vertical baseado em controle "fuzzy". As duas missões básicas a serem desempenhadas pelo submarino são manutenção de profundidade sob a influência de ondas e mudança de profundidade sob a influência de corrente. O modelo é obtido a partir do equacionamento do movimento do submarino em seis graus de liberdade. Posteriormente são efetuadas simplificações. Para isto é utilizado, como referência, o Modelo Livre estudado por Canhetti (1998). Os critérios estabelecidos por Gueler (1987), em seu trabalho, são realizados os testes de validação do controlador. A tarefa do controlador é permitir que o submarino desenvolva as suas missões de forma correta. Estabeleceu-se como simplificação no modelamento do submarino somente a existência de movimento vertical, ou seja, o movimento no plano horizontal não será monitorado/controlado. É usual em submarinos convencionais existirem dois objetivos

básicos. O primeiro, chamado de manutenção da cota periscópica, consiste em controlar a profundidade do veículo, de modo que este permaneça navegando a uma dada profundidade constante, perto da superfície livre do mar, sujeito às perturbações de natureza estocástica, forças e momentos provenientes das ondas do mar. Nesta cota periscópica o submarino consegue içar as tubulações de admissão e descarga para a utilização dos motores Diesel, enquanto as baterias elétricas são recarregadas. O submarino deve manter-se na profundidade desejada e permanecer com ângulos de caturro (pitch) pequenos, de modo a não provocar desconforto para a tripulação. Esta manobra destina-se a possibilitar que um submarino convencional consiga aspirar ar da superfície. Isto é muito importante pois o submarino necessita de ar para o funcionamento dos motores Diesel que recarregam as baterias. As baterias mantêm todo o sistema do veículo quando o mesmo está submerso.

Outra missão consiste na mudança de profundidade do submarino, controlada automaticamente, permitindo que o mesmo efetue uma mudança de cota pré-fixada pelo operador. O veículo pode estar sujeito a perturbação externa, representada pela corrente marinha. O ideal é que o submarino realize qualquer manobra em uma trajetória adequada, evitando ângulos de caturro elevados e erros de profundidade (overshoots) excessivos.

Em síntese, neste trabalho utiliza-se um controlador baseado em lógica "Fuzzy", de forma a executar estas duas tarefas básicas. Inicialmente emprega-se um modelo linearizado do submarino. Posteriormente é testado o mesmo controlador em um segundo modelo mais complexo e completo sem as linearizações anteriores.

#### **1.4 Seqüência de trabalho**

Para projeto do controlador "fuzzy" utiliza-se um modelo linearizado do submarino de forma a estabelecer parâmetros iniciais para o controlador e também para garantir a aquisição de conhecimentos básicos a respeito do movimento do submarino no

plano vertical.

Os testes serão realizados através da simulação de manobras do submarino com a utilização do software MATLAB/SIMULINK.

Em uma segunda etapa é utilizado o controlador "fuzzy" no modelo completo não linear, e verificando-se a sua adequabilidade não só em termos das metas estabelecidas para as manobras selecionadas como também será efetuada uma comparação com o controlador PID em condições similares, utilizando critérios definidos por GUELLER ( 1987).

Este trabalho encontra-se dividido, além deste capítulo introdutório, em mais cinco capítulos. Neste capítulo inicial busca-se apresentar o problema básico de controle de profundidade de um submarino e é apresentado um resumo da bibliografia sobre os assuntos correlatos. No capítulo 2 são apresentados conceitos básicos de lógica "fuzzy" e de controle "fuzzy", permitindo uma familiarização maior com a metodologia a ser abordada, suas definições, virtudes e fraquezas. No capítulo 3 destacam-se os diversos modelos, bem como, os efeitos perturbadores de ondas e correntes, e assim são analisadas as influências sobre o comportamento do veículo. No capítulo 4 são estabelecidas as etapas necessárias no manuseio do software à descrição das plantas de simulação, além de implementação do controlador. No capítulo 5 são avaliados os desempenhos do controlador nos diversos modelos adotados, em cada uma das tarefas estabelecidas, mediante um conjunto de critérios especificados. No capítulo 6 são apresentadas as conclusões principais do trabalho e recomendações para a continuação da pesquisa.

### **1.5 Escolha da metodologia**

A teoria de controle clássico é baseada em modelos matemáticos que descrevem o comportamento da planta considerada. A idéia principal em controle "fuzzy" (Lee et alli.,1996) ; ( Kosko , 1992) , que tem permitido um sucesso considerável, é a

construção de um modelo de controle que não se utiliza necessariamente de modelos matemáticos explícitos , mas pode se basear somente na experiência humana sendo capaz de controlar a planta sem conhecimento prévio do modelo matemático.

A possibilidade de desenvolver um controle sem a necessidade do conhecimento prévio do modelo matemático permite que processos e sistemas de difícil modelamento possam ser controlados. O controle "fuzzy" torna-se útil mesmo no caso de não existir um modelo matemático prévio, ou ainda no caso do conhecimento se basear em conceitos empíricos, subjetivos, redundantes ou vagos. A construção do modelo pode ser feita de forma simples pela utilização de redes neurais ou algoritmos do tipo neuro - fuzzy que simulam o comportamento da planta e permitem a criação de regras de controle.

Denomina-se de "controle especialista", como o controle "fuzzy"(Kosko , 1992), aquele que especifica as suas ações na forma de regras linguísticas. A especificação destas regras linguísticas depende do conhecimento de uma pessoa especializada na ação. Mas a translação dessas regras para uma linguagem programável depende da atuação de alguém familiarizado com a metodologia "fuzzy".

O sistema de controle "fuzzy" passa a ter um significado essencial no controle do submarino, hora em foco, por se tratar de uma planta extremamente complexa e cujo modelamento deveria ser feito por trechos ou tipos de missões . Papoulias (1995) tem desenvolvido diversos modelos para descreverem o submarino em tempo real. Nestes trabalhos observa-se uma grande variedade de situações. Estes modelos resultam na verdade de uma série de estudos específicos para várias situações possíveis. Existem desde modelos para o movimento no plano vertical com perda de flutuabilidade e com comportamento caótico até modelos linearizados ( Papoulias, 1995 ) .O modelamento do submarino é uma tarefa extremamente complexa não só pela existência de parâmetros variáveis no tempo e no espaço, como também, pela complexidade do equacionamento do seu comportamento em diversas missões. Acrescenta-se a isso a existência de perturbações estocásticas obtidas através de levantamentos experimentais. Ou seja,



qualquer simplificação do modelo deve ser vista com restrições já que busca-se um controlador que atue em tempo real na planta.

No próprio modelamento apresentado por Gueler ( 1987) ou por Canhetti (1998) uma série de simplificações e aproximações são consideradas. O modelo de controle de Gueler é mais realístico ( 1987 ) que o modelo de Canhetti ( 1998) devido à presença de inúmeras não linearidades. Porém, há que se observar que o modelo utilizado neste trabalho não é o modelo linear de Canhetti mas sim o modelo completo que representa o submarino com mais fidelidade. É importante que se projete um controlador com robustez suficiente para permitir que o controlador utilizado no modelo seja adequado para o submarino em tempo real. O controle fuzzy apresenta de forma conveniente esta robustez, podendo-se sim projetar um controlador fuzzy mesmo sem o modelo matemático do veículo. Para isto bastaria que existisse um simulador do tipo neural que descrevesse o comportamento das entradas e saídas do sistema. A literatura no assunto já demonstrou que controle "fuzzy" e redes neurais permitem uma atuação de controle precisa e sem demandar grandes equacionamentos matemáticos, possibilitando uma ação segura e em tempo real. Porém, deve-se ressaltar que sem um modelo matemático (ou sem a planta real para testes) é impossível validar o controlador.

## **CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

Neste capítulo são apresentados conceitos de lógica "fuzzy" e controle "fuzzy". Inicialmente são estabelecidos conceitos referentes à idéia de incerteza e como lidar com ela. Em seguida, aborda-se especificamente a lógica "fuzzy" e o controle "fuzzy", de forma a tornar claro como é possível utilizar-se de conceitos vagos e até redundantes para implementar um controle robusto.

### **2.1. Conceitos da Lógica "Fuzzy"**

A primeira publicação sobre lógica "Fuzzy", que deu origem ao seu nome, é anterior a 1965. Foi feita nos E.U.A. por Lotfi Zadeh, Professor de Teoria de Sistemas na Universidade de Berkeley Califórnia (Pedricz, 1993). A partir de então, a história da lógica Fuzzy seguiu o modelo de várias das novas soluções tecnológicas de nossos dias. Criada nos E.U.A., aplicada e aperfeiçoada na Europa, e , já amplamente utilizada no Japão, a lógica "Fuzzy" é hoje uma realidade. Porém, ainda existe um grande número de céticos, mesmo quando centenas de bem sucedidas aplicações de lógica "fuzzy" têm provado ser esta tecnologia algo concreto e de grande importância. Existem alguns estudiosos que insistem em condená-la por inteiro ou condenar alguns de seus conceitos, diminuindo o seu valor como ferramenta para a estruturação do conhecimento.

#### **2.1.1 Princípios matemáticos da Incerteza**

Várias disciplinas matemáticas lidam com a descrição de incertezas, tais como teoria da probabilidade, teoria de informação e teoria dos conjuntos "Fuzzy". É conveniente classificá-las pelo tipo de incerteza e nesta seção serão ressaltados apenas dois tipos de incerteza: a estocástica e a léxica.

##### **a) Incerteza estocástica**

Incerteza estocástica é a que está associada com a incerteza para a ocorrência de um assegurado acontecimento. Considere a afirmação:

**Declaração 1: A probabilidade de acertar o alvo é 0,8.**

O evento em si próprio - acertar o alvo - é bem definido. A incerteza nesta

declaração é se o alvo será ou não acertado. Esta incerteza é quantificada por um grau de probabilidade. No caso da afirmação, a probabilidade é 0,8. Declarações assim podem ser processadas e combinadas com outras declarações usando métodos estocásticos, tais como cálculo Bayesiano de probabilidade condicional.

#### b) Incerteza Léxica

Um tipo diferente de incerteza que está associada com a linguagem humana é a chamada de incerteza léxica. Este tipo de incerteza está relacionado com a imprecisão da linguagem humana, já que o homem implicitamente utiliza muitas palavras que carregam em si conceitos vagos; isto é inerente a muitas palavras usadas para definir conceitos e deduzir conclusões. Considere, por exemplo, palavras tais como "homens altos", "dias quentes" ou "moedas estáveis", onde uma definição exata não é claramente atribuída. Se um homem é considerado "alto" por uma dada pessoa não implica que será igualmente considerado alto por outra. Por exemplo, uma criança tem um conceito diferente da expressão "homem alto" que um adulto. Também o contexto e os antecedentes de um indivíduo são influentes na decisão. Mesmo para um único indivíduo, uma definição exata sobre se um homem é considerado "alto" pode não existir. Nenhuma lei existe determinando a fronteira acima da qual um homem é concebido como "alto". Mesmo que existisse um limite definido, como se fosse por exemplo afirmado que 1,80m é ser "alto" poderia implicar que um homem de 1,79m não seria alto para todos. A ciência que se preocupa com a avaliação destes conceitos e assim busca deduzir conclusões é a psicolinguística. Tem sido provado que o homem usa as palavras como "categoria subjetiva" classificando com valores os termos tais como "altitude", "temperatura", e "inflação". Usando estas categorias subjetivas, na verdade o homem classifica as coisas na vida real de acordo com o grau com que elas satisfazem aos critérios.

Apesar de muitos conceitos utilizados não serem exatamente definidos, os homens podem usá-los para análises absolutamente complexas e decisões que são baseadas em vários fatores diferentes. Utilizando-se de abstração, e pelo uso de analogias, algumas frases podem descrever contextos complexos em que seria muito difícil defini-los com precisão em modelos matemáticos. Considere a afirmação:

**Declaração 2: Nós devemos possivelmente ter um bem sucedido exercício financeiro.**

Num primeiro exame, a declaração 2 é muito parecida com a primeira declaração; contudo, com uma melhor observação verificar-se-á que existem importantes diferenças. Primeiro, o acontecimento em si não é claramente definido. Para algumas empresas, um bem sucedido exercício financeiro significa que não terão que declarar falência, para outras, aqueles desempenhos anteriores mesmo com alta taxa de lucro precisam ser superados. Conseqüentemente, o conceito de um "bem sucedido exercício financeiro" é uma categoria subjetiva.

Outra diferença está na definição da probabilidade. Na declaração 2, a expressão de probabilidade "possivelmente" é uma categoria subjetiva. Enquanto na declaração 1, a probabilidade é expressa em um número matematicamente perceptível, na declaração 2 não há como quantificá-la numericamente. O termo "possivelmente" na declaração 2 é vago e impreciso e é estabelecido em função de conhecimentos e apreciações subjetivas do analista.

Se alguém afirmar que um dado tipo de avião *possivelmente* terá problemas, a probabilidade real pode ser neste caso adequadamente definida mediante cálculos de riscos comumente empregados em Engenharia, podendo seu valor ser quantificado em menor que 10% de acordo com o julgamento de um dado técnico.

Por isso, na declaração 2, a expressão de probabilidade também é uma categoria subjetiva, tal como "homens altos". O ato de fazer um modelo de declarações de incertezas lingüísticas usando categorias subjetivas, tais como a declaração 2, é um importante processo de decisão usado pelos seres humanos. Apesar destas afirmações não terem quantitativamente conteúdo, os seres humanos podem usá-las com sucesso para análises complexas. Em muitos casos, a incerteza na definição das palavras usadas por nós, dispõe de certa flexibilidade.

A flexibilidade que ocorre em palavras e declarações empregadas por nós é feita de forma ampla pela nossa sociedade. Na maioria das sociedades ocidentais, dispõe-se de um sistema jurídico que consiste de um determinado número de leis e regulamentos, descrevendo um certo número diferente de situações. Por exemplo,

uma lei pode expressar um roubo de automóvel com uma pena de 2 anos de prisão. Outra lei pode definir como causa de aumento/diminuição da pena se o ato foi praticado após a ingestão de 10 ml de álcool, ou se o criminoso tem maus antecedentes. Como não se tem para cada fato "real" uma lei ou regulamento específicos, o juiz tem que combinar todos, aplicando as leis e regulamentos, para deduzir uma decisão final. Isto é apenas possível devido à flexibilidade na definição das palavras e declarações utilizadas em cada lei.

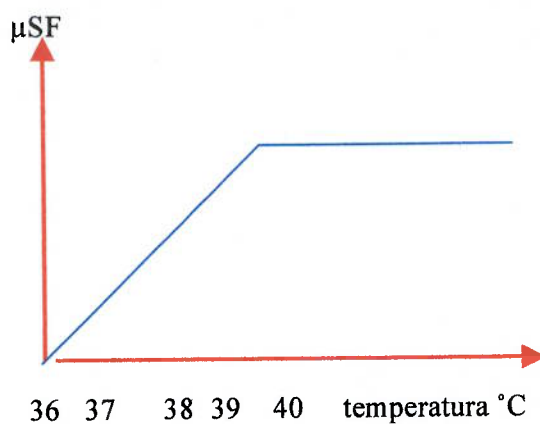
### 2.1.2 Lógica "Fuzzy" como lógica humana

O conceito básico é simples: na realidade não existem regras (ou regulamentos) que cobrem perfeitamente uma situação. Estas regras são descontínuas em alguns pontos. Consequentemente, para uma dada situação, tem-se que combinar as regras que descrevem situações idênticas. Esta aproximação é possível devido à flexibilidade na definição das palavras que constituem as regras. Da mesma forma, abstrata e pensando em analogias, é utilizada a lógica "Fuzzy". Para pôr em execução esta lógica humana em soluções de engenharia, um modelo matemático é necessário. Lógica Fuzzy tem sido desenvolvida como um modelo matemático que permite a representação da decisão e análise humana em processos (Horihawa et al., 1992).

### 2.1.3 Um conjunto "Fuzzy"

Surge inicialmente uma pergunta. **Como o homem faz para modelar a incerteza lingüística adequadamente?** Se um médico não tem uma idéia exata da fronteira para poder definir se um paciente sofre de "febre forte", como ele deve proceder? A investigação psicolingüística tem mostrado que um médico toma a decisão a respeito da existência de uma doença se comparar o paciente com dois "protótipos". De um lado, tem-se um paciente com "perfeita" febre forte, alta temperatura, suando, com calafrios. Na outra face o "perfeito" saudável, se o paciente não mostra qualquer sintoma de febre relatado na bibliografia médica. Comparando estes dois extremos, um médico analisa onde se encontra o paciente dele em relação a estas duas categorias. Uma segunda pergunta que surge agora é: **Como pode ser matematicamente modelada a incerteza?** Uma forma possível é a seguinte: Considere a teoria de conjuntos, em que primeiro define-se o conjunto de todos

se encontra o paciente dele em relação a estas duas categorias. Uma segunda pergunta que surge agora é: **Como pode ser matematicamente modelada a incerteza?** Uma forma possível é a seguinte: Considere a teoria de conjuntos, em que primeiro define-se o conjunto de todos pacientes com febre forte. Depois, define-se uma função matemática que indica para cada paciente se ele é um membro deste conjunto ou não. Em matemática convencional, esta função indicadora consegue definir um paciente como membro ou não-membro do conjunto. Porém, pode-se caracterizar de outra forma a pertinência ou não de um elemento em um dado conjunto (Fig 2.), atribuindo valores à adequação ou não de um elemento ao conjunto ou seja criando uma função que simbolize quanto um elemento está relacionado com um dado conjunto, a isto, chamaremos de grau de pertinência. Na figura 2.1 o eixo das ordenadas, representado por " $\mu_{SF}$ ", corresponde ao grau de pertinência ao conjunto "febre forte" e na abscissa temos a temperatura em graus Celsius do paciente.



**Figura 2.1** Conjunto "Fuzzy" simples

Pelo exemplo da figura 2.1 pode-se extrair:

$$\mu_{SF}(35^{\circ}\text{C}) = 0 \quad \mu_{SF}(36,8^{\circ}\text{C}) = 0,1 \quad \mu_{SF}(39^{\circ}\text{C}) = 0,9$$

$$\mu_{SF}(36^{\circ}\text{C}) = 0 \quad \mu_{SF}(37^{\circ}\text{C}) = 0,35 \quad \mu_{SF}(39,5^{\circ}\text{C}) = 1$$

$$\mu_{SF}(36,5^{\circ}\text{C}) = 0 \quad \mu_{SF}(38^{\circ}\text{C}) = 0,65 \quad \mu_{SF}(40^{\circ}\text{C}) = 1$$

A função de associação nos algarismo  $\mu_{SF}(x)$  de temperatura  $x$ , pode ser

convencional são apenas um caso especial do conjunto Fuzzy. A utilização de conjuntos Fuzzy associados a funções lógicas chama-se "**lógica Fuzzy**". A associação a um conjunto pode ser vista como grau de verdade de uma declaração. Por exemplo, a expressão "**o paciente tem febre forte**" seria verdadeira com um grau de pertinência de 0,65 para uma temperatura igual a 38°C.

## 2.2 Fundamentos de Sistemas "Fuzzy"

Os conjuntos "fuzzy" foram propostos por Zadeh (1965) apud Pedrycz (1993) como uma alternativa inovadora para formalizar o tratamento de conceitos como imprecisão e incerteza. Na teoria clássica de conjuntos, cada elemento do universo de discurso (domínio ou espaço em que as variáveis associadas ao problema podem assumir valores) apresenta exclusão completa ou então pertinência completa a um determinado conjunto. Na teoria de conjuntos "fuzzy", a cada elemento do universo de discurso são atribuídos *graus contínuos de pertinência* entre 0 (exclusão completa) e 1 (pertinência completa) a cada conjunto definido no mesmo universo de discurso. Os valores de pertinência expressam os graus com os quais cada elemento é compatível com as propriedades dos conjuntos do universo (Pedrycz & Gomide, 1998). Formalmente, conjuntos "fuzzy" são definidos como segue:

**Definição 2.1** Um conjunto "fuzzy" é caracterizado por uma função de pertinência  $F$  mapeando elementos do universo de discurso  $X$  para o intervalo unitário  $[0, 1]$

Isto é,  $F: X \rightarrow [0, 1]$ . Assim, um conjunto "fuzzy"  $T$  em  $X$  pode ser representado como um conjunto de pares ordenados de um elemento genérico  $x \in X$  e seu grau de pertinência:  $T = \{F(x)/x \mid x \in X\}$ .

**Definição 2.2** Um *sistema fuzzy* é composto por uma base de regras e um mecanismo de inferência *fuzzy*. Um sistema *fuzzy* faz o mapeamento  $U \rightarrow V$  de um espaço de entrada para um espaço de saída, onde  $U = U_1 \times \dots \times U_n \subset R^n$ ,  $V \subset R$ , e  $x$  é o produto cartesiano. A base de regras é constituída de  $M$  regras do tipo:

$R(l) : \text{se } x_1 \text{ é } F(l)_1 \text{ e } x_2 \text{ é } F(l)_2 \text{ e } \dots \text{ e } x_n \text{ é } F(l)_n \text{ então } y \text{ é } G(l)$  onde  $F(l)_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ;  $l = 1, \dots, M$ ) e  $G(l)$  ( $l = 1, \dots, M$ ) são subconjuntos *fuzzy* definidos respectivamente em  $U_i \subset R$  ( $i = 1, \dots, n$ ) e  $V \subset R$  ( $i = 1, \dots, n$ ) com  $\mathbf{x} = [x_1 \dots x_n]$   $T \in U$  e  $y \in V$  sendo

variáveis linguísticas de entrada e saída, respectivamente  $U$  e  $V$

### 2.2.1 Normas triangulares

Normas triangulares segundo Pedrycz & Gomide (1998) desempenham um papel fundamental na teoria de conjuntos "fuzzy". As normas triangulares fornecem modelos genéricos para as operações de união e interseção em conjuntos "fuzzy", e devem possuir as propriedades de comutatividade, associatividade e monotonicidade. Condições de contorno também devem ser satisfeitas. Portanto, normas triangulares formam classes genéricas de operadores de união e interseção. Formalmente, elas são definidas como segue.

**Definição 2.3** Uma *norma triangular (t-norma)* é um operador  $t: [0, 1] \rightarrow [0, 1]$  satisfazendo as seguintes propriedades:

- Comutatividade:  $x t y = y t x$
- Associatividade:  $x t (y t z) = (x t y) t z$
- Monotonicidade: Se  $x \leq y$  e  $w \leq z$ , então  $x t w \leq y t z$
- Condições de contorno:  $0 t x = 0$ ,  $1 t x = x$ .

**Definição 2.4** Uma *s-norma*, também conhecida como *co-norma triangular*, é um operador  $s: [0, 1] \rightarrow [0, 1]$  satisfazendo as seguintes propriedades:

- Comutatividade:  $x s y = y s x$
- Associatividade:  $x s (y s z) = (x s y) s z$
- Monotonicidade: Se  $x \leq y$  e  $w \leq z$ , então  $x s w \leq y s z$
- Condições de contorno:  $x s 0 = x$ ,  $x s 1 = 1$ .

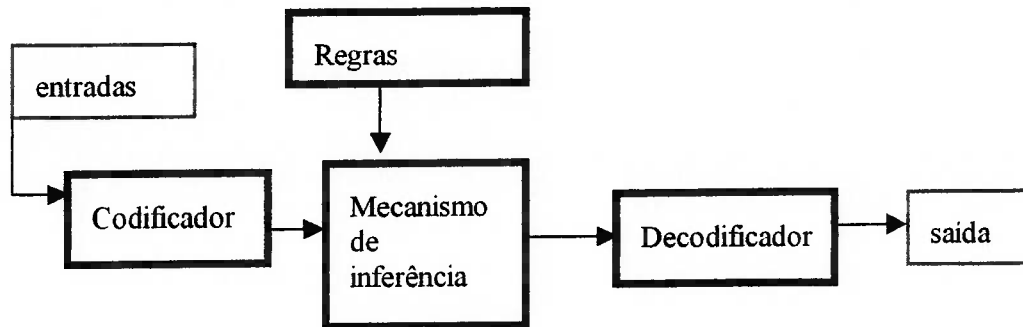
### 2.2.2 Metodologia de controle "Fuzzy"

A metodologia de controle "Fuzzy", é hoje, bastante utilizada nas mais diversas aplicações. Existem inúmeros autores que justificam a utilização de Controle Fuzzy em problemas que envolvam sistemas simples do tipo uma entrada



e uma saída (SISO), com excelentes resultados (Mamdani, 1993). A aplicação em sistemas complexos com múltiplas entradas e saídas, e que envolvam não linearidade e atuação em tempo real do elemento de controle é mais rara e envolve uma análise mais segura das regras e procedimentos.

Um controlador "fuzzy" apresenta a formulação esquematizada na figura 2.2.



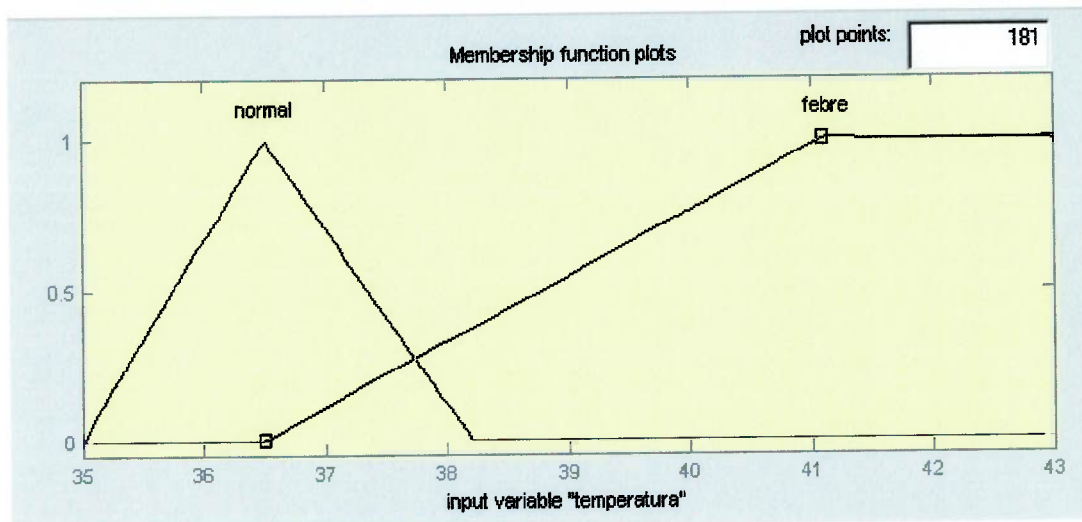
**Figura. 2.2 Controlador "fuzzy"**

O caminho sequencial de tratamento da informação de entrada segue a ordem: codificador, mecanismo de inferência ou ativação de regras (implicação, agregação), decodificação (Ferreira, 1999).

#### a) Codificador

A função do codificador é transformar os valores numéricos das entradas em conjuntos "fuzzy", de modo a possibilitar a ativação das regras (Ferreira, 1999). Assim serão convertidas as entradas em conjuntos "fuzzy" do tipo triangular, porque estes são mais simples de serem trabalhados. Considere-se o exemplo de um diagnóstico de gripe, onde uma das variáveis de decisão seja a temperatura do paciente. Assim, precisa-se codificar um dado valor da variável de entrada em uma representação do tipo "fuzzy". Na figura 2.3 ( temperatura em °C ) pode-se ver um exemplo de codificação. Assim, no eixo das abscissas está a temperatura enquanto nas ordenadas tem-se o grau de pertinência para um dado elemento em relação aos dois conjuntos "fuzzy" da figura, que são NORMAL, FEBRE. Cada entrada pode pertencer a mais de um conjunto "fuzzy", com diferentes graus de pertinência. Por

de entrada em uma representação do tipo "fuzzy" Na figura 2.3 ( temperatura em °C ) pode-se ver um exemplo de codificação. Assim, no eixo das abscissas está a temperatura enquanto nas ordenadas tem-se o grau de pertinência para um dado elemento em relação aos dois conjuntos "fuzzy" da figura, que são NORMAL, FEBRE. Cada entrada pode pertencer a mais de um conjunto "fuzzy", com diferentes graus de pertinência. Por exemplo, uma dada entrada de temperatura igual a 37,8°C pode simultaneamente pertencer ao conjunto "fuzzy" NORMAL e ao conjunto "fuzzy" FEBRE.



**Figura 2.3 Variável de entrada TEMPERATURA ( °C )**

**b) Mecanismo de inferência:**

**b1) Implicação**

A implicação é composta de duas etapas: a primeira, consiste em transformar os operadores lógicos usuais na linguagem escrita e falada, em linguagem matemática. A segunda etapa consiste em utilizar um método adequado que opere o resultado numérico, obtido da operação lógica entre as

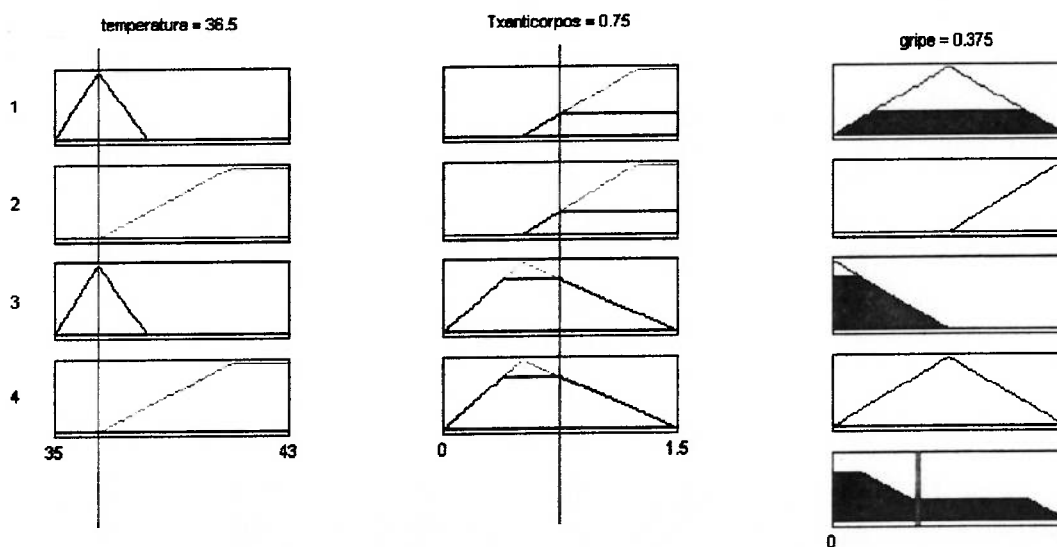
THEN. O processo de implicação se inicia com o tratamento da parte preliminar da regra, que é composta de conjuntos "fuzzy" de entrada, unidos por expressões do tipo AND (e) ou OR (ou). Nesta fase transformam-se os operadores lógicos em uma linguagem "fuzzy".

O processo de transformação dos operadores lógicos em linguagem matemática visa permitir a operação das regras. Por exemplo, se for utilizada uma regra simples do tipo SE A TEMPERATURA É ALTA E A TAXA DE ANTICORPOS É NORMAL ENTÃO A GRIPE É FORTE. Nesta regra existem duas entradas e uma saída; as entradas são codificadas em conjuntos "fuzzy" (codificação) e depois necessitam ser relacionadas entre si (primeira etapa do processo de implicação); quem faz isso é o conectivo "E", ou seja há uma idéia de interseção, de dupla validade ou mesmo de simultaneidade. A conclusão da regra só será válida se as duas entradas possuírem os valores indicados ou pertencerem aos dois conjuntos "fuzzy" codificados nas entradas. Assim, a forma matemática como será trabalhada esta combinação entre as entradas vai depender dos operadores utilizados de inferência por implicação.

A implicação Mamdani (1974) (ou implicação mínima) realiza a operação lógica do E através do **mínimo** das duas entradas, enquanto a implicação proposta por Larsen (1980) é realizada através de um **produto** (Ferreira, 1999). Este resultado parcial de uma dada regra (que consiste em duas suposições unidas por um operador lógico) gera uma conclusão que no caso em questão é uma conclusão que a gripe é forte. GRIPE É FORTE é, por exemplo, um conjunto "fuzzy", triangular.

A segunda etapa do processo de implicação consiste em utilizar-se de métodos que adequam o valor numérico obtido da operação lógica dos antecedentes no conjunto "fuzzy" da resposta. Estes métodos permitem assim uma operação a partir do conjunto "fuzzy" resposta. Utilizam-se, basicamente, dois métodos: O primeiro método possui a sigla MIN e realiza uma espécie de filtro "passa baixa" no conjunto "fuzzy" resposta, a partir do resultado numérico dos antecedentes. O segundo método, que tem a sigla MAX, funciona como filtro "passa alta", só deixando no conjunto "fuzzy" resposta, de cada regra, valores acima do resultado numérico dos antecedentes.

A figura 2.4 foi extraída do toolbox "fuzzy" do MATLAB/SIMULINK; nela está ilustrado um exemplo de implicação utilizando o método MIN. Cada linha horizontal representa uma regra. Em amarelo aparecem as variáveis de entrada "temperatura" e "taxa de anticorpos", ou seja em amarelo estão os antecedentes e em azul tem-se a parte conclusiva da regra. Percebe-se que o resultado numérico dos antecedentes é o menor dos dois valores de graus de pertinência (o conectivo AND/E determina que se pegue o menor dos dois graus de pertinência - "implicação mandami" - obtidos a partir dos valores de entrada). Este valor numérico, obtido a partir da aplicação do conectivo AND/E, servirá como limite do filtro "passa baixa", que é determinado pela utilização do operador de implicação do tipo MIN produzindo como resultado o trapézio do quadro mais à direita.



**Figura 2.4 Exemplo de implicação do tipo MIN**

## **b2) Agregação das regras**

Como já mencionado, um dado valor numérico de entrada pode pertencer a mais de um conjunto "fuzzy". Assim, se existirem duas entradas, elas fatalmente ativarão mais de uma regra específica dentro do universo de regras. Por exemplo, a *entrada 1* temperatura igual a 36.5 graus Celsius pode pertencer a dois conjuntos "fuzzy" distintos, a saber: conjunto "fuzzy" FEBRE com pertinência 0,05 e conjunto "fuzzy" NORMAL com pertinência 0,95. Em contrapartida a *entrada 2*, TAXA DE ANTICORPOS igual a 0,75 parte por milhão pode pertencer a outros dois conjuntos "fuzzy", ALTA com grau de pertinência igual a 0,2 e NORMAL com grau de pertinência 0,8. Assim, dentro do universo de regras abaixo:

***Se a temperatura for normal e a taxa de anticorpos for alta, então, a gripe é média***

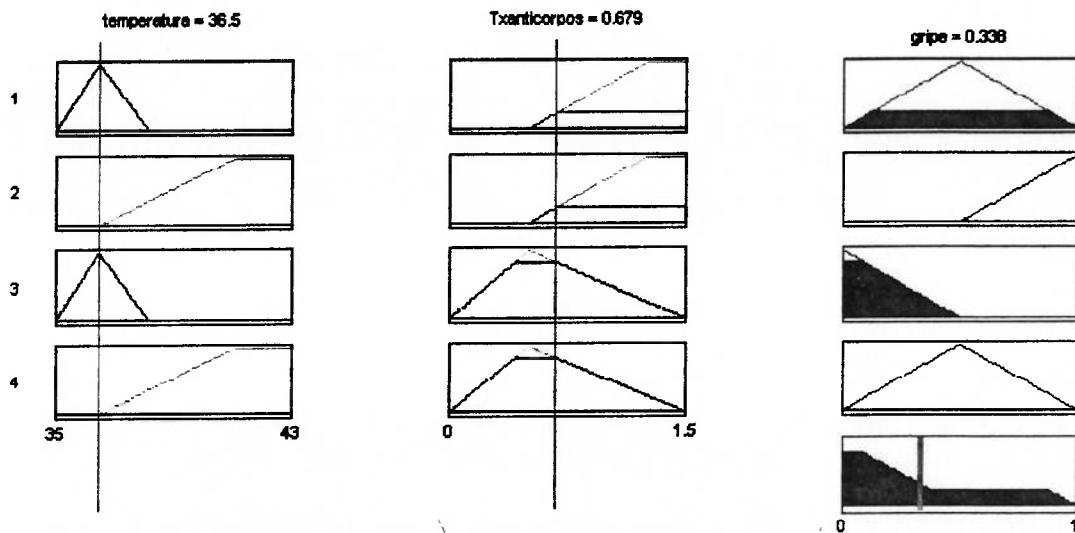
***Se a temperatura for febre e a taxa de anticorpos for alta, então, a gripe é forte***

***Se a temperatura for normal e a taxa de anticorpos for normal, então, a gripe é fraca***

***Se a temperatura for febre e a taxa de anticorpos for normal, então, a gripe é média***

Percebe-se que as duas variações possíveis da primeira entrada e as duas variações possíveis da segunda entrada poderão ativar ao todo 4 regras válidas. Para obter o resultado final, deve-se fazer uma composição entre as regras. Este processo é comumente chamado de AGREGAÇÃO DAS REGRAS. Existem diversos métodos que permitem a agregação das regras. Alguns métodos fazem a união entre os resultados das regras, mas existem outras formas de se implementar a agregação das regras.

Na figura 2.5 pode-se ver um exemplo simples de agregação de regras. No caso são somadas as áreas obtidas do resultado geométrico de cada regra (obtida em cada linha horizontal da mesma figura). Somente a primeira e a terceira regra contribuem para o resultado final já que as outras regras possuem resultado geométrico igual a zero.



**Figura 2.5** Agregação de regras

### c) Decodificador

O decodificador é responsável por transformar a saída de forma "fuzzy" (geralmente de dimensão geométrica) em uma saída numérica que permita a atuação na planta a ser controlada. Essa decodificação pode ser realizada de diversas formas dependendo do objetivo a ser alcançado.

Existem 3 formas básicas de decodificar uma saída do tipo "fuzzy", que são: método do Centro do Máximo (CoM), método do Centro da Área (ou Centro de Gravidade) e Média dos Máximos (MoM). O primeiro método extrai do resultado da AGREGAÇÃO, dos conjuntos "fuzzy" da saída, o maior valor absoluto. O segundo método calcula o centro de gravidade da figura obtida na saída. O terceiro método calcula a média dos máximos individuais dos diversos conjuntos fuzzy agregados na saída.

O método da Média do máximo (MoM) é usado em muitas aplicações com lógica "Fuzzy" (principalmente envolvendo controle), porque mais de uma saída pode ser considerada como válida (Lin, 1996). O MoM computa o máximo da saída como uma média dos pesos dos máximos de cada regra considerada ativada; assim se resultarem no final três regras, o método faz a ponderação entre elas (o seu cálculo é feito por uma média entre os valores máximos de cada regra, onde todos os valores de saída ativados são considerados). Este método de defuzzificação leva em

consideração todas as saídas válidas e por isso é comumente chamado na literatura americana de "must compromise" que significa melhor compromisso, ou solução consensual (Lin, 1996).

O método do Centro de Gravidade (CoA) é o mais freqüentemente usado em sistemas Fuzzy. Os resultados dos métodos CoA e MoM são muito semelhantes. Em algumas aplicações o uso de qualquer dos dois métodos não apresenta grandes diferenças. O método extrai a resposta "fuzzy" do centro de gravidade da figura obtida da agregação das regras, sendo também uma técnica do tipo "must compromise" (Lin, 1996).

O método de decodificação Centro do Máximo (CoM) utiliza o valor máximo geral. Computa a saída do sistema somente para o mais alto grau de validade dentre todas as regras válidas ou seja "o vencedor leva tudo", não há uma idéia de compromisso ou ponderação entre as saídas. No entanto, se o máximo não é o único, como quando a função de pertinência é do tipo Pi (trapezoidal), a média do intervalo de máximo é computada. Assim, se a regra vencedora possuir mais de um valor correspondente a aquele máximo, deve-se utilizar a média como ocorre no exemplo da figura 2.6, onde para o valor da ordenada  $2/3$  temos três valores possíveis 3, 4 e 5.

Os métodos MoM e CoA resultam em técnicas do tipo "best compromise solution" (a solução é ponderada e resulta do somatório de diversas saídas) também chamada de "um homem, um voto" (Keller, 1992). Por outro lado, o método CoM resulta em técnicas do tipo "most plausible solution", também chamada de "o vencedor leva tudo" (Keller, 1992).

Em aplicações envolvendo controle, os métodos CoM e CoA produzem melhores resultados porque os valores na saída representam uma combinação de todos os resultados obtidos. MoM é freqüentemente utilizado em técnicas de reconhecimento de padrões ou aplicações que envolvam classificação, quando a solução mais plausível (e somente ela) é a mais apropriada. A literatura científica tem sugerido outras formas de "defuzzificação" ou decodificação mas que não tem apresentado grande diferença qualitativa em relação aos métodos apresentados neste trabalho.

Na figura 2.6 (Lin, 1996) pode-se ver a aplicação de dois métodos diferentes, CoM e CoA. Pode-se ver dois trapézios resultantes de duas regras válidas. Porém, um dos trapézios é mais "alto" que o outro. O método CoM descarta o trapézio menor e passa a considerar como válido somente o trapézio maior. Como o trapézio maior não possui um máximo absoluto a resposta é o resultado aritmético, representado na parte de baixo da figura. Pega-se, no caso, o ponto central da parte mais alta da figura (Máximo), ou seja o valor obtido na abscissa será 4. O segundo método ilustrado é o CoA que consiste no cálculo do ponto da abscissa correspondente ao centro de gravidade de toda a figura. Se fosse utilizado o método MoM, dever-se-ia fazer uma média entre o ponto da abscissa correspondente ao máximo do primeiro trapézio com o ponto de máximo do segundo trapézio.

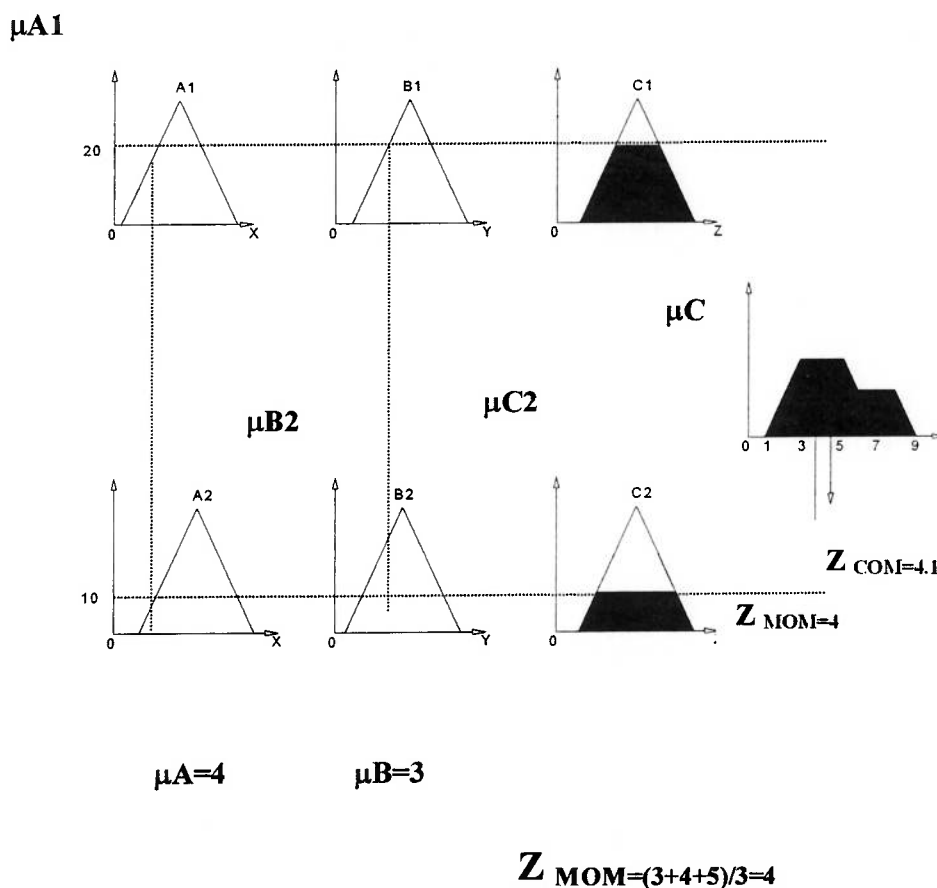
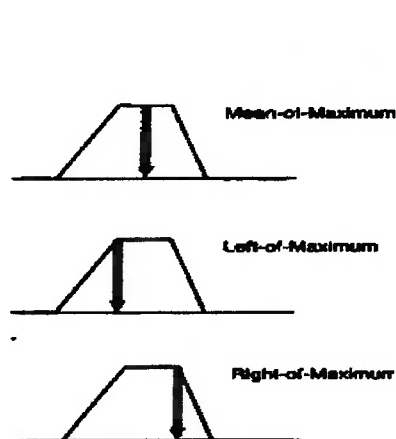


Figura 2.6 Cálculo pelos métodos CoM e MoM (Lin, 1996)



Na figura 2.7 (Li, 1996) pode-se ver variações do método MoM, ou seja, pode-se utilizar a média dos máximos ou o ponto mais a esquerda (segunda linha) ou ainda o ponto mais a direita dos máximos (terceira linha).



**Fig 2.7 Formas diferentes de defuzzificação tipo MoM (Lin, 1996)**

Os comentários apresentados sobre os métodos de decodificação podem ser sintetizados na tabela 2.1.

**TABELA 2.1 Comparação entre métodos de decodificação**

	<b>CoA</b>	<b>CoM</b>	<b>MoM</b>
<b>Característica</b> <b>Linguística</b>	Um homem, um voto	Um homem, um voto	O vencedor leva tudo
<b>Ajuste com</b> <b>intuição</b>	Médio	Bom	Bom
<b>Continuidade</b>	Sim	Sim	Não
<b>Eficiência</b> <b>Computacional</b>	Muito Baixo	Alto	Muito Alto
<b>Aplicação</b>	Controle, Análise de dados, decisão	Controle, análise de dados, decisão	Reconhecimento de Padrão, decisão, Análise de dados

### CAPÍTULO 3 - DINÂMICA DO MOVIMENTO DO SUBMARINO

No capítulo 1 foi definido como objetivo de trabalho o projeto de um controlador "fuzzy" para atuar como piloto automático para manobras de um submarino no plano vertical. No capítulo 2 foram apresentados os conceitos da lógica "fuzzy" que servem de base para o projeto dos controladores. Neste capítulo será feita a descrição da dinâmica de um submarino. O objetivo é obter modelos matemáticos que permitam simular manobras do veículo no plano vertical e que possam ser usados, posteriormente, na avaliação dos controladores.

Sabe-se que, ao contrário de outros métodos de controle, o projeto de um controlador "fuzzy" não exige um modelo matemático de trabalho perfeitamente definido para o seu desenvolvimento. É suficiente para esta finalidade o conhecimento qualitativo do comportamento do sistema quando submetido à atuação dos elementos de controle (atuadores). No presente trabalho é possível a criação de um modelo matemático a partir de uma série de equações diferenciais que definem os movimentos do submarino. Por outro lado, como não se dispõe de um protótipo ou mesmo de um modelo em escala para fazer testes com o controlador, no problema em questão, é necessário gerar um "modelo de simulação" para conhecer o desempenho do veículo sob efeito dos elementos de controle. Desta forma poderão ser testadas e ajustadas as regras de controle.

Este capítulo está estruturado da seguinte forma: em primeiro lugar são apresentadas as equações do movimento para o submarino, inicialmente considerando 6 graus de liberdade - 3 movimentos de translação e 3 movimentos de rotação - e depois particularizando para manobras no plano vertical. É feita, então, uma descrição dos modelos dos diversos esforços que atuam sobre o veículo. Em seguida, dada a complexidade do modelo obtido, propõe-se uma linearização do modelo. Finalmente, são simuladas manobras do submarino para verificar se os modelos obtidos representam adequadamente o comportamento do veículo.

### 3.1 Equações do Movimento

#### 3.1.1 Descrição do Movimento

Seja um sistema de eixos ortogonais  $Gxyz$ , fixo no submarino, com origem coincidente com o centro de gravidade do mesmo e com o plano  $Gxz$  situado no plano de simetria, sendo  $Gx$  e  $Gz$  eixos principais de inércia, conforme apresentado na figura 3.1. Nesta figura têm-se:

$G$  origem fixa no centro de gravidade do veículo;

$Gx$  eixo longitudinal, situado no plano de simetria, paralelo ao eixo de revolução do casco.

$Gy$  eixo transversal, perpendicular ao plano de simetria, positivo para bombordo;

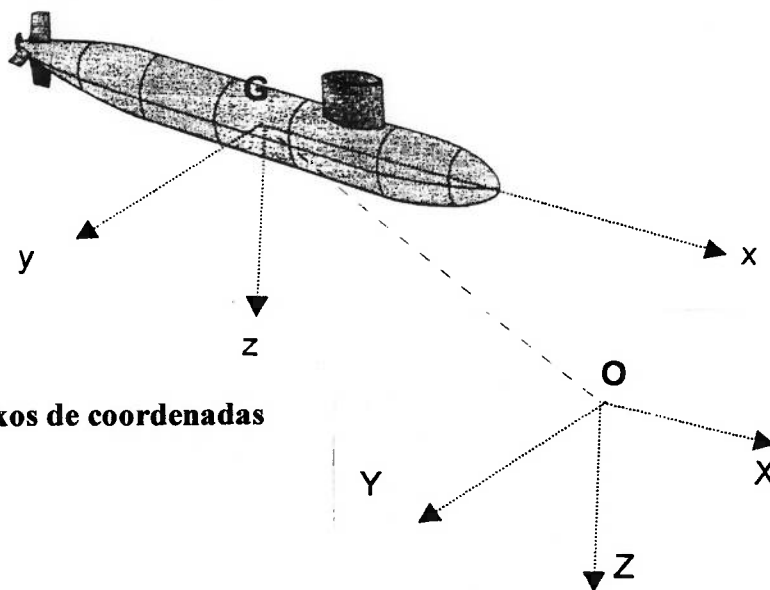
$Gz$  eixo vertical, localizado no plano de simetria, formando com os demais eixos um sistema ortogonal direto.

Seja ainda um triedro ortogonal  $OXYZ$  com origem fixa na terra, com os eixos  $OX$  e  $OY$  no plano horizontal terrestre, e com o eixo  $OZ$  vertical, dirigido para baixo.

Pode-se definir o seguinte ângulo:

CATURRO - ângulo entre o eixo  $Gx$  e o plano horizontal paralelo a  $OXY$ , passando por  $G$ , sendo positivo com o levantamento da proa.

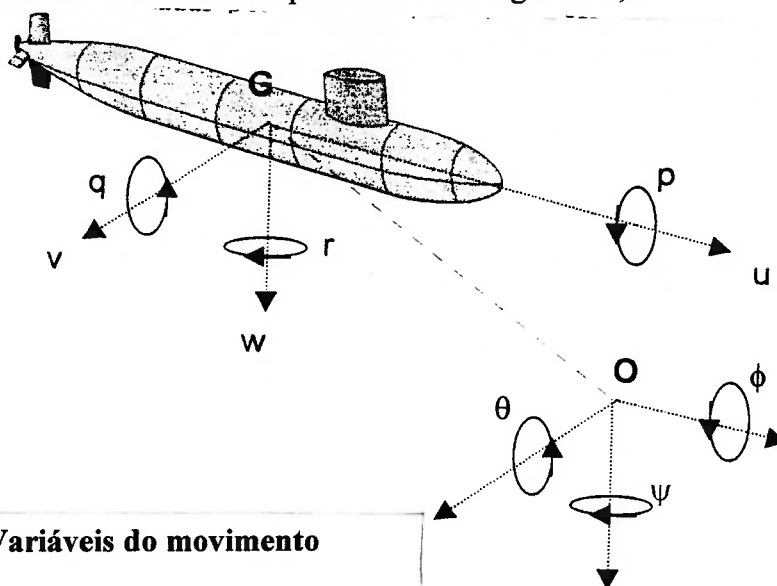
Definindo esses triedros, a posição da embarcação está determinada pelas coordenadas que exprimem o deslocamento do centro de gravidade e pelos ângulos entre os eixos, conforme apresentadas na Figura 3.2:



**Figura 3.1 Eixos de coordenadas**

As equações diferenciais que representam a dinâmica do veículo são descritas para o sistema de referência solidário ao submarino, com origem no centro de gravidade ( $Gxzy$ ). As equações de Euler são descritas para o sistema de referência com origem em terra ( $OXYZ$ ).

A seguir são descritas as variáveis relacionadas utilizadas no estudo, que são as mesmas utilizadas por Feldman (1979), e Fossen (1994). As direções convencionadas positivas para estas variáveis estão apresentadas na Figura 3.2;



**Figura 3.2 Variáveis do movimento**

$u$  [m/s] é a velocidade de avanço (surge), medida na direção do eixo  $Gx$ ;

$v$  [m/s] é a velocidade de deriva (sway), medida na direção do eixo  $Gy$ ;

$w$  [m/s] é a velocidade de arfagem (heave), medida na direção do eixo  $Gz$ ;

$p$  [rad/s] é a velocidade angular de rolamento (roll), medida no referencial fixo no CG do veículo;

$q$  [rad/s] é a velocidade angular de caturro (pitch), medida no referencial fixo no CG do veículo;

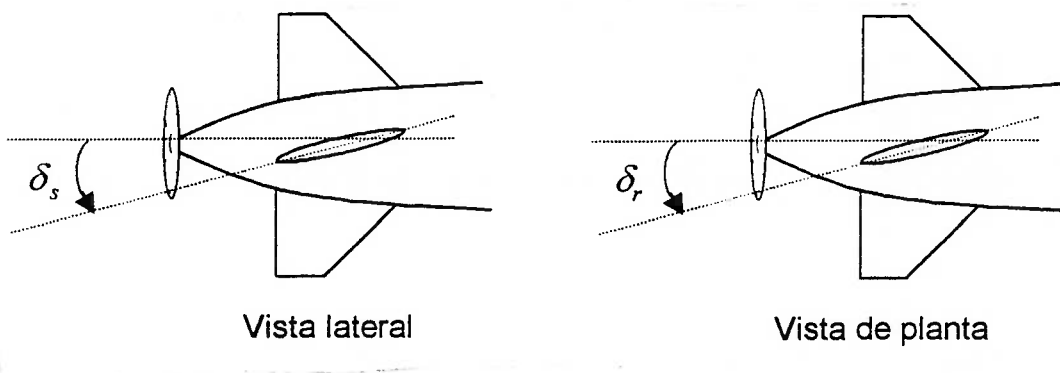
$r$  [rad/s] é a velocidade angular de rumo medida no referencial fixo no CG do veículo;

$\phi$  [rad] é o ângulo de balanço (roll), medido no referencial fixo em terra;

$\theta$  [rad] é o ângulo de caturro, medido no referencial fixo em terra;

$\psi$  [rad] é o ângulo de rumo (yaw), medido no referencial fixo em terra;

O ângulo do leme é positivo conforme a convenção apresentada na Figura 3.3.



**Figura 3.3: Ângulo de leme**

### 3.1.2 Considerações Gerais

Para a dedução das equações são adotadas algumas simplificações, dentre as quais destacam-se (**hipóteses simplificadoras**):

- 1-A posição do CG não varia ao longo do tempo (o que é particularmente verdadeiro para o submarino);
- 2-A posição do centro de carena não varia ao longo do tempo, considerando que durante toda a simulação o corpo do submarino estará submerso;
- 3- As correntes marítimas agem uniformemente ao longo do casco não alterando o rumo, mas apenas provocando a deriva de caturro ou caimento, ou variando a velocidade de avanço;
- 4- Os eixos principais de inércia coincidem com os eixos "Gx", "Gy", "Gz".

As equações de movimento para o veículo, incluindo a dinâmica do eixo propulsor, são as seguintes:

$$X = m. (\dot{u} + q.w - r.v) \quad (3.1)$$

$$Y = m. (\dot{v} + r.u - p.v) \quad (3.2)$$

$$Z = m. (\dot{w} + p.v - q.u) \quad (3.3)$$

$$K = I_{xx} \cdot \dot{p} + (I_{zz} - I_{yy}) \cdot q \cdot r \quad (3.4)$$

$$M = I_{yy} \cdot \dot{q} + (I_{xx} - I_{zz}) \cdot r \cdot p \quad (3.5)$$

$$N = I_{zz} \cdot \dot{r} + (I_{yy} - I_{xx}) \cdot p \cdot q \quad (3.6)$$

O desenvolvimento dos modelos dos diversos termos das equações (3.1 a 3.6), principalmente aquelas que representam os esforços hidrodinâmicos no caso, conduzem a equações não lineares.

São consideradas como referência para a modelagem do submarino, as equações apresentadas no trabalho de Feldman (1979) e de Gertler e Hagen (1967). Os valores dos coeficientes hidrodinâmicos utilizados foram obtidos de documentos não publicados do submarino Tupi não e por este motivo não são referenciados.

Conforme os pesquisadores relacionados acima, as equações são suficientes para descrever as trajetórias e respostas, nos seis graus de liberdade, de um submarino submerso executando desde manobras simples até manobras mais complexas, incluindo o emperramento de lemes, mas sempre com o movimento para vante (velocidade de avanço  $u$  maior que zero). Para utilizar as mesmas equações para submarino em movimento para ré, são necessárias trocas adequadas dos coeficientes, caso não estudado neste trabalho.

Parte-se, inicialmente, do modelo completo proposto por Canhetti (1998). Neste modelo são consideradas as não linearidades e é representado o movimento do submarino nos seis graus de liberdade. A principal utilidade deste modelo para o

trabalho é permitir um estudo mais preciso do comportamento do veículo e, assim, determinar características operacionais do mesmo. Neste modelo não são considerados os efeitos de corrente e de ondas.

O modelo que representa o movimento nos seis graus de liberdade é convenientemente desacoplado por Canhetti (1998) em diversos subsistemas e depois linearizados. Neste trabalho inicialmente será utilizado um caminho parecido. Primeiro serão utilizados os modelos linearizados de Canhetti (1998) que representam a relação leme X trim e leme X profundidade. A partir destes modelos fica mais fácil dimensionar o controlador "fuzzy" e avaliar o seu desempenho. Depois serão extraídas do modelo completo as equações que representam o movimento no plano vertical e, em uma última etapa, serão adicionados os modelamentos do leme proposto por Cruz (1981) e dos efeitos ambientais proposto por Gueler (1987).

São apresentadas no anexo A as equações diferenciais que representam o modelo completo do submarino. Neste anexo são apresentadas as equações de movimento para as variáveis  $u$ ,  $v$ ,  $w$ ,  $p$ ,  $q$ , e  $r$ , que modelam o movimento do veículo em relação ao sistema de coordenadas móveis (Gxyz). No anexo B são apresentados os valores dos coeficientes hidrodinâmicos utilizados, que correspondem ao submarino Tupi.

As equações auxiliares são apresentadas no Anexo C; elas são as equações de Euler, que transformam as coordenadas do sistema de referência fixo em terra, obtidas por Feldman (1979).

As equações diferenciais de movimento utilizadas são as apresentadas por Feldman, 1979, considerando as **hipóteses simplificadoras**.

As equações do movimento do veículo no plano vertical são obtidas considerando-se a ausência de balanço, deriva e guinada, isto é:

$$p = v = r = 0$$

Resultam, portanto, quatro equações de movimento:

$$m \cdot (\dot{u} - w \cdot q) = X_c + X_p + X_l + X_{c0} \quad (3.7)$$



$$m \cdot (\dot{w} + u \cdot q) = Z_c + Z_l + Z_a + Z_o + Z_{co} \quad (3.8)$$

$$I_{yy} \cdot \dot{q} = M_c + M_l + M_a + M_o + M_{co} \quad (3.9)$$

$$2 \cdot \pi \cdot I_{pp} \cdot \dot{n} = Q_m + Q_p \quad (3.10)$$

onde:

$m$  é a massa do submarino;

$I_{yy}$  é o momento de inércia do veículo em relação ao eixo  $Gy$ ;

$I_p$  é o momento de inércia do eixo propulsor;

$X$  e  $Z$  são as forças nas direções  $Gx$  e  $Gz$ , respectivamente;

$M$  é o momento em torno do eixo  $Gy$ , perpendicular ao plano  $xz$ ;

$Q$  é o torque;

$n$  é rotação do eixo propulsor;

$c, l, p, co, o, a, m$  se referem, respectivamente, a casco, leme, propulsor, corrente, ondas, apêndices e motor.

As equações para obter a trajetória do veículo e seu ângulo de vaturro são :

$$\dot{x}_{0G} = u \cdot \cos \theta - w \cdot \sin \theta \quad (3.11)$$

$$\dot{z}_{0G} = u \cdot \sin \theta + w \cdot \cos \theta \quad (3.12)$$

### 3.2 Modelos Matemáticos

Considerando o movimento do submarino restrito ao plano vertical, são descritos a seguir, os modelos adotados para os diversos componentes.

### 3.2.1 Modelo completo

#### a) Casco

Os esforços de natureza hidrostática e hidrodinâmica que atuam sobre o casco são representados pelo seguinte conjunto de equações:

$$X_C = - (X_{\dot{u}})_C \cdot \dot{u} + (X_{wq})_C \cdot w \cdot q + X_R \quad (3.13)$$

$$Z_C = (Z_{\dot{w}})_C \cdot \dot{w} + (Z_{uq})_C \cdot u \cdot q + (Z_w)_C \cdot w + (Z_q)_C \cdot q + \\ Z_{ww} \cdot w \cdot |w| + Z_{qq} \cdot q \cdot |q| + Z_{wq} \cdot w \cdot |q| \quad (3.14)$$

$$M_C = (M_{\dot{q}})_C \cdot \dot{q} + (M_q)_C \cdot q + (M_w)_C \cdot w + M_{wwq} \cdot w \cdot w \cdot q + \\ M_{qqw} \cdot q \cdot q \cdot w + M_{qq} \cdot q \cdot |q| + M_R \quad (3.15)$$

Nestas equações  $X_r$  é a resistência ao avanço do veículo,  $M_r$  é o momento de restauração e os demais coeficientes são as derivadas hidrodinâmicas do veículo.

#### b) Propulsor

A atuação do propulsor é representada pelo conjugado absorvido  $Q_p$  e pelo empuxo líquido produzido  $X_p$ . Estes esforços são calculados a partir do diagrama de série sistemática do hélice (Brinati, 1991):

$$KT(J) = \frac{T_A}{\rho \cdot n^2 \cdot D_p^4} \quad (3.16)$$

$$KQ(J) = \frac{Q_p}{\rho \cdot n^2 \cdot D_p^4} \quad (3.17)$$

$$J = \frac{V_a}{n \cdot D_p} \quad (3.18)$$

onde:

$K_q$  e  $K_t$  são, respectivamente, os coeficientes de conjugado e empuxo;

$J$  é o coeficiente de avanço

$\rho$  é a densidade da água;

$D_p$  é o diâmetro do hélice.

$T_a$  é o empuxo do propulsor em água aberta

$V_a$  é a velocidade de avanço do hélice, relacionada com a velocidade do veículo através de :

$V_a = (1 - \text{west}) u$ ; onde  $\text{west}$  é o coeficiente médio de esteira do veículo.

### c) Máquina do leme

Conforme explica Cruz (1981), o ângulo de leme não pode ser caracterizado como variável de controle, em virtude da dinâmica associada à máquina do leme. Ele afirma também que em virtude do tempo necessário para o acionamento do leme, até atingir o valor comandado, a exigência que seja constante por trechos não seria satisfeita. Por isto adota-se uma distinção entre ângulo do leme comandado e o efetivamente assumido pelo leme. Por outro lado, Gueler (1987) adota como modelo da representação dinâmica do leme:

$$d(\delta a(t))/dt = [\delta b(t) - \delta a(t)]/T_e \quad (3.19)$$

onde  $\delta a$  é o ângulo de efetivo acionamento e  $\delta b$  é o ângulo comandado e  $T_e$  é a constante de tempo da máquina do leme; adotou-se  $T_e = 1$  s, que é o valor usual em máquinas de leme convencionais.

Os valores máximos da deflexão e da velocidade de acionamento do leme utilizados no trabalho são os usuais:

$$\delta a(t) \leq 35^\circ \quad \text{e} \quad d[\delta a(t)]/dt \leq 3^\circ/\text{s} \quad (3.20)$$

### 3.2.2 Linearização do modelo

A linearização do modelo é feita de acordo com Canhetti (1998) e se baseia na determinação de funções de transferência entre os movimentos de heave (velocidade vertical) e pitch (caturro) do submarino e a deflexão do leme. Para isto, são considerados, nas condições de regime permanente: a velocidade de avanço constante; as velocidades de caturro e caimento nulas ( $v=w=0$ ); e a variação do ângulo de rumo nulo ( $r=0$ ); e considerando uma pequena variação ( $\Delta$ ) nas demais variáveis, pode-se rescrever a Equação :

$$d\theta/dt = q \cos\phi - r \sin\phi$$

da seguinte maneira:

$$(d\theta/dt + \Delta\theta) = \cos(\phi_0 + \Delta\phi) * (q_0 + \Delta q) \quad (3.21)$$

Considerando-se para o ponto de operação, ainda nas condições de regime permanente, que o ângulo de trim e o de balanço são nulos ( $\theta = \Phi = 0$ ), e que a velocidade angular de trim ( $q = 0$ ) também é nula, tem-se :

$$(\Delta\dot{\theta}) = \cos(\Delta\phi) * (\Delta q) \quad (3.22)$$

Para pequenos valores de ângulo de balanço;

$$(\Delta\dot{\theta}) \cong (\Delta q) \quad (3.23)$$

Similarmente, a dinâmica da arfagem pode ser representada por;

$$(\dot{z}_0 + \Delta\dot{z}) = -\sin(\theta_0 + \Delta\theta)(u_0 + \Delta u) + \cos(\theta_0 + \Delta\theta)\cos(\phi_0 + \Delta\phi)(w_0 + \Delta w) \quad (3.24)$$

Utilizando fórmulas trigonométricas, considerando que o balanço é desprezível ( $\phi_0=0$ ), e desprezando-se os termos de segunda ordem, a arfagem ( $z$ ) deverá sofrer variações de acordo com a seguinte equação:

$$(\Delta \dot{z}) = -\sin(\theta_0) * \Delta u - \cos(\theta_0) * \Delta \theta + \cos(\theta_0) * \Delta w - \sin(\theta_0) * w_0 * \Delta \theta \quad (3.25)$$

Por simplicidade, pode-se admitir que a velocidade de caturro durante o mergulho é muito pequena e que  $X_g$  é nulo, isto é particularmente verdadeiro para o ML, que terá o CG praticamente fixo e deverá ter velocidade de caturro baixa (pequenos ângulos de trim). Com essas simplificações tem-se a Equação com os seguintes coeficientes:

$$\begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{M_q}{I_y - M_{\dot{q}}} & \frac{-\overline{BGW}}{I_y - M_{\dot{q}}} & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & -u_0 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} q \\ \theta \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{M_\delta}{I_y - M_{\dot{q}}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_s \quad y = [0 \quad 1 \quad 1] * \begin{bmatrix} q \\ \theta \\ z \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

E, a partir das equações de estado, as funções de transferência do caturro e da arfagem são obtidas utilizando-se os valores das derivadas hidrodinâmicas constantes no Anexo B

$$\frac{\theta}{\delta_s}(s) = \frac{K_\theta}{s^2 + 2\zeta_\theta \omega_\theta s + \omega_\theta^2} \quad (3.27)$$

$$\frac{z}{\delta_s}(s) = \frac{u_0}{s} \frac{\theta(s)}{\delta_s(s)} \quad (3.28)$$

$$\text{CATURRO/LEME} = (3,66)/(S^2 + 0,5852S + 0,036) \quad (3.29)$$

$$\text{PROFUNDIDADE/LEME} = (3,66)/(S^3 + 0,5852 S^2 + 0,036S) \quad (3.30)$$

onde a constante de ganho  $K_\theta$ , a frequência natural  $\omega$  e o coeficiente de amortecimento  $\zeta_\theta$  são dados por:

$$K_\theta = \frac{M_\delta}{(I_y - M_{\dot{q}})} \quad (3.31)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{\overline{BGW}}{I_y - M_{\dot{q}}}} \quad (3.32)$$

### 3.2.3 Modelo matemático dos efeitos ambientais

De forma a tornar mais realística a representação do movimento do submarino serão considerados os efeitos ambientais, no caso ondas e corrente.

Os modelos utilizados para simular a corrente e a ação das ondas já foram descritos detalhadamente em outros trabalhos e são, na verdade, modelos simples. Eles permitem obter uma idéia da magnitude destes efeitos no submarino. Para a manutenção de profundidade, que ocorre em uma cota próxima da superfície, é considerado apenas o efeito das ondas, enquanto para a manobra de mudança de profundidade o elemento ambiental predominante é o produzido pela corrente.

#### I- Ondas

A atuação das ondas sobre o submarino, quando próximo da superfície do mar, ocorre de forma similar à atuação das ondas em um navio na superfície, ou seja constitui um processo de natureza estocástico. Para sua representação é usual empregar-se uma amostra dos esforços a partir de estatísticas.

Utilizar-se-á um método similar ao utilizado por Gueler (1987) e que constitui o método mais comum de representar os esforços devido à ação das ondas. O método consiste em determinar inicialmente a função de transferência que relaciona amplitude de onda e esforços sobre o corpo.

Depois, utiliza-se um dado espectro de mar (corrigido para a velocidade relativa entre o veículo e o trem de ondas), aplicam-se as funções de transferência levantadas, obtendo-se a densidade espectral da força de arfagem e do momento de caturro. Este método é empregado para o cálculo do momento de caturro e da força de arfagem de primeira ordem. Para o cálculo da componente de segunda ordem da força de arfagem, que é constante no tempo, emprega-se um procedimento diferente conforme Gueler (1987).

Com o valor das componentes de força e momento devido à ação das ondas sobre o submarino, calcula-se a aceleração vertical e aceleração angular que, com as devidas integrações, irão gerar o desvio na profundidade e no ângulo de caturro. Estes apresentam natureza estocástica influenciando o comportamento do submarino quando em cota periscópica.

O cálculo dos esforços devido a uma onda regular sobre o submarino é realizado mediante a hipótese de Froude-Krilov, segundo a qual o potencial das ondas difratadas pela passagem do veículo é desprezível perante o potencial das ondas incidentes (Gueller, 1987).

A ação das ondas sobre o submarino é dividida em um momento de caturro e uma força vertical, que são calculados pela integração ao longo do casco da componente vertical da pressão. Determinam-se, assim, as componente de força  $Z_o(\omega)$  e  $M_o(\omega)$ .

Dois espectros de amplitude de onda podem ser utilizados de forma conveniente, o espectro ITTC (International Towing Tank Conference) e o espectro ISSC (International Ship Structure Congress) (Gueller, 1987). Embora existam outros espectros para a representação do mar aleatório (Pierson-Moskovitz, Newmann), esses dois são adequados para representar a maior parte dos mares que são encontrados na costa brasileira (National Academy of Sciences, 1963). Porém, estes espectros a princípio só podem ser utilizados para o cálculo de esforços sobre o veículo parado. Deve-se, portanto, para o submarino em movimento efetuar o cálculo levando em consideração o espectro de encontro (Canhetti, 1998).

As amostras dos esforços de ondas que atuam sobre o submarino são geradas a partir da densidade espectral dos mesmos, mediante a aplicação de integrais de convolução, onde a entrada é um ruído branco gaussiano com desvio padrão unitário (Canhetti, 1998).

## **II- Corrente**

O modelo matemático para a representação dos efeitos da corrente inclui dois parâmetros: a intensidade e a direção. A corrente geralmente varia com o tempo e com a

profundidade, porém no caso em questão a mesma será considerada constante no tempo e na profundidade. O efeito da corrente está presente nas componentes  $u$  e  $w$  do movimento do veículo em relação à água. Este efeito é função da velocidade da corrente e do ângulo entre a direção da corrente e a orientação do veículo no plano vertical. No presente modelo a velocidade de avanço é admitida constante e o efeito importante está no desvio que esta corrente introduz na profundidade. Assim a nova velocidade de descida  $w_c$  passa a ser uma soma da velocidade de descida original e a componente da corrente projetada sobre a vertical em um ângulo que varia de acordo com o ângulo de caturro e a direção da corrente (Brinati, 1991).

### **3.3 Implementação dos Modelos**

Para implementação dos modelos partiu-se de um veículo real denominado Modelo Livre. O Modelo Livre é um veículo submersível autônomo, não tripulado, com as dimensões correspondentes às de um submarino em escala reduzida, com o propósito de servir como laboratório de modelo físico em apoio ao desenvolvimento de projetos de submarinos (Canhetti, 1998).

#### **3.3.1 Modelos no software utilizado**

No anexo F é apresentado, passo a passo, o processo de construção do modelo no software utilizado. Foram simulados 5 modelos: um modelo linear do submarino com a inclusão do efeito da corrente, um modelo linear do submarino com a inclusão do efeito das ondas, um modelo não linear do submarino (somente movimento no plano vertical) com a inclusão do efeito corrente, um modelo não linear do submarino (somente movimento no plano vertical) com a inclusão do efeito das ondas, e um modelo não linear do submarino que simula os 6 graus de liberdade. No anexo D são apresentados os modelos no software utilizado.

O modelo não linearizado é composto por 6 equações principais dos seis graus de liberdade do submarino, 5 equações referentes ao propulsor e uma da resistência ao



avanço pode-se assim observar as diversas variáveis  $J$ ,  $k_t$ ,  $k_q$ ,  $T_p$ ,  $du$ ,  $u$ ,  $dv$ ,  $v$ ,  $dw$ ,  $w$ ,  $dp$ ,  $p$ ,  $dq$ ,  $q$ ,  $dr$ ,  $r$ , rumo, banda, caturro,  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$ , ao longo do tempo.

No anexo D pode-se visualizar de forma ilustrativa a planta completa não linearizada. No apêndice A são encontradas as equações em linguagem de MATLAB que estão contidas em cada bloco de função  $f(u)$ . As derivadas hidrodinâmicas foram extraídas do trabalho de Canhetti (1998) sobre o modelo livre utilizado.

No modelo completo não linearizado as entradas para este sistema são os ângulos dos lemes horizontal e vertical e a rotação do motor. Porém, este modelo além de complexo e lento na simulação, não permite de forma clara a simulação e análise do controlador pois ele trabalha com diversas variáveis de controle e diversas variáveis medidas, representando as mais diversas funções existentes em um submarino. Por esta razão buscou-se um modelo não linear que represente o movimento no plano vertical.

Para a implementação da modelagem matemática do modelo que representa o movimento somente no plano vertical (obtidos através da resolução do sistema de equações 3.10 a 3.13) foi utilizado o programa SIMULINK. Optou-se por se utilizar este software por que ele possui ferramentas especialmente construídas para a simulação e controle, dentre outras.

O programa permite grande flexibilidade na alteração dos valores de referência, nas constantes características do submarino e na aquisição das respostas gráficas. Os valores, mesmos os de referência, podem ser alterados durante as simulações.

O anexo D apresenta os diagramas de blocos utilizados para a implementar os modelos no SIMULINK.

### **3.3.2 Validação do Modelo Não linear**

Para validação dos modelos é necessária a realização de testes. Estes testes são feitos a partir de manobras específicas denominadas de manobras de testes. Para a familiarização com os modelos e comparação entre o modelo linear e os modelos não lineares (tanto o de 3 graus de liberdade quanto o de 6 graus de liberdade) foram utilizadas manobras diversas que não representam necessariamente manobras reais do

submarino (como a manobra que simula um movimento senoidal). Mas, em contrapartida, estas manobras facilitam a comparação entre os modelos e permite a primeira familiarização com a dinâmica do submarino.

A validação deste modelo é feita simulando uma dada manobra no modelo completo e depois reproduzindo-a no modelo não linear no plano vertical. Para isto utilizou-se como padrão uma variação senoidal do ângulo de leme vertical e uma rotação constante, o ângulo de leme horizontal foi considerado nulo. Observou-se uma compatibilidade muito grande entre os dois modelos, o maior *erro na profundidade* observado foi de 20m em um mergulho de 600m, e o erro no *caturo* ( diferença entre os modelo linear e o modelos não lineares ) foi menor que 1 grau.

Assim, percebe-se que o modelo não linear de profundidade representa de forma adequada o movimento no plano vertical. No anexo E podem ser vistas as simulações de ângulos de leme e as respostas dos diversos modelos.

## **CAPÍTULO 4 PROJETO DO SISTEMA DE CONTROLE**

Neste capítulo serão estabelecidas as linhas gerais do projeto de um controlador "fuzzy" que atue no submarino, permitindo o cumprimento eficaz de suas missões. Na parte inicial do capítulo serão apresentadas algumas considerações sobre as diversas formas possíveis de projetar um controlador "fuzzy", depois serão mostrados os passos seguidos no projeto, desde a escolha das regras "fuzzy", passando pela definição das variáveis de controle e chegando à formulação das estruturas dos diversos controladores. Finalmente será feita uma comparação entre o controlador "fuzzy" e um controlador tipo PID.

Será projetado, inicialmente, um controlador "fuzzy" de duas entradas que seja capaz de atuar de forma eficiente no modelo linearizado de Canhetti (1998). Posteriormente, será aumentada a complexidade até um controlador "fuzzy" de três entradas que seja capaz de atuar eficientemente no modelo não linear e sob o efeito de perturbações.

### **4.1 Concepção do Sistema de Controle**

Inicialmente, como ocorre no projeto de qualquer controlador, deve-se estudar as características da planta. Para isto são feitas simulações dos modelos estabelecidos e verificadas características de projeto tais como tempo de resposta etc. Posteriormente, deve-se estudar o comportamento operativo do submarino e determinar por exemplo: máxima velocidade de descida, comportamento do ângulo de caturro quando em manobra de mudança de profundidade etc.

Depois de estudar o modelo, devem ser estabelecidas quais serão as variáveis a serem controladas, quais as variáveis de controle e ainda as variáveis a serem medidas. Neste projeto será utilizada inicialmente como variável a ser controlada a "PROFUNDIDADE", depois será acrescentada como variável a ser controlada o "ÂNGULO DE CATURRO". Esta variável "ÂNGULO DE CATURRO" é inicialmente apenas monitorada (no controlador "fuzzy" de duas entradas).

Posteriormente ela se torna um dos objetivos de controle pois tão importante quanto o submarino cumprir uma dada trajetória de descida é fazê-lo sem movimentos angulares bruscos que dificultem o desempenho de todo o sistema de combate, além de produzir um enorme desconforto para a tripulação.

Como variável de controle ou elemento de controle é utilizado o "ÂNGULO DE LEME". A escolha é óbvia já que o leme é o elemento físico que altera a profundidade do submarino. As variáveis de entrada no controlador podem ser: o erro da profundidade, a taxa de variação da profundidade, a taxa de variação do erro da profundidade e o ângulo de caturro.

São considerados dois controladores "fuzzy" o primeiro denominado FUZZY TIPO 1 (com apenas duas entradas) e o segundo é chamado de FUZZY TIPO 2 (com 3 entradas).

O primeiro controlador, FUZZY TIPO 1 apresenta duas entradas . As variáveis de entrada são o *erro de profundidade* e a *taxa de variação do erro*

O segundo controlador, FUZZY TIPO 2, surge da necessidade de melhorar o desempenho do controlador de duas entradas, já que inicialmente o de caturro é apenas uma variável medida não influenciando no processo decisório. Neste novo tipo de controlador, utiliza-se o ÂNGULO DE CATURRO como variável de entrada, além das duas variáveis do modelo FUZZY TIPO 1. Portanto o TIPO 2 tem como variáveis de entrada o *erro de profundidade*, a *taxa de variação do erro de profundidade* e o *ângulo de caturro*.

Ainda é projetado um controlador tipo PID semelhante ao proposto por Canhetti (1998) e pode ser feita uma comparação entre este controlador e os controladores "fuzzy".

Como já foi descrito anteriormente, podem-se utilizar 4 modelos de submarinos, de acordo com a complexidade do equacionamento e a presença ou não de distúrbios externos. O que determinará o tipo de perturbação externa é a manobra a ser executada pelo submarino. Para uma manobra de mudança de profundidade é utilizada a perturbação provocada pela atuação de corrente. Na manobra de

manutenção de profundidade é utilizada a perturbação provocada pelas ondas de superfície. Resumindo: o modelo M1 é o modelo linearizado de Canhetti (1998) com a influência de ondas, o modelo M2 é linearizado com a influência de corrente, o modelo M3 é não linear com influência de ondas e, por último, o modelo M4 é não linear com a influência de corrente.

São 3 controladores a serem aplicados em 4 modelos, totalizando um conjunto de 12 manobras a serem simuladas (12 testes). Porém, para fins de testes e validação utilizar-se-á os controladores apenas no modelo não linear.

Os controladores possuem duas missões principais que permitem a avaliação segura dos seus desempenhos (Brinati, 1991). A primeira, chamada de "manutenção da cota periscópica", é o controle da profundidade do veículo, permitindo que o submarino navegue a uma dada profundidade constante, próximo da superfície livre do mar, sujeito às perturbações de natureza estocástica, forças e momentos provenientes das ondas do mar. Na cota periscópica o submarino usa as tubulações de admissão e descarga para a utilização dos motores Diesel, enquanto as baterias elétricas são recarregadas. O submarino deve manter-se na profundidade desejada e permanecer com ângulos de caturro (pitch) pequenos para não provocar desconforto para a tripulação.

Outra missão consiste na mudança de profundidade do submarino, controlada automaticamente, realizando uma mudança de cota pré-fixada pelo operador. O veículo pode estar sujeito à perturbação externa, representada pela corrente marinha. O ideal é que o submarino realize qualquer manobra em uma trajetória adequada, evitando ângulos de caturro elevados e erros de profundidade (overshoots) excessivos.

A tabela 4.1 apresenta um resumo das características dos controladores "fuzzy". Na primeira coluna têm-se os tipos de controladores e nas colunas seguintes são mostradas as características dos mesmos.

**Tabela 4.1 Características dos controladores "fuzzy"**

TIPO DE CONTROLADOR	Número de variáveis de entrada	Variáveis de entrada	Variável de saída
TIPO 1	2	Erro de profundidade, taxa de variação do erro	Leme
TIPO 2	3	Igual ao tipo 1 mais o ângulo de caturro	Leme

A tabela 4.2 é uma síntese dos diversos modelos; a quinta coluna apresenta a aplicação de cada modelo. Na quarta coluna são indicadas as variáveis observadas nas simulações. Quando se refere à simulação de forma independente significa que por ocasião das linearizações obtiveram-se duas funções de transferência: a primeira relaciona a profundidade com o ângulo de leme (sem a presença do ângulo de caturro) e a segunda relaciona o ângulo de caturro com o ângulo de leme (sem a presença da profundidade).

**Tabela 4.2 Características dos Modelos**

NOME DO MODELO	Tipo	Graus de liberdade	Variáveis de saída	Utilização	Perturbação
M1	Linear	3	Profundidade e caturro de forma independente	Manutenção de profundidade	Ondas

NOME DO MODELO	Tipo	Graus de liberdade	Variáveis de saída	Utilização	Perturbação
M2	Linear	3	Profundidade e caturro de forma independente	Mudança de profundidade	Corrente
M3	Não linear	3	Profundidade e caturro de forma dependente	Manutenção de de profundidade	Ondas
M4	Não linear	3	Profundidade e caturro de forma dependente	Mudança de profundidade	Corrente

#### 4.2. Estrutura do Controlador

São apresentadas nesta seção as estruturas adotadas para os diversos controladores "fuzzy" propostos. Todos os controladores devem atender os requisitos de "**regulagem**" - manutenção de cota periscópica - e "**traqueamento**" - acompanhamento da trajetória de referência.

O controlador atua no elemento de controle, leme horizontal de forma a seguir uma trajetória em profundidade desejada ou para permanecer em uma dada profundidade. Trata-se no primeiro caso de um controle do tipo "tracking" ou traqueamento e no segundo de um regulador (Brinati, 1991).

O sistema de controle do submarino foi desenvolvido inicialmente com a finalidade de controlar apenas a profundidade do submarino. Será utilizado, então, um controlador FUZZY que tem como entradas o erro de profundidade (que se compõe da diferença entre a profundidade ideal e a profundidade real) e variação do

um controlador FUZZY que tem como entradas o erro de profundidade (que se compõe da diferença entre a profundidade ideal e a profundidade real) e variação do erro de profundidade (calculada pela sua derivada) -- controlador tipo 1 . este controlador é utilizado no modelo linear e depois é efetivamente avaliado no modelo não linear .

Posteriormente é projetado um controlador de 3 entradas (FUZZY TIPO 2) que atuará inicialmente na planta linearizada e depois na planta não linearizada.

Os controladores "fuzzy" são assim desenvolvidos utilizando primeiramente modelos linearizados para representar as manobras do submarino. Determina-se, desta forma, um conjunto de regras. Em seguida utilizando os modelos não lineares, é possível ajustar estas regras para atingir o desempenho desejado do controlador.

A seqüência adotada para o projeto do controlador tem um caráter eminentemente didático. Sabe-se que o controlador de profundidade necessita ser projetado em conjunto com o ângulo de caturro, conforme já citado por Fossen (1994). Isto ocorre porque, desconsiderando alterações nos tanques de lastro, a variação de profundidade só ocorre com a variação do ângulo de caturro.

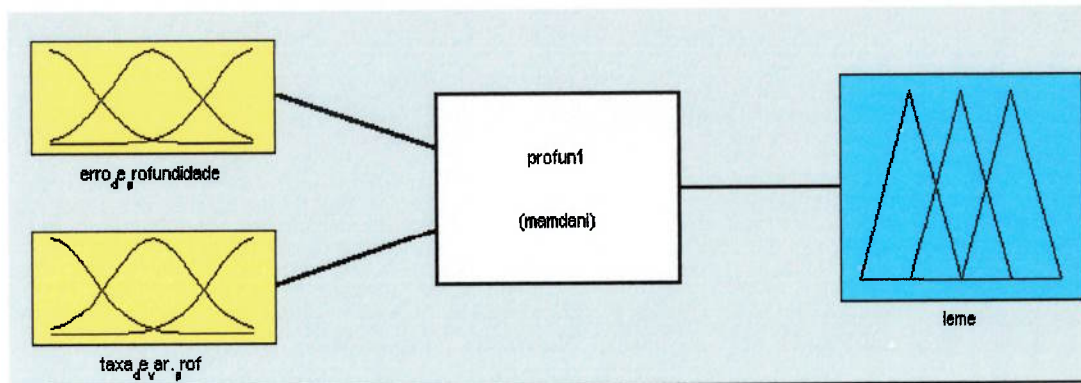
#### **4.2.1 Controlador Fuzzy tipo 1**

O controlador FUZZY TIPO 1 possui como variáveis de entrada o erro de profundidade e sua taxa de variação e como variável de saída o ângulo de leme. As regras para a tomada de decisão são do tipo "SE ... ENTÃO". Os parâmetros de regulação do controlador tais como: codificação, agregação, inferência e decodificação foram alterados na medida em que eram realizadas as simulações, de forma a obter o melhor desempenho possível para o controlador.

Para estabelecer as regras, admite-se que a variável "erro de profundidade" possui três níveis positivo, negativo e nulo, enquanto a variável "taxa de variação do erro de profundidade" possui também três diferentes níveis que são positivo, negativo e nulo.

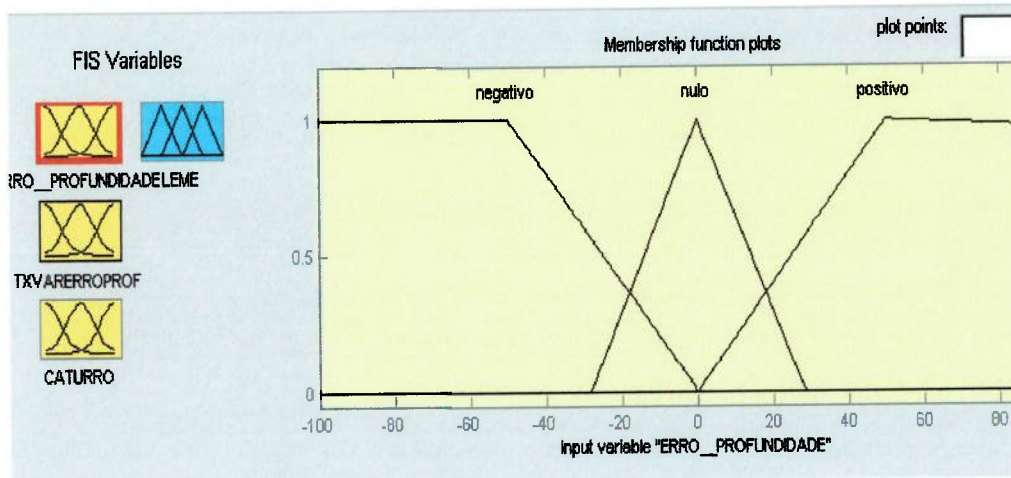


Pode-se ver na figura 4.1 a janela do editor "fuzzy" com as duas variáveis de entrada e a variável de saída *ângulo de leme*. O bloco central, de nome "profun1", representa o controlador propriamente dito, que, a partir dos valores das variáveis de entrada, ativa as regras de acordo com os parâmetros "fuzzy" previamente atribuídos. Esses parâmetros "fuzzy" definem o tipo de decodificação, de método de agregação de regras etc. No caso utiliza-se o método Mamdani.



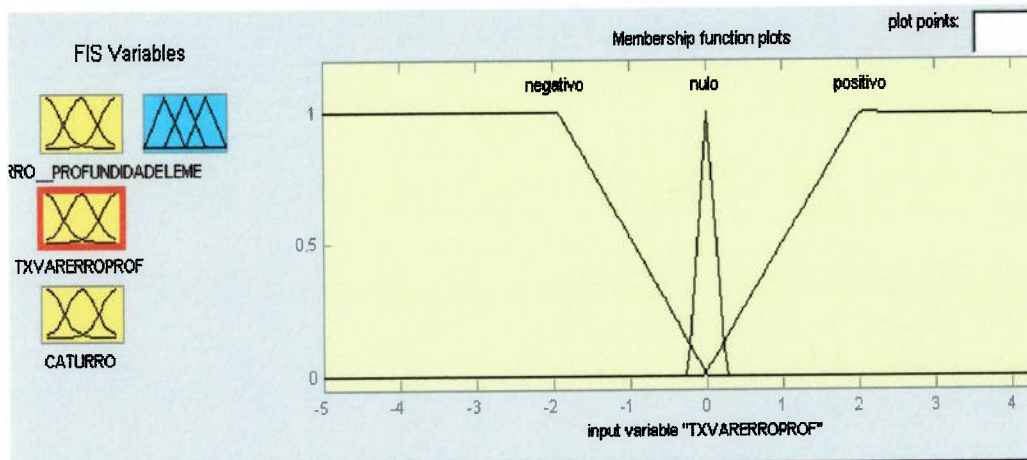
**Figura 4.1 Variáveis "fuzzy" para o controlador F1.**

A figura 4.2 apresenta a especificação da variável *erro de profundidade* que possui 3 diferentes níveis, conforme varia o valor do erro que é calculado da seguinte forma  $Erro = profundidade\ desejada - profundidade\ real$ . Estes diferentes níveis são representados por funções de pertinência (semelhantes à explicada na figura 2.1 do capítulo 2) que definem os três conjuntos "fuzzy": **negativo**, **positivo** e **nulo** (os conjuntos são triangulares, sendo que os conjuntos **negativo** e **positivo** possuem um dos vértices no infinito). Na figura 4.2 pode-se ver ainda como é realizada a codificação, de forma similar à que foi vista na figura 2.3 do capítulo 2. Os valores no eixo horizontal estão em metros.



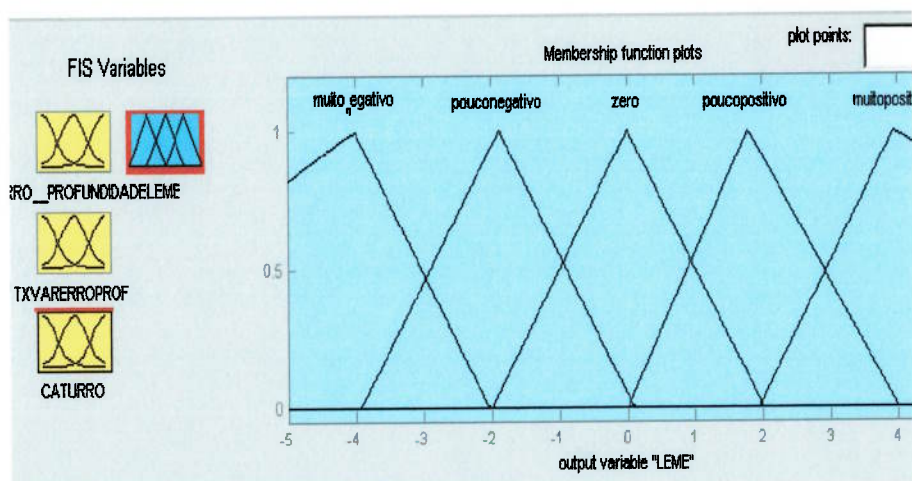
**Figura 4.2 Variável Erro de profundidade**

Na figura 4.3 é apresentada a variável "taxa de variação do erro da profundidade". Os valores no eixo horizontal estão em metros por segundo ( m/s). Na verdade, a amplitude dos conjuntos "fuzzy " que definem a variável da figura 4.3, assim como no caso de qualquer outra variável deste trabalho, sofre pequenas alterações em função do tipo de manobra a ser simulada e do modelo de submarino a ser utilizado. Pode-se ver na figura 4.3 um exemplo de como é codificada a variável em função do valor de entrada. Assim, se o valor da taxa de variação de profundidade for, por exemplo, igual a 3, implicará que pertence somente ao conjunto *positivo* com grau de pertinência igual a 1.



**Figura 4.3** Variável taxa de variação do erro de profundidade

E, por último, tem-se a variável de controle que é o *ângulo de leme*. Esta variável pode pertencer a cinco conjuntos "fuzzy" dependendo do seu valor. Os conjuntos apresentam a forma triangular na figura 4.4 e a amplitude destes conjuntos pode variar dependendo da manobra e do modelo utilizado. Os valores no eixo horizontal estão em graus.



**Figura 4.4** Variável de saída : ângulo de leme

As regras para o controlador tipo 1 são muito simples, basicamente são extraídas do senso comum. Elas totalizam 5 regras, que foram suficientes para um bom desempenho do controlador (poder-se-ia utilizar até no máximo 9 regras, resultado da multiplicação dos três diferentes níveis da primeira variável de entrada com os três diferentes níveis da segunda variável de entrada, gerando 9 combinações possíveis). Optou-se por uma questão de linguagem de se denominar o movimento no leme que proporciona um aumento na profundidade de movimento "para baixo" e em sentido contrário denominou-se "movimento para cima". As regras inicialmente utilizadas foram:

1- SE O ERRO É NULO E A TAXA É NULA ENTÃO NÃO SE DEVE ACIONAR O LEME

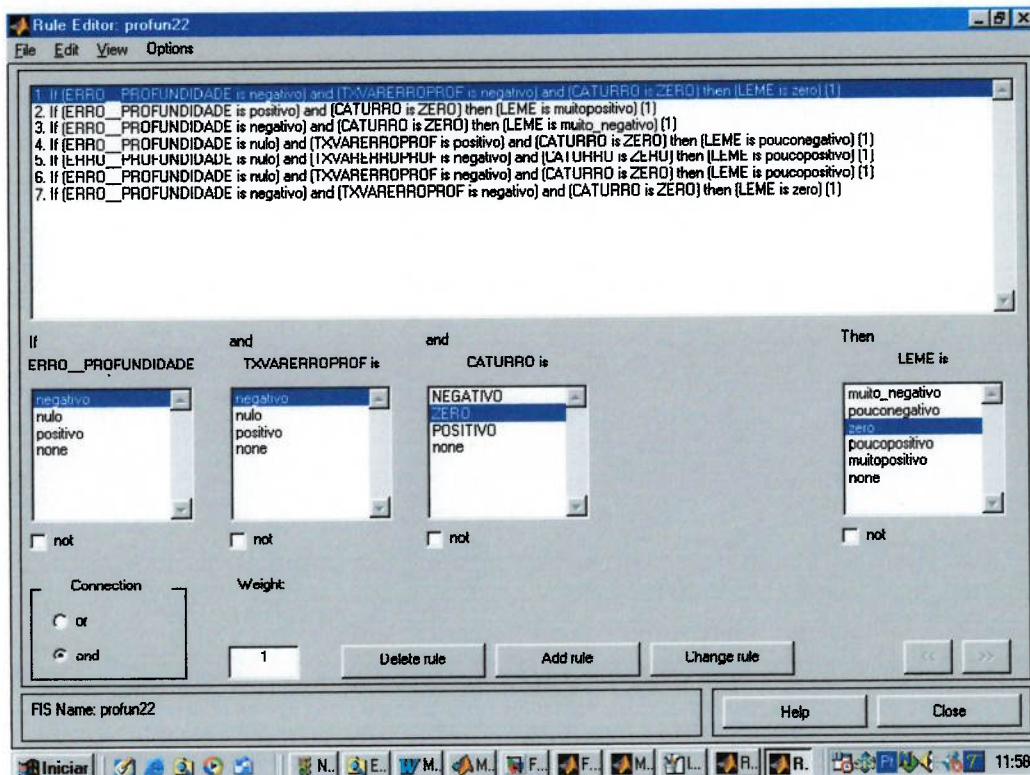
2-SE O ERRO É POSITIVO ENTÃO O LEME DEVE SER MOVIMENTADO MUITO PARA BAIXO

3- SE O ERRO É NEGATIVO ENTÃO O LEME DEVE SER MOVIMENTADO MUITO PARA CIMA

4-SE O ERRO É NULO E TAXA DE VARIAÇÃO DA PROFUNDIDADE É POSITIVA ENTÃO O LEME DEVE SER MOVIMENTADO POUCO PARA BAIXO

5- SE O ERRO É NULO E A TAXA É NEGATIVA ENTÃO MOVIMENTAR O LEME POUCO PARA CIMA

Na figura 4.5 tem-se a visualização das regras no software utilizado; na parte superior da figura estão as regras e na parte inferior estão os conjuntos "fuzzy" que podem ser combinados usando IF (se), AND (e) e THEN (então).



**Figura 4.5** Janela do TOOLBOX/MATLAB para edição de regras

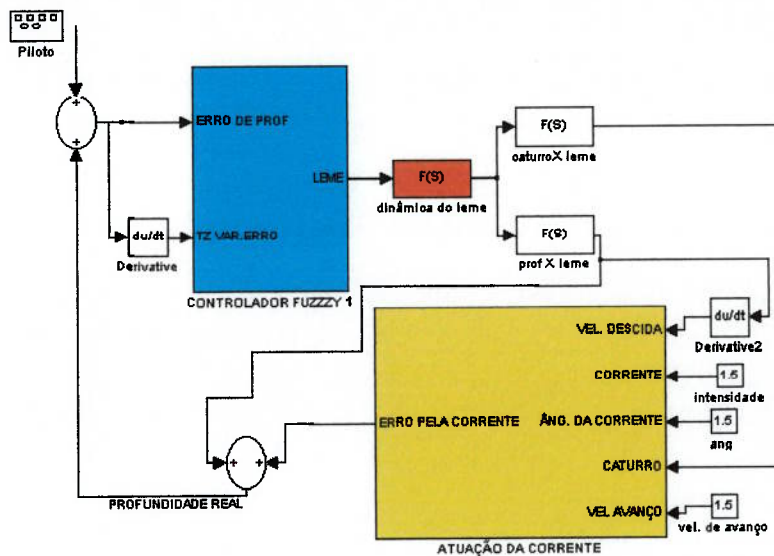
A escolha das regras foi feita a partir do estudo da dinâmica do submarino. Pode-se perceber numa observação mais cuidadosa que se tratam de regras intuitivas. Por exemplo a Regra 3: "SE O ERRO É NEGATIVO ENTÃO O LEME DEVE SER MOVIMENTADO MUITO PARA CIMA"; é lógico que se existe um erro a melhor atitude consiste em compensar este erro atuando no sentido oposto do mesmo. O mesmo vale para a Regra 4 "SE O ERRO É NULO E TAXA DE VARIAÇÃO DO ERRO DA PROFUNDIDADE É POSITIVA ENTÃO O LEME DEVE SER MOVIMENTADO POUCO PARA BAIXO"; neste caso não há erro mas existe uma tendência a que este erro ocorra, logo uma boa atitude é movimentar levemente o leme no sentido de anular este erro futuro.

Optou-se por um pequeno número de regras (poder-se-ia utilizar no caso até 9 regras, já que o erro de profundidade pode pertencer a três conjuntos "fuzzy"

distintos e a taxa de profundidade pode pertencer a outros três), pois a experiência comprova que a existência de um número de regras muito grande não significa uma atuação precisa do controlador. Um número excessivo de regras pode provocar uma série de inconveniências tais como: sobrecarga no elemento de controle, ajustes mínimos e imperceptíveis na variável controlada, sobrecarga computacional, regras redundantes etc. Ou seja, as regras são bem simples e feitas assim de forma proposital, visando facilitar as mudanças necessárias nas mesmas e evitando uma complicação desnecessária nesta fase inicial de projeto.

Pode-se, desta forma, verificar inicialmente a atuação deste controle mais simples e, depois, promover os ajustes adequados, tanto nas variáveis de entrada como nas variáveis de saída, possibilitando, ainda, de forma simples a inclusão ou exclusão de alguma regra.

A figura 4.6 ilustra a aplicação do controlador fuzzy 1 ao submarino representado pelo modelo linearizado M2, em uma manobra de mudança de profundidade. São ainda indicadas a dinâmica da máquina do leme em vermelho e em amarelo a atuação da corrente.



**Figura 4.6 Controlador "fuzzy" 1 (duas entradas) atuando no modelo linear tipo M2**

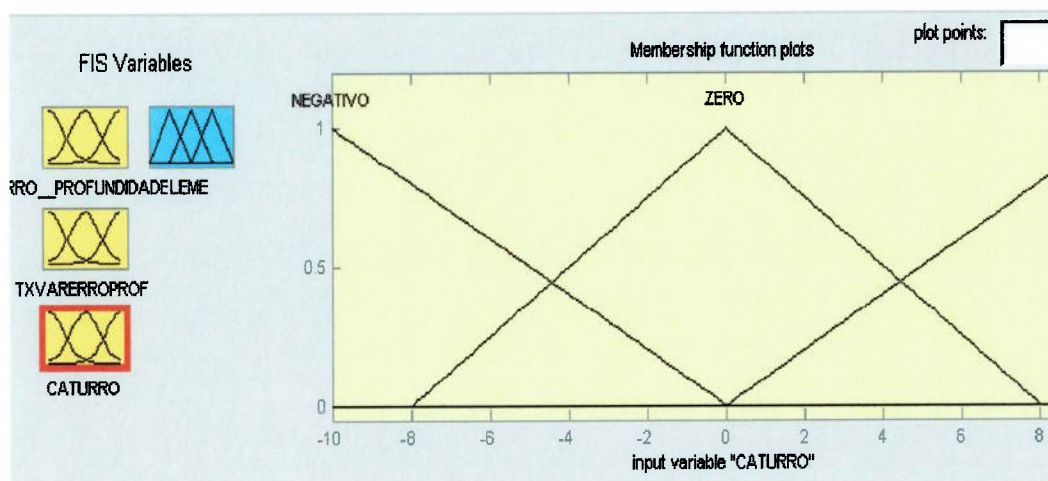
O gerador de sinal, no canto superior à direita, permite a simulação da trajetória desejada. No bloco "Fuzzy Logic Controller" estão inseridas todas as definições referentes ao controlador "fuzzy", como métodos de codificação, inferência, agregação, decodificação, conjuntos "fuzzy" etc. O bloco "profundidade x leme" contém a função de transferência que relaciona a *profundidade* em função do *ângulo de leme* conforme a linearização apresentada anteriormente. O bloco "caturro x leme" contém a função de transferência que relaciona o *ângulo de caturro* em função do *ângulo de leme* e possui acoplado um monitor que permite observar o comportamento da variável *ângulo de caturro* ao longo da trajetória. Observa-se que neste controlador "fuzzy" de duas entradas em nenhum momento a variável *ângulo de caturro* é usada para acionar o controlador.

#### 4.2.2 Controlador Fuzzy tipo 2

Utilizando ainda o modelo linearizado, buscou-se uma melhoria no desempenho do controlador, não só no aspecto do "tracking" da profundidade

desejada, como também uma variação do ângulo de caturro mais suave, que melhore a atuação do sistema de combate e seja mais agradável para a tripulação.

Desta forma, foi introduzida uma terceira entrada no controlador **FUZZY TIPO 1** que passou agora a ter 3 entradas: (**FUZZY TIPO 2**) que são: *erro de profundidade*, *a taxa de variação do erro de profundidade* e adicionalmente o comportamento do *ângulo de caturro*. A inclusão do *ângulo de caturro* faz com que o número de regras (que no primeiro controlador poderia ser de até 9 regras) seja a princípio aumentado para 15 ou mais (na verdade, o número de regras adotado é 25 já que, com as 15 regras iniciais, não se obteve um bom desempenho no controlador). A variável *caturro* pode assumir três valores, POSITIVO, NEGATIVO E ZERO. Na figura 4.7 está representada esta nova variável chamada de caturro. Os valores no eixo horizontal estão em graus.

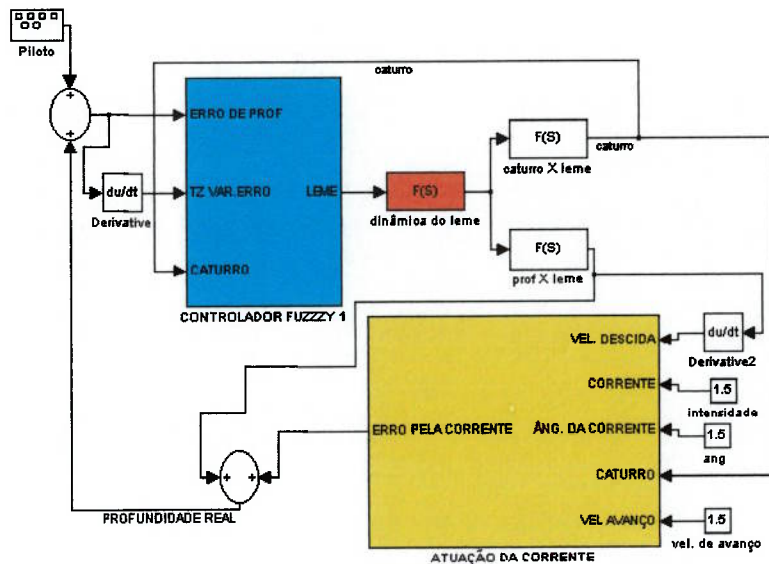


**Figura 4.7 Variável CATURRO- Controlador Fuzzy tipo 2**

A seguir, na figura 4.8, pode-se ver a atuação do controlador FUZZY TIPO 2.2 (erro de profundidade, taxa de variação da profundidade e ângulo de caturro) em

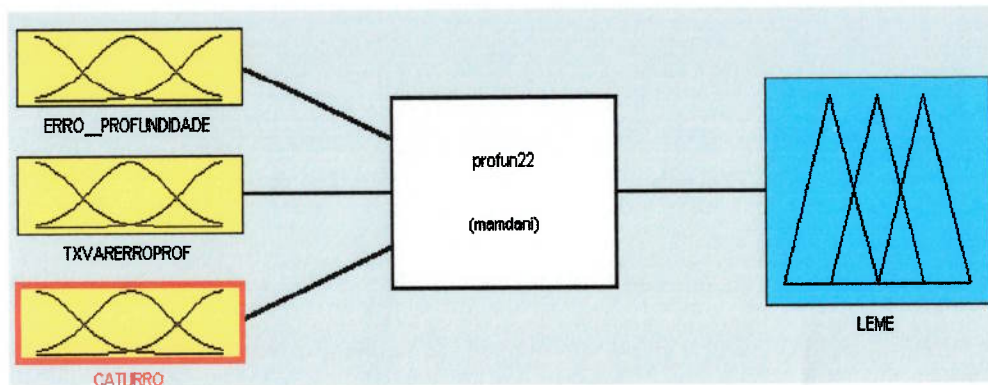


uma manobra de mudança de profundidade utilizando-se o modelo linear (M2). Em amarelo está representada a atuação da corrente.



**Figura 4.8 Controlador FUZZY TIPO 2 atuando no modelo M2**

O controlador "fuzzy" com 3 entradas possui a configuração de variáveis apresentada na figura 4.9. No caso trata-se de um controlador tipo 2; na parte, à esquerda, podem-se ver as variáveis de entrada e na parte da direita a variável de saída (leme). No centro da figura pode-se observar o controlador propriamente que corresponde, no caso, ao controlador denominado de "profun 22" (dentro deste bloco estão definidos os métodos de implicação, agregação de regras e decodificação). Este bloco "profun 22" contém, além dos parâmetros do controlador, as regras e as funções de pertinência.



**Figura 4.9** Janela do TOOLBOX para o controlador FUZZY TIPO 2

As novas regras, com a adição da variável ângulo de caturro, ficam na forma apresentada na tabela 4.3. É possível tentar reduzir o seu número, porém, o efeito de uma eventual redução poderia ser uma lacuna no universo de situações possíveis em que o submarino poderia estar. Na tabela 4.3, as três primeiras colunas representam as variáveis de entrada. A coluna 2 está a *taxa de variação do erro de profundidade*. Na última coluna têm-se a variável de saída *ângulo de leme*.

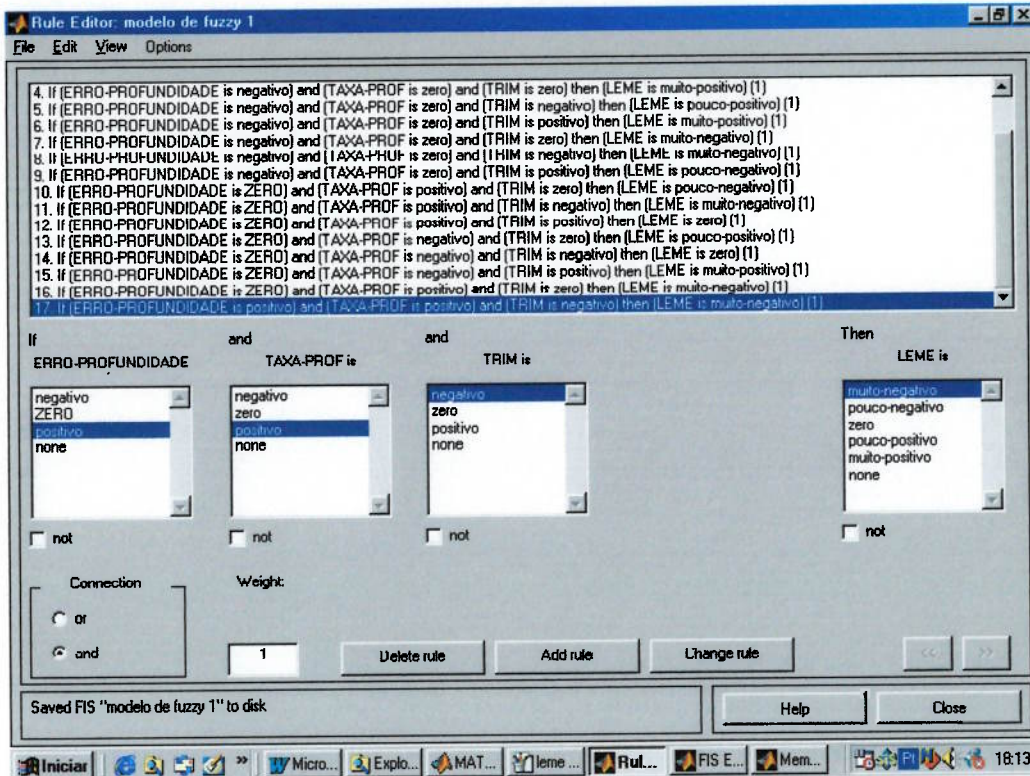
Como já descrito anteriormente, a variável *erro de profundidade* pode pertencer a três diferentes conjuntos "fuzzy": positivo, negativo e zero. A variável *taxa de variação do erro de profundidade* pode pertencer a três diferentes conjuntos "fuzzy": positivo, negativo e zero. A variável *ângulo de caturro*, por outro lado, pode pertencer a três diferentes conjuntos "fuzzy": positivo negativo e zero. A variável *ângulo de leme* pode pertencer a 5 diferentes conjuntos "fuzzy": muito positivo, pouco positivo, zero, pouco negativo e muito negativo.

Tabela 4.3 . Regras fuzzy para o controladores TIPO 2

<b>Erro de profundidade</b>	<b>Taxa de variação do erro de profundidade</b>	<b>Ângulo de caturro</b>	<b>Leme</b>
Positivo	Negativa	Zero	Zero
Positivo	Negativa	Negativo	Pouco negativo
Positivo	Negativa	Positivo	Pouco positivo
Negativo	Zero	Zero	Muito positivo
Negativo	Zero	Negativo	Pouco positivo
Negativo	Zero	Positivo	Muito positivo
Positivo	Zero	Zero	Muito Negativo
Positivo	Zero	Negativo	Muito Negativo
Positivo	Zero	Positivo	Pouco Negativo
Zero	Positiva	Zero	Pouco Negativo
Zero	Positiva	Negativo	Muito Negativo
Zero	Positiva	Positivo	Zero
Zero	Negativa	Zero	Pouco Positivo
Zero	Negativa	Negativo	Zero
Zero	Negativa	Positivo	Muito Positivo

<b>Erro de profundidade</b>	<b>Taxa de variação do erro de profundidade</b>	<b>Ângulo de caturro</b>	<b>Leme</b>
Positivo	Positiva	Zero	Muito Negativo
Positivo	Positiva	Negativo	Muito Negativo
Positivo	Positiva	Positivo	Pouco Negativo
Negativo	Positiva	Zero	Zero
Negativo	Positiva	Negativo	Pouco Negativo
Negativo	Positiva	Positivo	Pouco Positivo
Negativo	Negativa	Zero	Muito Positivo
Negativo	Negativa	Negativo	Pouco Positivo
Negativo	Negativa	Positivo	Muito Positivo

Na figura 4.10, pode-se visualizar melhor a atuação das regras com a utilização do RULER VIEW do TOOLBOX. Neste caso, houve a necessidade de se especificar 25 regras (embora na janela apareçam apenas 17) para que todas as situações possíveis fossem contempladas, não havendo nenhuma redundância nas regras necessárias para o controle.



**Figura 4.10** Janela do TOOLBOX referente a edição das regras para o controlador FUZZY TIPO 2

### 4.3 Controlador Fuzzy para o Modelo não Linear

Os controladores "fuzzy" tipo 1 e 2 são aplicados ao modelo não linear, verificando-se as adequações necessárias para que se obtenha um controlador eficaz.

Na verdade, para o controle da planta não linear teve-se que fazer pequenas alterações nos limites dos conjuntos "fuzzy" que representam o ângulo de leme. Trata-se de uma pequena adaptação dos controladores anteriores, de forma a atender as peculiaridades específicas observadas no modelo não linear. Utilizou-se o modelo M4 (não linear com efeito de corrente) conforme apresentado na figura 4.11. Nesta figura têm-se no canto superior esquerdo (azul) um controlador FUZZY TIPO 2.2 atuando em um modelo M4 (fundo branco).

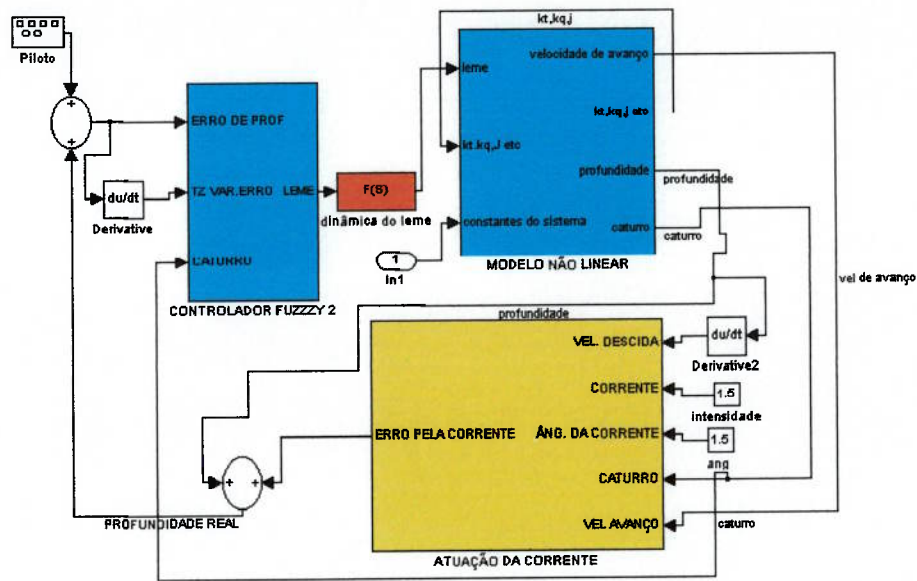


Figura 4.11 Atuação do Controlador FUZZY TIPO 2 no modelo M4

#### 4.4 Projeto dos Controladores

O dimensionamento do controlador é realizado através da execução de manobras que simulam o comportamento do submarino. Isto permite uma "familiarização" com o comportamento do submarino quando em atividades próximas da sua realidade operativa. Nesta primeira familiarização com o controlador são utilizadas as manobras típicas de "provas de mar" dos submarinos.

As "provas de mar" são manobras reais realizadas pelos submarinos quando em fase de aceitação, logo após a construção ou reparo. Os resultados das provas de mar são utilizados na simulação dos valores de ângulo de leme utilizados nos testes e empregados também para a definição da amplitude da variável "Fuzzy" LEME. As provas de mar são de dois tipos : A primeira manobra chama-se **recuperação**, em que o submarino, partindo de uma determinada cota, efetua uma descida até uma certa profundidade, retornando em seguida à profundidade inicial. A deflexão do leme é ajustada inicialmente para  $-\theta$  graus e será verificado se o submarino acompanha as curvas previstas; depois o leme será alterado gradualmente para  $+\theta$  graus de forma a restabelecer a cota inicial. A segunda manobra consiste em uma

simples operação de **descida**. A deflexão do leme é ajustada inicialmente e após um certo intervalo de tempo os lemes são conduzidos a deflexão nula, resultando uma estabilização da profundidade (Gueler, 1987).

Estas manobras, que são realizadas com o submarino ainda sem controle, permitem a especificação dos valores de variáveis tais como o ângulo de leme. Elas são realizadas com a aplicação manual do ângulo de leme prescrito nos gráficos que compõem os resultados das provas de mar.

Deve-se, inicialmente, introduzir os valores de ângulo de leme de acordo com as curvas das manobras obtidas nas provas de mar real. Não é possível obter as provas de mar do submarino usado como modelo neste trabalho, já que o Modelo Livre ainda é um protótipo. Assim, serão extraídos os valores de ângulo de leme obtidos do trabalho de Gueler (1987), porém deve-se observar que as dimensões e características do submarino utilizado por Gueler diferem do submarino que serve de modelo para este trabalho. A utilização de uma série de curvas que não correspondem ao submarino a ser controlado se justifica pois do ponto de vista qualitativa o comportamento de um veículo submerso em diversos casos independe das suas dimensões. Por exemplo, é de se esperar que quando é acionado o leme para baixo, qualquer submarino desça a uma cota mais baixa; o que pode diferenciar é a velocidade de descida; Quantitativamente as respostas podem ser diferentes assim, a partir das manobras descritas por Gueler, e através de simulações sucessivas, são estabelecidas as amplitudes dos conjuntos "fuzzy" e verificadas as consistências das regras que definem a variável leme.

Inicialmente foi planejada uma trajetória de referência do tipo senoidal com amplitude de 300m e frequência de 0,001 segundos. Nesta manobra pode-se observar um desempenho razoável do submarino com um controle rudimentar onde as regras são extremamente simples e utiliza-se, como entrada no controlador, apenas o erro de profundidade e taxa de variação de erro de profundidade. Porém, o comportamento do ângulo de caturro não foi satisfatório. Percebe-se que esta variável atinge picos superiores a cinco graus, o que ocasionaria uma sensação de desconforto a tripulação. No capítulo seguinte os resultados serão melhor analisados na medida que serão estabelecidos critérios objetivos de análise de

cada controlador.

Como trajetória padrão, para a manobra de **descida**, foi utilizada inicialmente uma variação da cota zero até a cota de 200 m em 240 segundos, que pode ser simulada com uma onda senoidal no gerador de sinais, de amplitude de 170 m e frequência de 0,005 Hz. A partir desta trajetória de referência observa-se o comportamento do controlador e a variação do ângulo de caturro. E, para a manobra de **recuperação**, optou-se por uma mudança de cota de 100 m em 120 segundos e depois uma retomada de mais 120 segundos. Este tipo de trajetória é mais condizente com a realidade. A trajetória senoidal completa, apesar de ter uma utilidade na experimentação, não corresponde a uma trajetória executada por um submarino.

A simulação das manobras de descida e de recuperação, com o veículo ainda sem controle foi de grande importância para a definição da amplitude do ângulo de leme, para a definição dos conjuntos "fuzzy", e também para uma análise inicial das regras. No último caso percebeu-se que no Controlador de três entradas deveriam ser utilizadas um número de regras maior do que o projetado inicialmente. Foram assim adicionadas mais 9 regras às 15 regras anteriormente existentes.



## **CAPÍTULO 5 - AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE**

No capítulo 2 foram vistas as características gerais de controle "fuzzy", no capítulo 3 foi apresentada a dinâmica do submarino e foram descritos os modelos matemáticos. No capítulo 4 foi examinado o projeto dos diversos controladores e como eles atuam nos diversos modelos. Agora, neste capítulo, os diversos controladores serão aplicados ao submarino, de acordo com as missões já especificadas no capítulo 1. Serão detalhados os testes de avaliação dos controladores e os critérios utilizados para a análise comparativa.

### **5.1- Testes de validação**

Para a validação do controlador é necessária a realização de testes. Estes testes são feitos a partir de manobras específicas denominadas manobras de teste.

Para a familiarização com os modelos e comparação entre o desempenho dos modelos linear e não linear foram utilizados, conforme descrito no capítulo 3, manobras diversas que não necessariamente representam manobras reais do submarino (como a manobra que simula um movimento senoidal). Estas manobras facilitam a comparação entre os modelos e permitem uma primeira familiarização com a dinâmica do submarino.

Para o projeto e dimensionamento do controlador é utilizado o mesmo artifício, porém com outras manobras. Em uma primeira familiarização com o controlador são utilizadas as manobras típicas de "provas de mar" dos submarinos, conforme definidas no capítulo 4.

Para validação do controlador é analisada a sua capacidade de conduzir o submarino de forma adequada em uma trajetória específica. As manobras de teste, neste caso, devem ser compatíveis com as normas e procedimentos utilizados pela Marinha do Brasil nas provas de mar dos submarinos. Dentre as manobras de "provas de mar" é utilizada para a validação do controlador a manobra de descida, não se usando a manobra de recuperação (Gueler, 1987). Esta manobra de descida é chamada aqui de manobra de mudança de profundidade.

Para esta manobra, de forma análoga a Gueler (1987) e Canhetti (1998), admite-se como condição inicial um movimento puro de avanço com velocidade constante de 10 nós (5,144 m/s), com a ausência de perturbações externas, como ondas e correntes. Posteriormente, já com a inclusão das perturbações, são simuladas outras manobras.

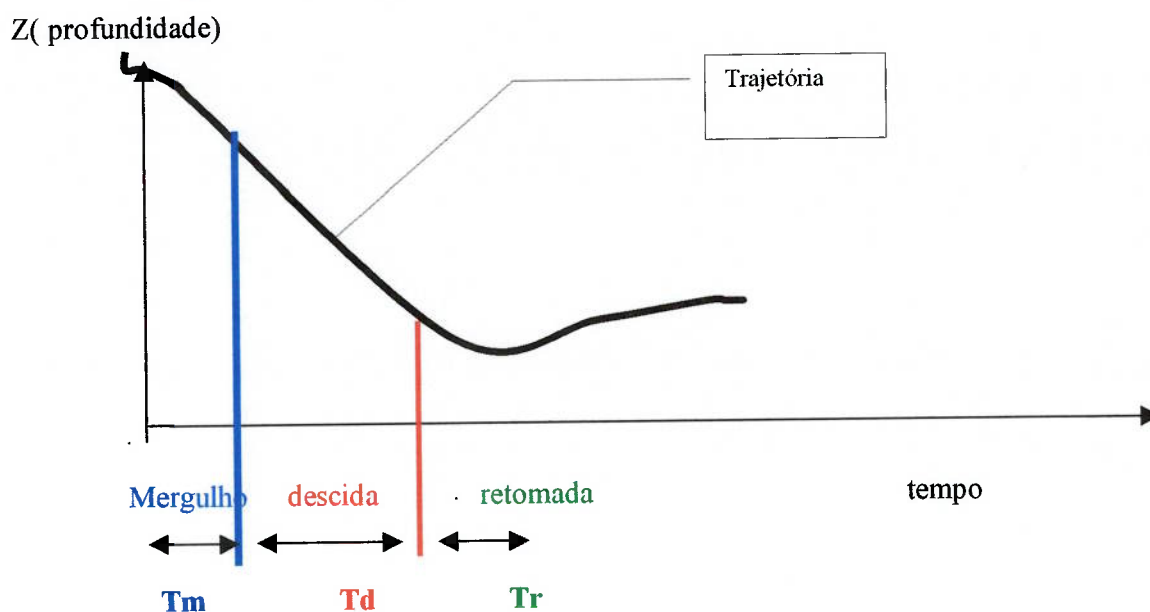
Os resultados das primeiras simulações (sem perturbação) são comparados com os resultados das provas de mar de um submarino real (Gueler, 1987).

Outra manobra, utilizada para a validação do controlador, é a manobra de **manutenção de profundidade**. Esta manobra destina-se a possibilitar que um submarino convencional consiga aspirar ar da superfície. Isto é muito importante pois o submarino necessita de ar para o funcionamento dos motores Diesel que recarregam as baterias. As baterias mantêm todo o sistema do submarino quando o mesmo está submerso. Esta profundidade que o submarino precisa manter para a admissão de ar, chama-se COTA PERISCÓPICA.

A manobra de mudança de profundidade é a manobra típica do submarino seja em ações de combate, seja em navegação. Existem critérios bem determinados para esta manobra. Estes critérios variam de acordo com o submarino e com as necessidades operativas do momento. Basicamente, deseja-se que esta manobra seja executada da forma mais precisa possível e ao mesmo tempo deve ser rápida e suave evitando "movimentos bruscos" que inibem o sistema de combate e provocam desconforto à tripulação. Além de seguir a trajetória desejada é recomendável que a atuação do leme não seja abrupta e descontínua e o comportamento do ângulo de caturro seja o mais suave possível. Finalizando, deve-se atentar para o fato de que existem limitações físicas para a atuação sobre a dinâmica do veículo. Elementos como o leme, possuem uma demora de resposta (atraso de resposta), além de uma limitação de velocidade de resposta (limitação na taxa de variação da deflexão). Gueler (1987) desenvolve estes diversos tipos de manobras e apresenta critérios sólidos de análise de um controlador para submarinos.

## 5.2 Mudança de profundidade

Passa-se agora a identificar cada fase da trajetória na mudança de profundidade. Esta trajetória pode ser dividida em três fases: Mergulho, Descida e Retomada, mostradas na figura 5.1 que representa a profundidade em função da distância percorrida.



**Figura 5.1** Manobra de mudança de profundidade

Sejam  $\delta_m$  e  $\delta_d$ , ângulos de lemes respectivamente nas fases de mergulho e descida. Na fase de mergulho varia-se a deflexão dos lemes, de zero até um valor  $\delta_m$ , a uma taxa de deflexão constante. Assim, o submarino inclina a proa e começa a descer. No instante  $T_m$  é atingido um certo ângulo de caturro  $\theta_m$ ; neste instante o submarino possui uma inércia tal que, levando o leme para uma posição de equilíbrio  $\delta_d$ , o submarino se inclinará até o ângulo máximo de caturro aceitável  $\theta_{max}$ . Portanto, no instante  $T_m$ , os lemes são movimentados de  $\delta_m$  para  $\delta_d$ .

O valor  $\delta_d$  é função do ângulo máximo de *caturro* aceitável e é definido como sendo a deflexão que mantém o *caturro* constante, contrabalançando o momento restaurador que aparece devido ao desalinhamento entre o centro de gravidade e o do carena do submarino. O ângulo  $\delta_d$  é mantido durante um período  $T_d$ , que depende da profundidade desejada.

A terceira fase é a retomada ou nivelamento. Nesta manobra a deflexão dos lemes é levada a zero, com uma taxa de deflexão constante, e o submarino nivela pela ação do momento restaurador de caturro.

Portanto, a realização da manobra de mudança de profundidade, para uma diferença de cota especificada, depende da determinação dos valores de  $\delta m$ ,  $Tm$ ,  $\delta d$ ,  $Td$ ,  $Tr$ . Estes valores são definidos durante a fase de projeto através de simulações de manobras.

A escolha destes valores depende das restrições nas variáveis do movimento e no controle. No caso específico de  $\theta m$  (máximo ângulo de caturro durante a manobra simulada), deve-se arbitrar uma margem de segurança, para considerar os efeitos ambientais presentes na manobra do submarino real.

### 5.2.1 Escolha dos parâmetros de análise

Torna-se importante estabelecer parâmetros e critérios que permitam uma análise segura dos resultados dos testes. Gueler (1987) apresenta alguns parâmetros utilizados para a avaliação dos resultados e posteriormente define critérios que utilizam estes parâmetros. Estes parâmetros fornecem características importantes e permitem uma descrição analítica das curvas obtidas. Dentre os parâmetros utilizados por Gueler podem-se destacar:

- i ) período de mergulho
- ii) período de descida
- iii) período de retomada
- iv) para a profundidade
  - profundidade final
  - sobre-elevação (overshoot) da profundidade máxima, em relação à profundidade final, dada por:
 
$$OV = \frac{[PROF.MÁXIMA - PROF.FINAL]}{[PROF.FINAL]} * 100$$
  - desvio entre a profundidade real e de referência durante a fase de regime
- v) para o ângulo de caturro
  - ângulo de caturro máximo durante manobra
  - sobre-elevação do ângulo de caturro durante a fase de mergulho

- desvio entre o ângulo real e de referência durante a fase de descida

No que se refere à magnitude de controle aplicado utiliza-se:

- i. evolução do controle ( Grau de exigência )
- ii. área sobre a curva de ângulo de leme
- iii. valor máximo do controle total aplicado

O primeiro critério é baseado na observação dinâmica do leme ( e suas características como oscilação do leme) para executar uma dada trajetória padrão, assim através da comparação empírica do nível de exigência do leme nestas trajetórias poder-se-á afirmar que o leme está sendo executando um esforço maior para controlar o submarino. Nem todos os parâmetros definidos acima precisam ser utilizados para a análise do atendimento dos critérios de controle estabelecidos. Pode-se perceber que tais parâmetros servem como definidores das características das curvas e também como identificadores da qualidade do controle. Alguns destes parâmetros são utilizados como critérios para a análise dos controladores no presente trabalho.

A partir dos critérios estabelecidos por Gueler (1987) e com auxílio das trajetórias de referência, iniciaram-se as simulações e testes do controle. Observou-se, de início, que as trajetórias eram compatíveis com as características do submarino e não necessitavam de grandes reformulações.

Uma tarefa importante foi determinar , dentre os diversos critérios de Gueler , quais os mais adequados para os testes. A utilização de todos os critérios tende a criar um volume de informações muito grande mas, provavelmente, de discutível validade para uma análise objetiva. Na escolha optou-se pelos que apresentam maior facilidade computacional, clareza e que possam representar de forma significativa as características das curvas obtidas nas simulações. Os critérios escolhidos foram:

Para erro de profundidade: amplitude máxima do erro C1, amplitude máxima percentual (Máximo erro/profundidade final) C2, erro em regime C3;

Para o caturro: maior ângulo de caturro C4, intervalo médio de variação de caturro C5 ( período médio da curva =  $1/f$  );

Para o leme: maior ângulo C6, intervalo médio de atuação do leme C7 ( período médio da curva se for oscilante ) e, ainda, um critério que reflita a evolução

do controle para a correção dos desvios, que foi definido como grau de exigência, GE.

### **5.2.2 Requisitos Mínimos**

Devem ser estabelecidos também requisitos mínimos para as manobras. Estes requisitos mínimos servem para balizar a atuação dos controladores. Cada um deles deve ser obedecido, de forma independente, pelos controladores, ou seja, basta que um dos requisitos não seja respeitado para que a manobra seja considerada inaceitável. Gueler (1987) estipula requisitos mínimos para uma série de variáveis que descrevam o comportamento do veículo na manobra. Alguns deles foram utilizados contudo seus valores foram ajustados para o veículo utilizado neste trabalho .

Para a manobra de mudança de profundidade com variação de cota de 200m , os requisitos mínimos estabelecidos são os seguintes :

- máximo ângulo de caturro aceitável (6 graus);
- sobre-elevação de caturro (30%);
- sobre-elevação de profundidade (15%);
- deflexão dos lemes na fase de mergulho (20 graus);
- deflexão dos lemes na fase de descida (20 graus);
- período de mergulho (100s);
- período de descida (100s);
- período de retomada (100s).

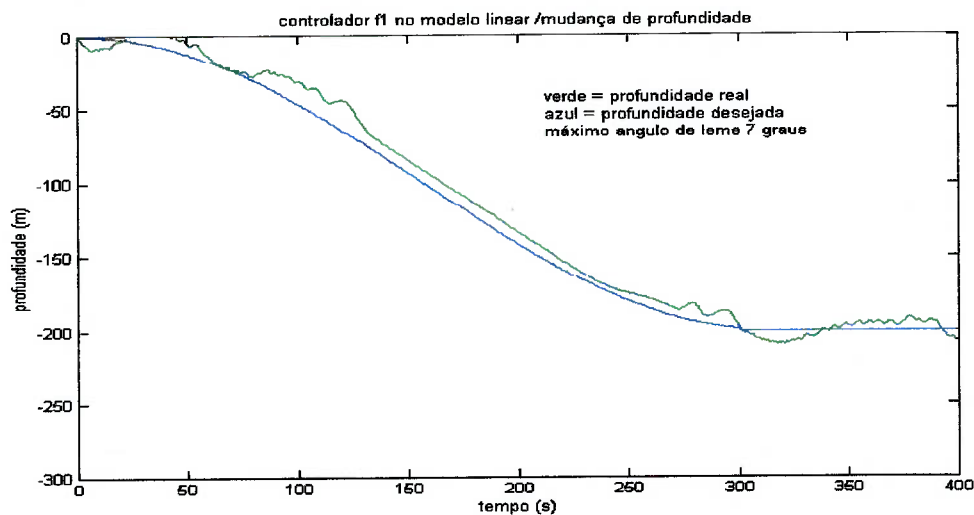
### **5.2.3 Resultados dos testes**

Foram realizados testes de avaliação com os diferentes controladores "Fuzzy" propostos, bem como com o controlador PID. Foram utilizados para estes testes os modelos previamente definidos. A seguir são mostradas as curvas, que permitem visualizar o comportamento do veículo na manobra e, em consequência, avaliar o desempenho dos controladores. São apresentadas as figuras, referentes à aplicação dos controladores "fuzzy" ao modelo linear e, depois, ao modelo não linear.

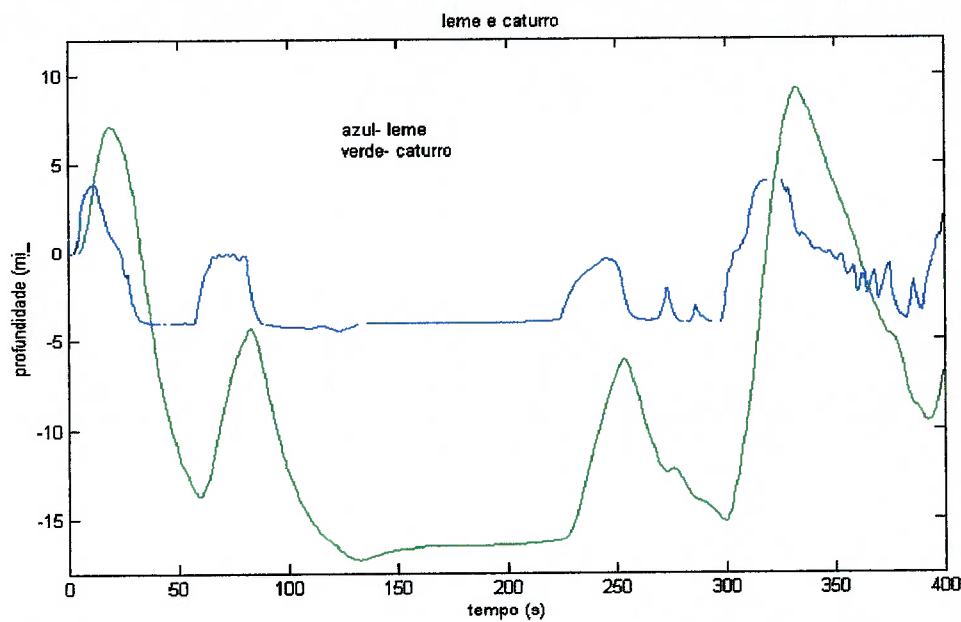
Na figura 5.2 pode-se observar a variação da profundidade do submarino em função do tempo quando um controlador fuzzy de duas entradas atua no modelo linear. Na figura 5.3 observa-se as variações dos ângulos de leme e caturro ao longo da trajetória. Nota-se que o controlador atua de forma significativa ao longo dos primeiros 100 segundos buscando acompanhar a trajetória desejada. Existe quase uma simetria na curva, onde o eixo de simetria está na linha vertical de 160s que corresponde o meio da trajetória.

No intervalo entre 130 e 260 s, a atuação do leme é mais suave e o erro de profundidade atinge um valor quase constante e relativamente pequeno da ordem de 5 m.

O ângulo de caturro possui uma dinâmica similar à evolução do ângulo de leme. O valor máximo do ângulo de leme é da ordem de 16 graus e o valor máximo do ângulo de caturro é de aproximadamente 4 graus. Nesta curva pode-se afirmar que há um pequeno grau de exigência do leme já que a curva que corresponde a atuação do leme é relativamente suave com poucas alternâncias ou oscilações (na figura 5.5, por exemplo, têm-se um grau de exigência bem maior, observa-se que o leme oscila rapidamente). Na parte final da trajetória representada na figura 5.2 ( $t \geq 350$ s) o erro de regime é próximo de zero.



**Figura 5.2 Controlador f1 no modelo linear ( profundidade)**

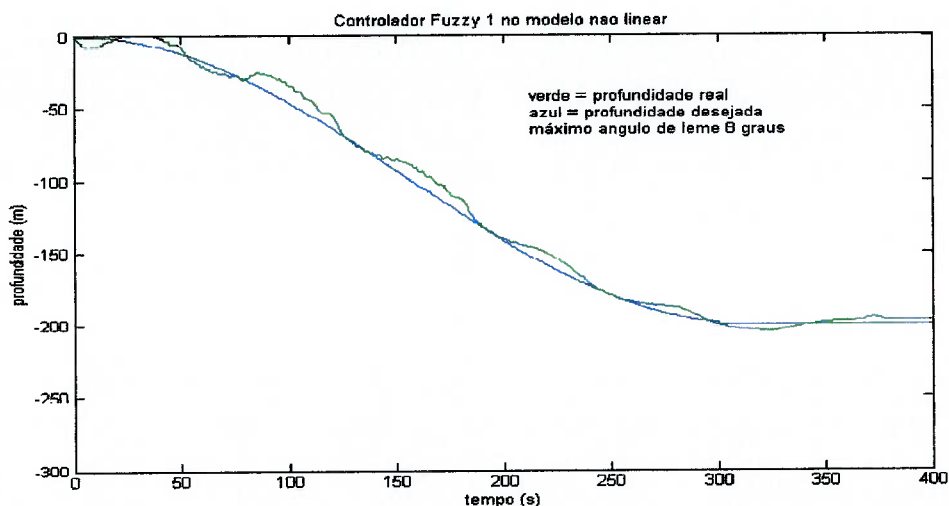


**Figura 5.3 Controlador f 1 no modelo linear ( caturro e leme)**

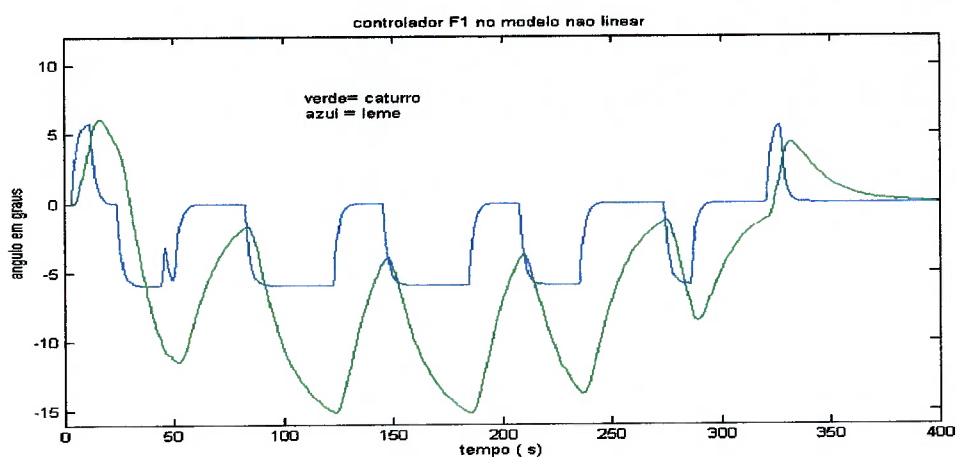
As figuras 5.4 e 5.5 mostram os resultados da aplicação do controlador fuzzy 1 no modelo não linear; neste caso utilizam-se os mesmos parâmetros do controlador empregados no modelo linear. Pode-se observar que a atuação do leme é mais intensa ocasionando uma trajetória (variação da profundidade) em torno da curva de referencia. Porém o erro máximo de profundidade é maior que no modelo linear (ocorre em  $t = 90s$ ). O erro em regime é maior que na aplicação do controlador ao modelo linear.

Comparando com a atuação do controlador no modelo linear observa-se que a curva referente ao ângulo leme apresenta maiores amplitudes e uma atuação mais intensa, o que implica em um ângulo de caturro mais instável (oscilante). Os valores máximos atingidos pelo ângulo de leme e pelo ângulo de caturro são de, respectivamente, 15 graus e 6 graus.





**Figura 5.4 controlador fuzzy 1 no modelo não linear ( profundidade)**



**Figura 5.5 controlador fuzzy 1 no modelo não linear (leme e caturro)**

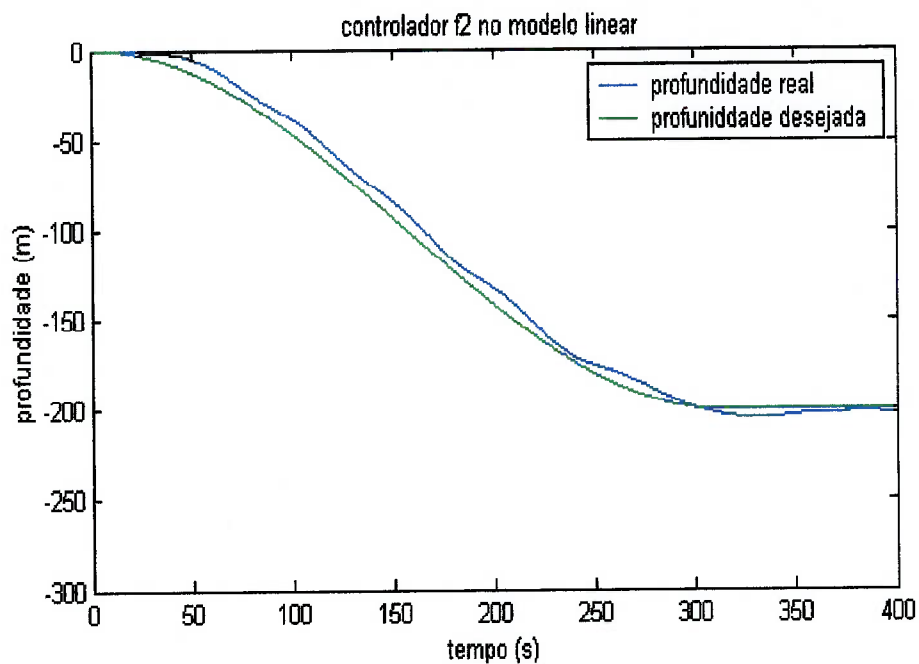
As figuras 5.6 e 5.7 mostram os resultados da aplicação do controlador fuzzy 2 ( 3 entradas ) ao modelo linear . Este controlador é similar ao controlador fuzzy 1, porém é acrescentada mais uma variável de entrada e são introduzidas novas regras. A variável de entrada acrescentada é o “caturro”, sendo assim a variação do caturro passa a ser um elemento importante na decisão de manobra do submarino. As novas regras buscaram evitar ângulos de caturro excessivos . O conforto da tripulação e a segurança dos equipamentos e sensores do submarino passam a ser fundamentais.

O objetivo passou a ser; cumprir a trajetória com ângulos de caturro suaves, em consequência deste novo objetivo pode-se observar que se evitou uma atuação

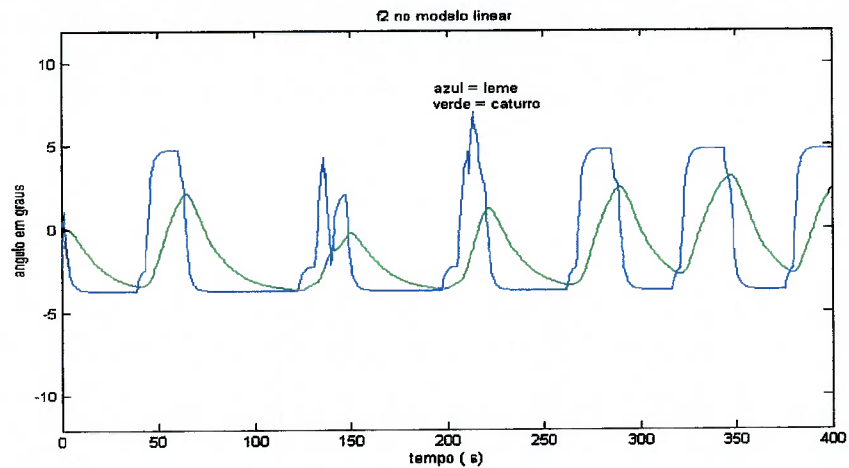
no leme com ângulos excessivos. O submarino passa a desenvolver uma trajetória mais suave e ao final apresenta uma trajetória muito próxima da trajetória desejada

O objetivo inicial de cumprir a trajetória com ângulos de caturro mais suaves é obtido ao custo de uma atuação mais freqüente do leme ( com uma maior oscilação), porém com amplitudes menores. Os picos de ângulo de leme são menores que no controlador fuzzy 1 para o mesmo modelo linear. Em contrapartida, os ângulos de caturro apresentam notável diminuição, o seu valor máximo é de 3 graus.

Com referência a trajetória a ser seguida, observa-se que o erro de regime é da ordem de 2 m ( $t = 350s$ ) e o erro máximo de aproximadamente 6 m.

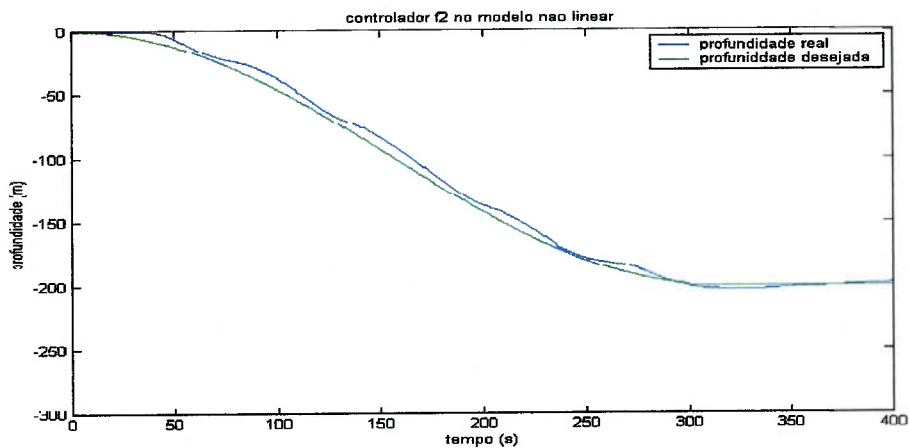


**Figura 5.6 Controlador fuzzy 2 no modelo linear (profundidade)**

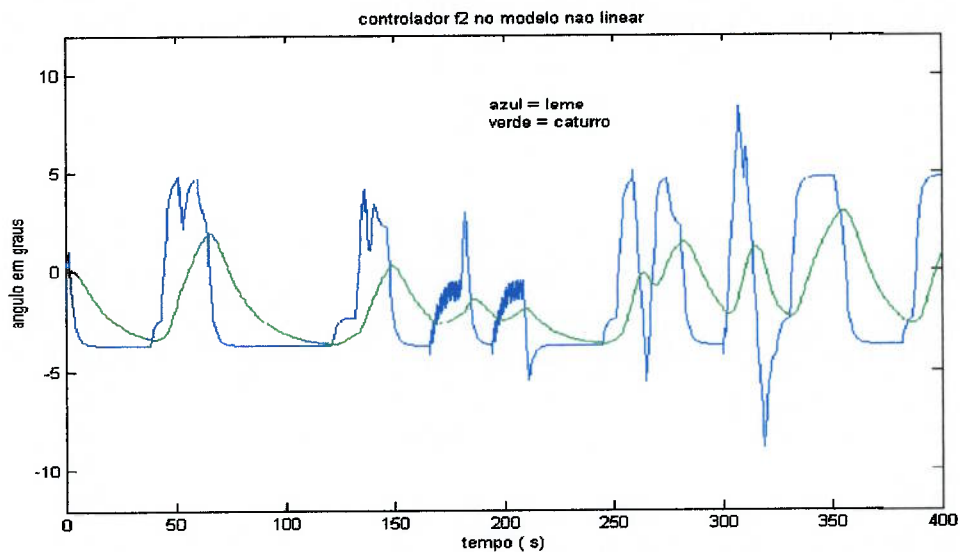


**Figura 5.7 Controlador fuzzy 2 no modelo linear (leme e caturro)**

As figuras 5.8 e 5.9 apresentam os resultados de aplicação do controlador tipo 2 ao modelo não linear. Deve-se observar que a atuação do leme é mais intensa que no modelo linear. Ocorrendo em alguns pontos (tempo entre 160 e 170 segundos e tempo entre 190 e 210 segundos) uma série de ordens desnecessárias ao leme em intervalos de tempo reduzidíssimos (pontos mais escuros da curva da figura 5.9). Um efeito positivo observado é a inexistência de oscilação do submarino ao longo da trajetória. O erro de profundidade é relativamente constante ao longo da trajetória e, ao final, ocorre uma diminuição expressiva do mesmo.



**Figura 5.8 Controlador fuzzy 2 aplicado ao modelo não linear (profundidade)**



**Figura 5.9 Controlador fuzzy 2 aplicado ao modelo não linear (leme e caturro)**

Na tabela 5.1 pode-se ver o resultado obtido pelos diversos controladores em manobra de mudança de profundidade. Na primeira coluna estão listados os diversos controladores com a simbologia apresentada abaixo. Por exemplo, na última linha desta coluna tem-se o símbolo P2 que significa "controlador PID quando aplicado ao modelo não linear". Na primeira linha se encontram os diversos parâmetros usados para a análise do controlador, de acordo com a simbologia definida anteriormente. Assim, pode-se extrair da quinta linha e quinta coluna que, na manobra de mudança de profundidade, o controlador fuzzy de duas entradas é aplicado no modelo não linear ( F2MNL ) e apresenta o valor máximo de ângulo de caturro de 15 graus ( C4). A simbologia referente aos controladores que foi explicitada no capítulo 4, é reproduzida abaixo :

F1ML controlador fuzzy 1 com duas entradas no modelo linear

F2ML controlador fuzzy 2 com três entradas no modelo linear

P1 controlador PID comum no modelo linear

F1MNL controlador fuzzy tipo 1 no modelo não linear

F2MNL controlador fuzzy tipo 2 no modelo não linear

P2 controlador PID comum no modelo não linear

**Tabela 5.1 Resultados da manobra de mudança de profundidade**

Tipo	C1 (m)	C2 (%)	C3 (m)	C4 (graus)	C5 (s)	C6 (graus)	C7	GE
F1ML	20	10	5	4.5	200	17	200	Baixo
F2ML	6	3	2	5.5	150	4	150	Média
P1	20	10	5	10	80	4	20	Alta
F1MNL	14	7	2	5.5	100	15	100	Medio
F2MNL	8	4	0	7	100	4	80	Alta
P2	16	8	16	10	40	4	30	Alta

A tabela 5.1 sintetiza o desempenho dos diversos controladores no teste de mudança de profundidade. Importante, é observar que nas colunas referentes aos itens C5 e C7 os valores são dados em segundos. Isto se deve ao fato de que tanto a atuação do leme como a evolução do caturro geralmente se comporta na manobra de forma sinuosa e por isto optou-se em apresentar o valor referente ao período médio das curvas e não um valor de frequência dado em Hertz (este período pode ser definido como a média de quatro ciclos das curvas, devendo ser o intervalo de tempo entre dois máximos)

Com relação ao ângulo de caturro máximo na manobra de mudança de profundidade, somente os controladores PIDs ultrapassaram o limite máximo de 6 graus (como pode-se observar na tabela 5.1), foram obtidos ângulos máximos de 10 graus. Na coluna referente ao ângulo de leme máximo (C6 da tabela 5.1), observa-se que os pontos críticos nos controladores "fuzzy" ocorreram com os controladores de duas entradas aplicados ao modelo linear e ao modelo não linear, sendo o valor máximo no modelo linear igual a 17 graus. Com relação ao requisito "deflexão máxima do ângulo de caturro" (C4) na mudança de profundidade, pode-se observar que todos os controladores apresentaram ângulos

menores que 6 graus , sendo o caso crítico no modelo não linear ( 5.5 graus). Todos os outros requisitos mínimos na manobra de mudança de profundidade foram respeitados

Pode-se observar que a inclusão do CATURRO como variável de entrada nos controladores, na manobra de mudança de profundidade, produz três efeitos: diminui o sobre sinal de profundidade, diminui a amplitude máxima de leme, porém provoca um leve aumento na frequência de atuação no leme ( diminui C5 ) e conseqüentemente um leve aumento na frequência do caturro ( diminui C7 ) e por final observou-se uma maior exigência do leme. O ângulo de caturro não apresentou grandes variações com o tipo de controle.

A atuação dos Controladores "Fuzzy", que foram empregados no modelo linear, quando aplicados no modelo não linear ocasionam, para a manobra de mudança de profundidade um valor menor de amplitude máxima do erro de profundidade, um menor valor no erro de profundidade em regime, ângulos de caturro ligeiramente menores, ângulos de leme ligeiramente maiores e um mesmo grau de exigência do leme. Pode-se melhorar um pouco mais o desempenho dos diversos controladores quando aplicados ao modelo não linear através de pequenos ajustes nos parâmetros do controlador.

Os controladores PID tiveram um desempenho muito próximo dos controladores "fuzzy", ficando difícil compará-los . Porém estes controladores PID apresentaram um grau de exigência no leme muito maior ( GE) do que os controladores "fuzzy" além de possuir amplitudes de ângulos de leme maiores ( C5 da tabela 5.1 linhas 3 e 6 ) . Outro problema encontrado com os controladores PID , já descrito anteriormente , está na dificuldade de utilizar os parâmetros do modelo linear no modelo não linear. Praticamente foram utilizados vários PIDs distintos que dependiam não só do modelo utilizado (modelo linear ou não linear) como também do tipo de manobra a ser executada.

### **5.3 Manutenção de profundidade**

A manobra de manutenção de profundidade é tão importante quanto a manobra de mudança de profundidade. O submarino precisa manter uma variação mínima da profundidade, evitando dois problemas:

- i ) que entre água pelo duto de aspiração de ar;
- ii ) que o submarino vá a superfície e fique visualmente vulnerável .

Trata-se de um controle de precisão, onde os ângulos de controle de leme devem ser reduzidos e eficientes, pois mais importante que o submarino manter-se próximo da profundidade desejada é que esta não sofra grandes oscilações. Esta missão torna-se difícil devido a presença de ondas próximas à superfície do mar. As ondas, como já mostrado no capítulo 3, são de natureza estocástica.

Para a manobra de manutenção de profundidade foi acoplado um bloco que introduz um sinal aleatório de amplitudes máxima e mínima ajustável ao sinal da profundidade , simulando a ação eventual das ondas ou outras influências externas. No anexo D tem-se uma representação completa ( com todos os blocos e funções que compõem o modelo ) extraída do software utilizado, onde pode ser vista a atuação do controlador "fuzzy" tipo 2 (duas entradas) no sistema linear com perturbação (efeito das ondas). Para esta representação é utilizado um gerador de ruído branco, onde pode-se pré-ajustar a média e a variância.

### 5.3.1 Escolha dos parâmetros de análise

Devem ser estabelecidos parâmetros que possibilitem a análise dos resultados. Novamente são apresentados diversos parâmetros que podem, não só ser utilizados para a descrição das curvas, mas também são utilizados em possíveis critérios para a análise dos resultados.

Gueler (1987) estabelece um conjunto de parâmetros para a manobra de manutenção de profundidade. Os parâmetros de Gueler são:

#### a) Para o erro em profundidade

- Amplitude máxima do movimento de primeira ordem ( $a_1$ )
- Amplitude máxima do movimento de Segunda ordem ( $a_2$ )
- Amplitude máxima percentual ( $a_1/H_0=a_3$ )
- Frequência angular do movimento de primeira ordem ( $\omega_1$ )
- O valor RMS

#### b) Para o ângulo de caturro

- Amplitude máxima do movimento de primeira ordem ( $\theta_1$ )

c) Para o leme

-Área curva que representa o ângulo do leme ao longo da manobra (S)

-Amplitude máxima do ângulo de leme (A4)

Os parâmetros utilizados por Gueler servem como referência para este trabalho. Assim optou-se por parâmetros um pouco diferentes dos utilizados por ele.

Foram adotados aqui os mesmos parâmetros utilizados na avaliação da manobra de mudança de cota, com exceção de C2 (máxima amplitude percentual do erro em profundidade)

Para erro de profundidade: amplitude máxima do erro C1, erro em regime C3

Para o caturro: Maior ângulo de caturro C4, período C5,

Para o leme: maior ângulo C6, período C7 e ainda um critério que reflita a evolução do controle para a correção dos desvios se chamou de grau de exigência GE

### 5.3.2 Requisitos mínimos

Devem ser estabelecidos requisitos mínimos de forma similar ao que já foi feito na manobra de mudança de profundidade. Foram definidos Como requisitos mínimos:

Máximo ângulo de leme 20 graus

Máximo ângulo de caturro 4 graus

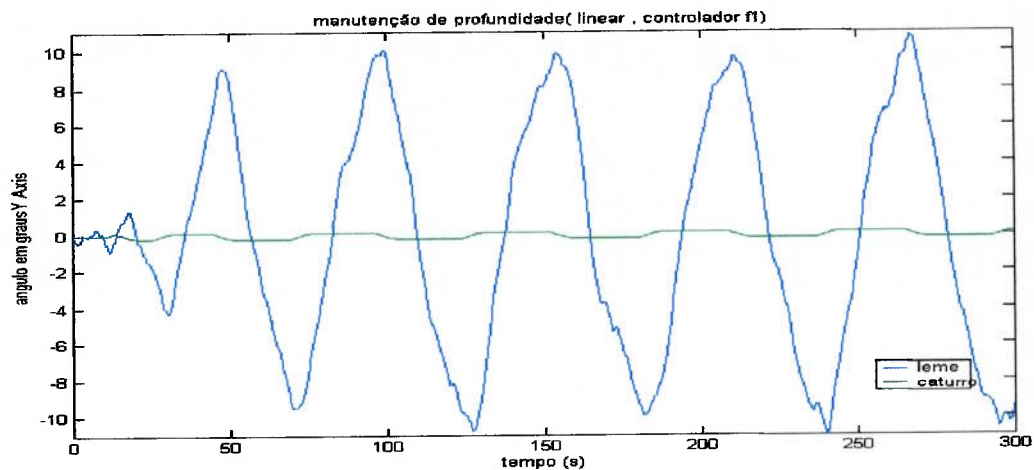
Variação máxima da profundidade +- 8 metros.

### 5.3.3 Resultados dos testes

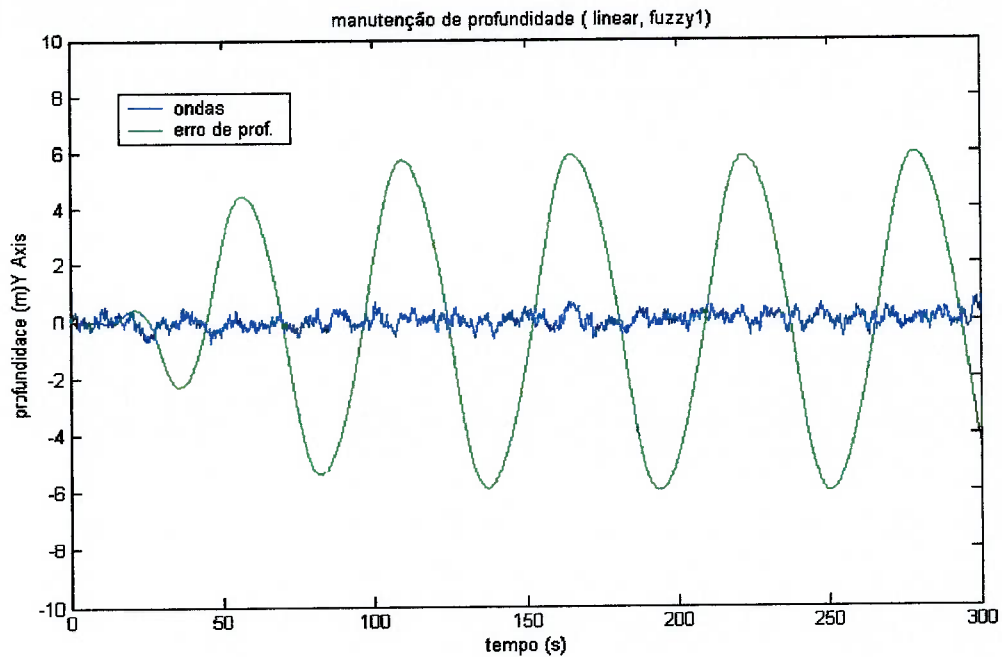
As figuras 5.10 e 5.11 ilustram o comportamento do submarino quando em uma manobra de manutenção de profundidade. No caso, trata-se da aplicação do controlador de 2 entradas no modelo linear. A perturbação é causada por ondas



com altura significativa de 2,5 metros, igual a utilizada por Gueler (1987) para condições de mar severas na costa do Brasil. Observa-se que o controlador provoca uma atuação oscilante do leme com ângulo de leme que chegam a 11 graus porm os ângulos de caturro são bem reduzidos não chegando a 1 grau. A variação da profundidade é oscilante com período de cerca de 100 segundos atingindo valor máximo de 6 metros.

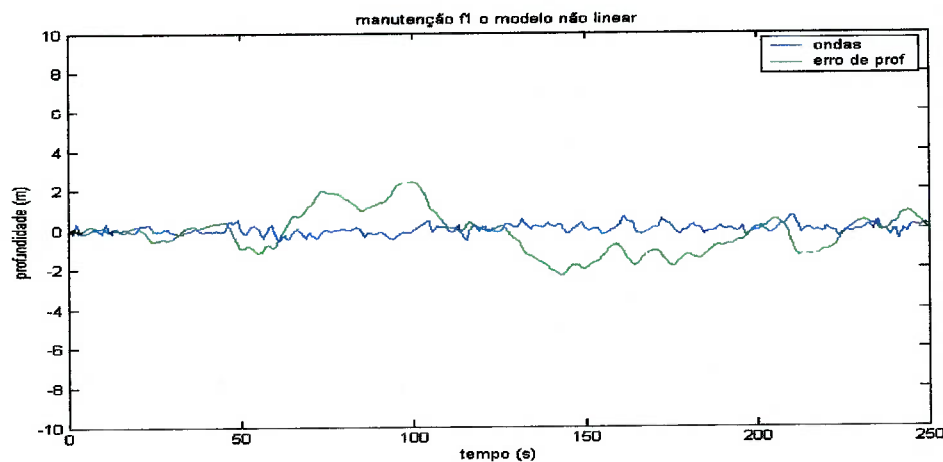


**Figura 5.10** Manobra de manutenção controlador f1 modelo linear



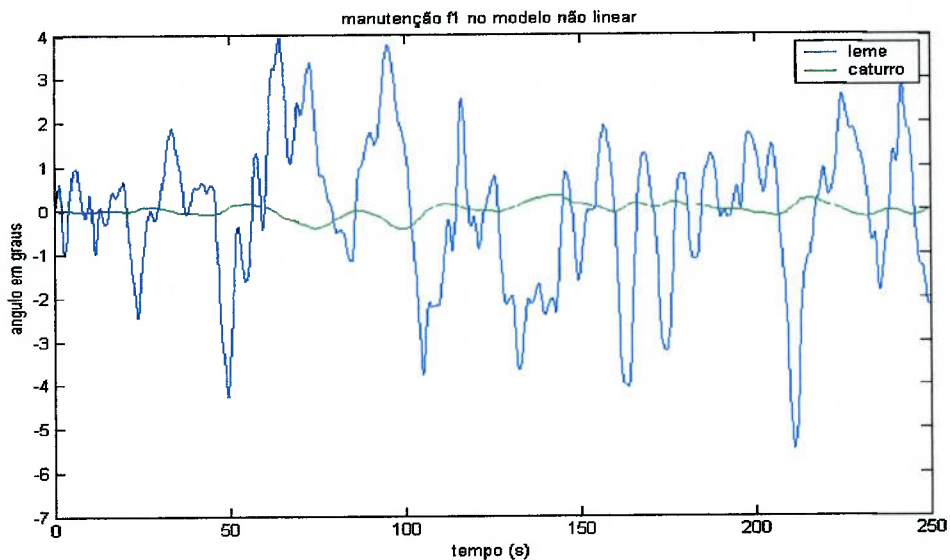
**Figura 5.11** Manobra de manutenção realizada pelo controlador f 1 no modelo linear (leme e caturro)

Nas figuras 5.12 e 5.13 o controlador fuzzy1 é aplicado ao modelo não linear .Ocorre uma melhora na atuação pois as variações de profundidade são de no máximo 2 metros .Os valores de ângulo de leme atinge Máximo de 6 graus.



**Figura 5.12** Controlador f 1 aplicado ao modelo não linear (profundidade)

Deve-se observar que a frequência de atuação do leme é variável no tempo e é bem superior a frequência de atuação do leme no modelo linear.



**Figura 5.13 Controlador f 1 aplicado ao modelo não linear (leme e caturro)**

Nas figuras 5.14 e 5.15 são apresentadas as curvas de variação da profundidade, ângulo de leme e de caturro do controlador fuzzy 2, quando sujeito as mesmas condições de perturbação a que foi submetido o submarino no caso do controlador fuzzy 1. Apesar de se observar em quase todo o teste uma variação máxima do erro de profundidade da ordem de 4 metros, no final do teste (por volta de  $t=210s$ ) observa-se um erro de quase 6 metros. Os valores máximos de ângulo de leme são menores que 3 graus. Os ângulos de caturro são extremamente pequenos. Com exceção de  $t=245s$  e  $t=230s$ . A atuação do controlador fuzzy 2 no modelo linear é mais intensa que no caso do controlador fuzzy 1 aplicado ao mesmo modelo. Os ângulos de leme são menores e os ângulos de caturro são bem próximos ao observados na figura 5.11

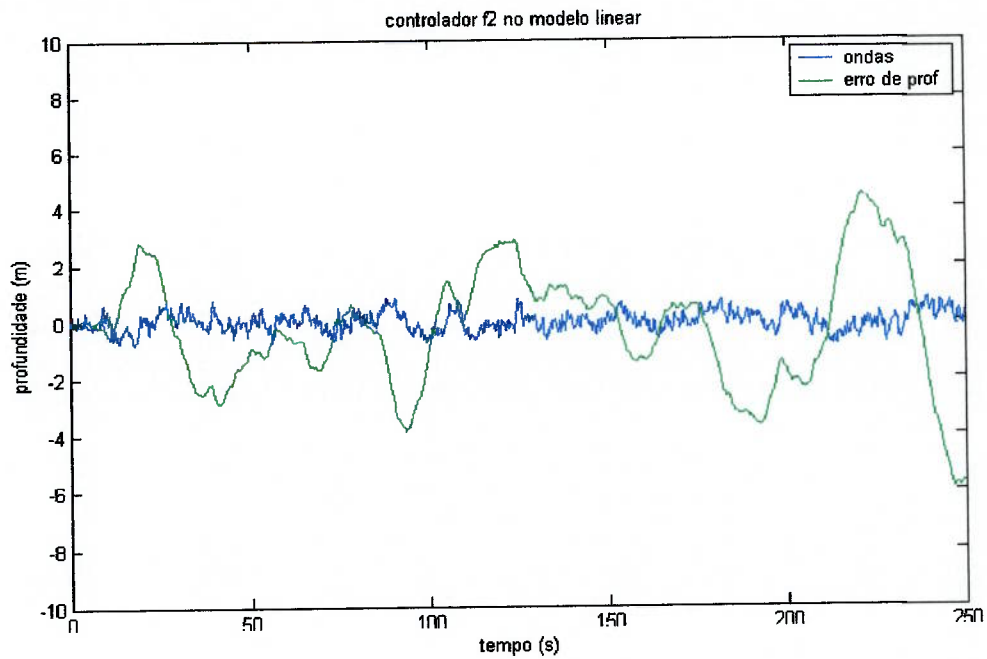


Figura 5.14 Controlador f2 aplicado ao modelo linear (profundidade)

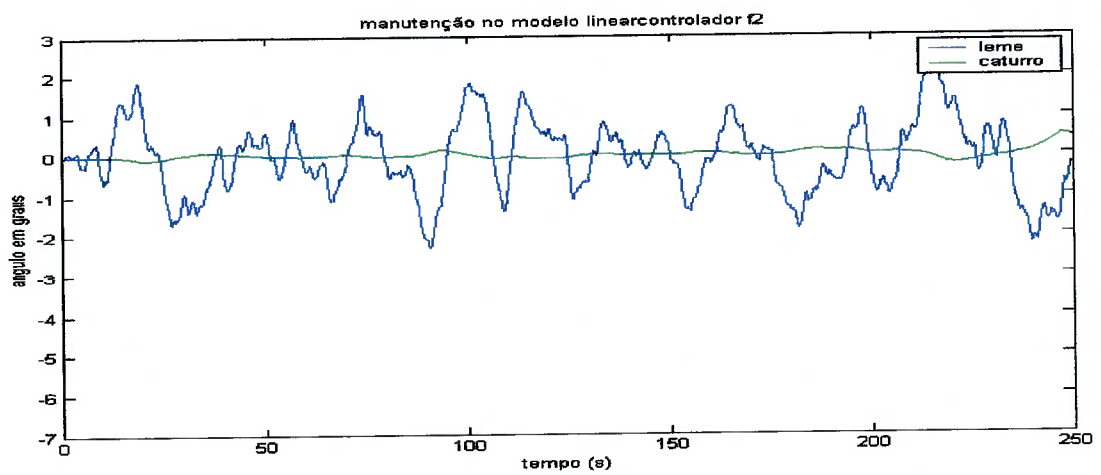
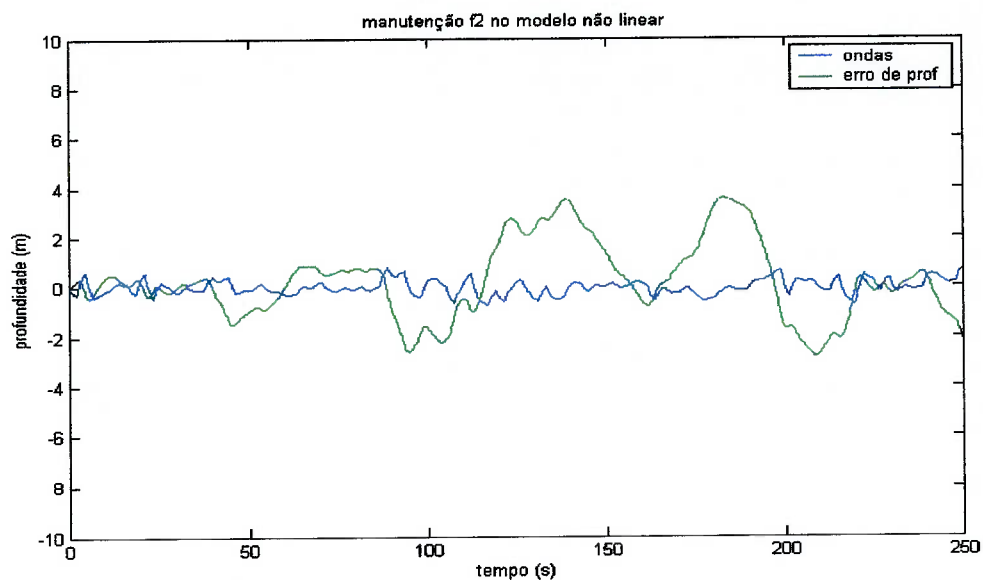
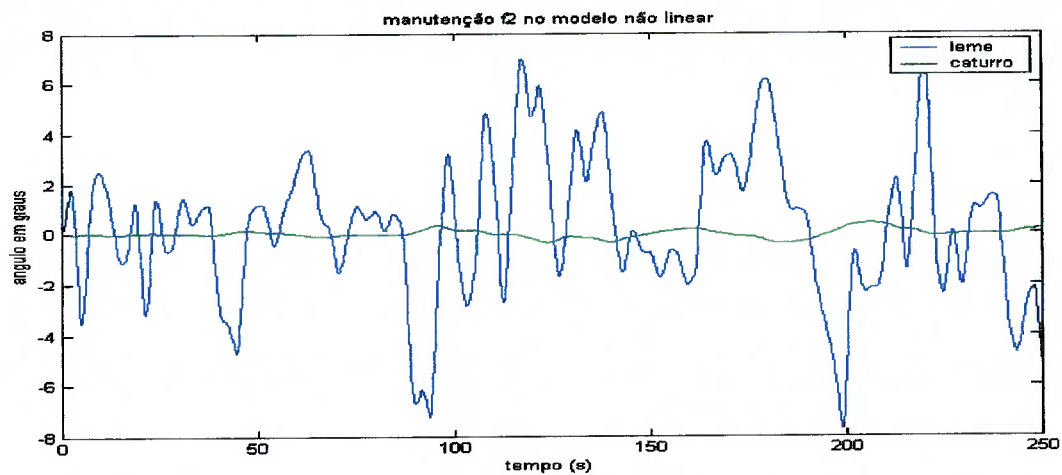


Figura 5.15 Controlador f2 aplicado ao modelo linear (leme e caturro)

Nas figuras 5.16 e 5.17 o controlador fuzzy 2 é aplicado ao modelo não linear. Os ângulos de caturro e leme são maiores que no modelo linear ( figura 5.13). a frequência de atuação do leme também é maior. Com relação a profundidade , observa-se picos (  $t=180s$  e  $t=140s$ ) de aproximadamente 4 metros . Estes resultados são piores que os apresentados pelo controlador fuzzy 1 aplicado ao mesmo modelo ( figura 5.15)

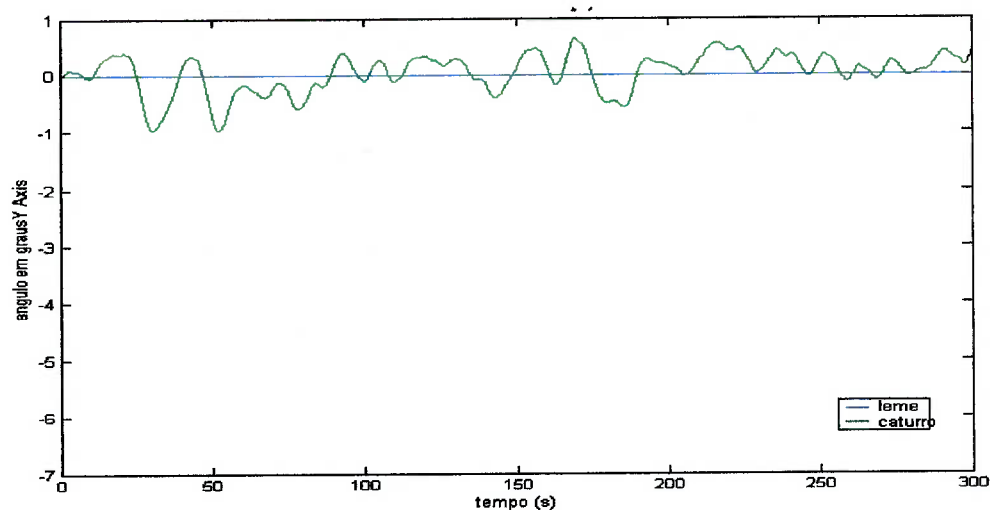


**Figura 5.16 Controlador f 2 aplicado ao modelo não linear (profundidade)**

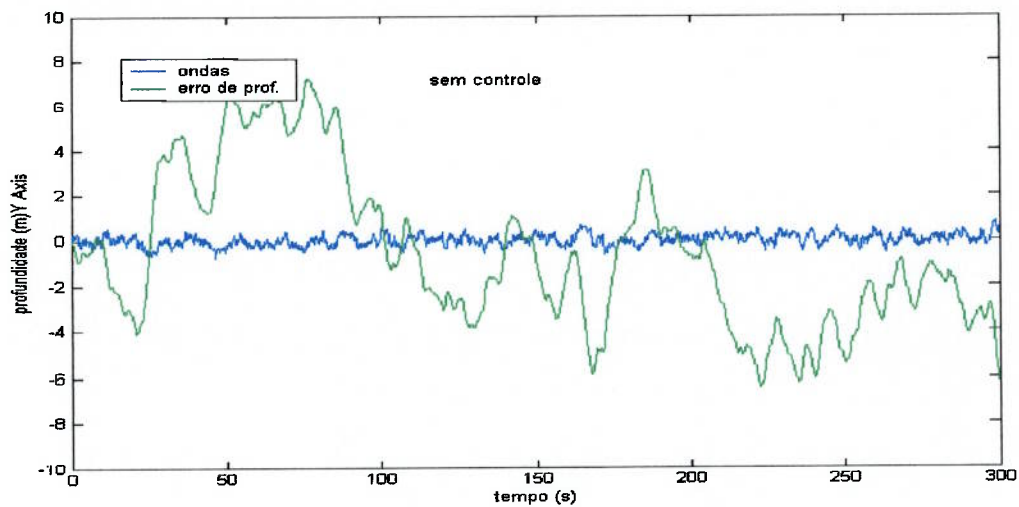


**Figura 5.17 Controlador f2 aplicado ao modelo não linear (leme0)**

Na figura 5.18 e 5.19 tem-se a dinâmica do submarino quando está ausente o controle no modelo linear. Destaca-se que o ângulo máximo de caturro não ultrapassa 1 grau e a profundidade chega a um valor máximo de 7 metros. Ou seja o submarino é estável e de certa forma não necessita de uma atuação dos controladores.



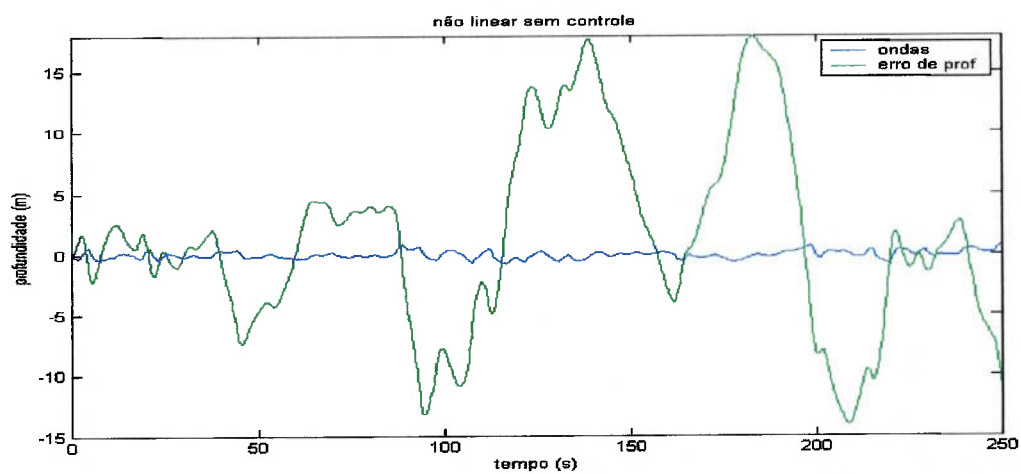
**Figura 5.18 modelo linear sem controle (leme)**

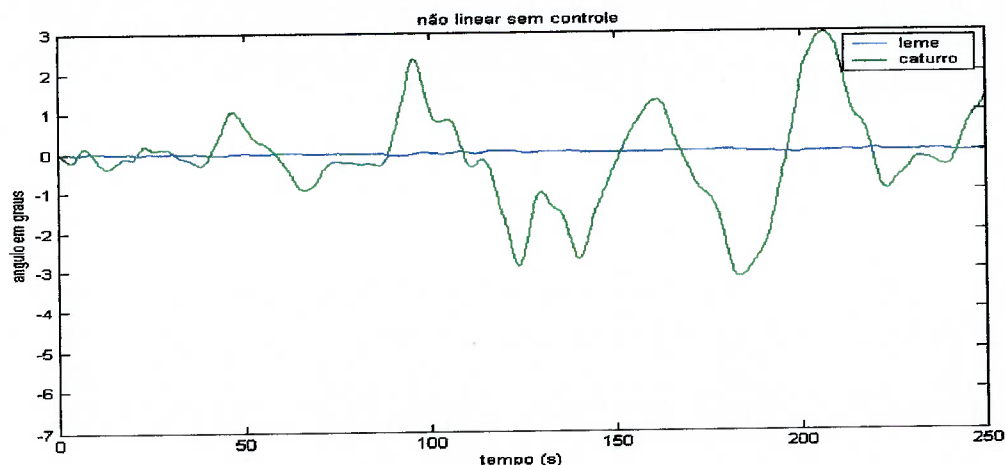


**Figura 5.19 modelo linear sem controle (profundidade)**

As figuras 5.20 e 5.21 apresentam a dinâmica do submarino segundo o modelo não linear quando ausente o controle. Observa-se que ao contrário do modelo linear o modelo não linear é instável. Podendo apresentar picos de mais de 15 metros no erro da profundidade e ângulos de caturro superiores a 3 graus.

**Figura 5.20 Modelo não linear sem controle**





**Figura 5.21 Modelo não linear sem controle (leme e caturro)**

Percebe-se assim que a modelagem do submarino no modelo linear é deficitária já que existe uma divergência significativa entre o comportamento do modelo linear do submarino na manobra de manutenção de profundidade e o comportamento do modelo não linear do submarino para esta mesma manobra ..Deve-se observar que o modelo não linear é mais completo, de onde presume-se que a linearização do modelo completo ( e a criação do modelo linear ), mais simples, não representa a real dinâmica do submarino quando na superfície e sujeito a ação das ondas

A tabela 5.2 mostra uma síntese dos resultados obtidos em manobra de manutenção de profundidade .Esta tabela é similar à tabela 5.1 , com exceção de C2 (variação percentual) já que a profundidade de referência é zero . A simbologia usada nos controladores é a mesma da tabela 5.1 .

Todos os controladores respeitaram os requisitos. Os valores de erro máximo na profundidade devem ser observados com cautela, já que na média o desempenho dos controladores foi muito semelhante .os ângulos de caturro forma extremamente reduzidos para todos os controladores. Os valores de ângulos de leme



forma bem reduzidos. Porém quando o controlador de duas entradas é aplicado ao modelo linear ocorrem picos de 6 graus.

**Tabela 5.2 Resultados para a manobra de manutenção de profundidade**

<b>Tipo</b>	<b>C1 (m)</b>	<b>C2</b>	<b>C3 (m)</b>	<b>C4 (graus)</b>	<b>C5 (s)</b>	<b>C6 (graus)</b>	<b>C7 (s)</b>	<b>GE</b>
<b>F1ML</b>	11	X	0	0	100	6	100	Média
<b>F2ML</b>	5	X	0	0.5	120	3	60	Media
<b>SCL</b>	7	X	0	1	X	X	X	X
<b>F1MNL</b>	2	X	0	0.5	25	5	70	Alta
<b>F2MNL</b>	4	X	0	0.5	30	6	70	Alta
<b>SCNL</b>	18	X	0	4	X	X	X	X

F1ML controlador fuzzy 1 com duas entradas no modelo linear

F2ML controlador fuzzy 2 com três entradas no modelo linear

SCL sem controle modelo linear

F1MNL controlador fuzzy tipo 1 no modelo não linear

F2MNL controlador fuzzy tipo 2 no modelo não linear

SCNL sem controle modelo não linear

#### **5.4 Análise dos resultados**

Para avaliar os controladores devem ser aplicados os dois testes previamente definidos . As manobras são registradas e é verificado se estas manobras

preenchem os requisitos mínimos . Os controladores que satisfazem os requisitos mínimos são avaliados comparativamente através de um conjunto de parâmetros .

Na realização dos testes constatou-se que praticamente todos os controladores satisfizeram os requisitos mínimos tanto na manobra de mudança de profundidade como na manobra de manutenção de profundidade . Com relação ao ângulo de caturro máximo na manobra de mudança de profundidade somente os controladores PIDs ultrapassaram o limite máximo de 6 graus ( como pode-se observar na tabela 5.1) , foram obtidos ângulos máximos de 10 graus.. com relação a manobra de manutenção de profundidade pode-se observar que todos os controladores respeitaram os requisitos mínimos.

Com relação ao erro em regime na manobra de mudança de profundidade os resultados foram extremamente satisfatórios chegando a ser obtido erro zero no caso controlador de 3 entradas aplicado ao modelo não linear

Em uma comparação entre o teste de manutenção e o teste de mudança de profundidade observou-se , inicialmente , que seriam necessários pequenos ajustes na amplitude do conjunto "fuzzy" de saída que representa o leme de forma a tornar a atuação do controlador mais precisa ( diminuindo a amplitude dos ângulos de leme comandados ) . Nos controladores optou-se por introduzir um limitador no ângulo de leme evitando que fossem comandados valores excessivos .Desta forma obteve-se em todos os controladores uma atuação com menores ângulos de leme e ao mesmo tempo uma atuação mais suave do leme sem prejudicar a manutenção da profundidade. Como era de se esperar na manobra de manutenção de profundidade os ângulos de caturro foram menores que na manobra de mudança de profundidade . De todos os controladores o F1ML ( controlador de 2 entradas ) aplicado ao modelo linear foi o que apresentou um maior valor de leme e ao mesmo tempo uma atuação mais intensa do leme .

De forma a permitir uma comparação mais criteriosa optou-se por utilizar os mesmos ajustes nos controladores sejam eles aplicados ao modelo linear ou ao modelo não linear . Isto só não foi possível no controlador PID já que neste os ajustes tiveram que ser bem significativos , sendo necessário criar um outro controle PID somente para atuar no modelo não linear. Por essa razão não foi utilizado o PID na manobra de manutenção de profundidade

Ao invés de se utilizar os parâmetros dos controladores "fuzzy " que foram inicialmente projetados para o modelo linear. Foram criados novos controladores "fuzzy " com parâmetros otimizados para o modelo não linear. Percebe-se que há uma pequena melhora no desempenho do controle principalmente no erro em regime que pode ser substancialmente reduzido, porém os demais requisitos não foram melhorados de forma satisfatória .

O modelo linear na manobra de manutenção de profundidade apresenta um comportamento diferente do modelo não linear. Observa-se que não há uma aderência adequada entre os dois modelos já que para uma mesma altura de onda significativa tem-se variações de profundidade e de ângulos de caturro bastante diferentes entre si.

A perturbação estocástica que representa a ação de ondas foi aplicada somente na manobra de manutenção de profundidade . Não foi possível nos testes dar o devido valor ao real dimensionamento das alturas significativas e ao comportamento das ondas, partiu-se assim de modelos pré concebidos por Gueler .Deve-se destacar também que os controladores "fuzzy" nas manobras de manutenção de profundidade apresentaram grande sensibilidade à amplitude do conjunto "fuzzy" LEME. Dependendo do valor desta amplitude poderíamos ter um controlador mais eficiente ou não.

## CAPÍTULO 6- CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Esta dissertação focalizou a aplicação de controladores "fuzzy" como piloto automático de submarinos. Neste capítulo apresenta-se, inicialmente, uma síntese do trabalho desenvolvido. Em seguida são enunciadas as principais conclusões que envolvem a modelagem da dinâmica do veículo e, principalmente, a aplicação dos controladores "fuzzy". Finalmente, são apresentadas as recomendações para aperfeiçoamento do trabalho e continuação da pesquisa.

### 6.1 Síntese do trabalho

Foi definido como objetivo da pesquisa projetar um piloto automático para um submarino utilizando teoria de controle "fuzzy". Procurou-se justificar o uso desta metodologia no problema em questão. Foi feita uma análise da importância da metodologia e a viabilidade de empregá-la no controle do submarino.

No capítulo 2 são apresentados conceitos de lógica "fuzzy" e controle "fuzzy". Foram estabelecidos conceitos referentes à idéia de incerteza e como lidar com ela. Em seguida, abordou-se especificamente a lógica "fuzzy" e o controle "fuzzy", tornando claro como é possível utilizar conceitos vagos e até redundantes para implementar um controle robusto. Neste capítulo foram apresentados os diversos parâmetros "fuzzy" (conjuntos fuzzy, métodos de inferência, métodos de agregação, codificação e decodificação) que estruturam a teoria fuzzy. Estes parâmetros são abordados de acordo com a aplicabilidade dos mesmos, desde o reconhecimento de padrões até o controle "fuzzy" de um sistema dinâmico.

No capítulo 3 foram apresentadas as equações do movimento para o submarino, inicialmente considerando 6 graus de liberdade - 3 movimentos de rotação e 3 movimentos de translação - e depois foi criado um modelo específico para manobras no plano vertical. Foram descritos os modelos dos diversos esforços que atuam sobre o veículo. Em seguida, propõe-se uma linearização do modelo dada a complexidade do

modelo obtido. São simuladas manobras do submarino para verificar se os modelos obtidos representam adequadamente o comportamento do veículo.

No capítulo 4 foi desenvolvido o projeto do controlador, usando lógica "fuzzy" de forma a cumprir uma série de missões pré-estabelecidas. Na parte inicial do capítulo foram apresentadas várias formas possíveis de se projetar um controlador "fuzzy" e as etapas seguidas no projeto, desde a escolha das regras "fuzzy", passando pela definição das variáveis de controle e chegando à formulação das estruturas dos diversos controladores. Foi projetado um controlador "fuzzy" de duas entradas que fosse capaz de atuar de forma satisfatória no modelo linearizado proposto por Canhetti. Simultaneamente ao aumento da complexidade do modelo, foi projetado um controlador "fuzzy" de três entradas que fosse capaz de atuar satisfatoriamente no modelo não linear e sob o efeito de perturbações. Foram utilizados 4 modelos, de acordo com complexidade do equacionamento e a presença ou não de distúrbios externos. O tipo de perturbação externa foi definido pela manobra a ser executada pelo submarino. Na manobra de mudança de profundidade foi utilizada a perturbação provocada pela atuação de corrente. Na manobra de manutenção de profundidade foi utilizada a perturbação estocástica provocada pelas ondas de superfície. O projeto e ajuste do controlador foi realizado através da execução de manobras que simulam o comportamento do submarino. Foram utilizadas as manobras típicas de "provas de mar" dos submarinos.

No capítulo 5 é realizada a validação do controlador e analisada a sua capacidade de conduzir o submarino de forma adequada em uma trajetória específica. Utilizou-se duas manobras para validação e teste dos controladores: manutenção e mudança de profundidade. Foram definidos os parâmetros para a análise do desempenho dos controladores nas manobras de mudança de cota e de manutenção de profundidade. Foram especificados também requisitos mínimos para alguns destes parâmetros. Foram escolhidos dentre os diversos critérios propostos por Gueler (1987) os mais adequados para avaliação dos testes.

## **6.2 Principais conclusões**

O objetivo estabelecido para a pesquisa - o desenvolvimento e estudo de um controlador "fuzzy" para um submarino em manobras de profundidade - foi atingido. Todas as etapas necessárias para a construção de um controlador fuzzy foram seguidas. A utilização dos diversos controladores nos modelos apresentou resultados satisfatórios..

### **6.2.1 Aspectos gerais**

Optou-se por não utilizar um modelo de seis graus de liberdade. Adotou-se um modelo não linear que descreve o movimento no plano vertical. Tal simplificação foi utilizada por inúmeros pesquisadores como Gueler e Papoulias, possibilita um estudo mais claro do movimento no plano vertical. Poder-se-ia utilizar um modelo mais simples e linearizado como o proposto por Canhetti, mas o desafio de aplicar o controle "fuzzy" a um modelo não linear precisava ser enfrentado. O modelo linearizado formulado por Canhetti foi extremamente útil na concepção inicial do controlador, na escolha das variáveis de entrada, na definição da amplitude dos conjuntos "fuzzy" (que representam o ângulo de leme, a taxa de variação da profundidade e a taxa do erro de profundidade bem como o caturro). Este modelo foi, inclusive, simulado simultaneamente ao modelo não linear do plano vertical e pode-se perceber que o controle "fuzzy" é robusto, permitindo que seja transportado de um modelo para outro sem necessidade de alteração de parâmetros. Deve-se observar que Gueler utiliza um modelo linear do submarino por ocasião do estudo da manobra de manutenção de profundidade. Isto se deve aos reduzidos ângulos de leme e de caturro a que é submetido o submarino

Foi utilizado no trabalho o pacote pronto do MATLAB que permite uma amigabilidade com o usuário podendo as mudanças nos modelos e nos controladores serem introduzidas com uma simples digitação de número ou com o desenho de uma "caixa" qualquer na planta.

### 6.2.2 Controladores

A construção de um controlador obedece uma série de passos que, não só facilita a sua construção, como permite uma reavaliação gradual de cada etapa a ser seguida. Talvez o maior desafio na construção de um sistema especialista seja extrair as informações adequadas para o projeto do controlador. Obtêm-se, usualmente, informações com um especialista humano que consegue descrever o comportamento do sistema. A forma com que a lógica "fuzzy" consegue trabalhar informações empíricas, redundantes, contraditórias ou subjetivas facilita a implementação de sistemas calcados em experiências humanas não modeláveis matematicamente.

Neste trabalho houve uma dificuldade maior em extrair informações adequadas de um especialista. Uma solução viável foi obter parte da informação de oficiais submarinistas mais afetos às manobras com este veículo.

Estas informações foram complementadas com observações das simulações do modelo e comparação com as provas de mar.

Os controladores foram concebidos inicialmente, de forma simples e prática. Porém, algumas barreiras tiveram que ser transpostas. A primeira delas diz respeito à escolha das variáveis de entrada para o controlador. A escolha foi baseada na observação do comportamento do submarino nos testes de simulação e no bom senso pois é intuitivo que, se o objetivo é seguir uma trajetória, o mais conveniente é calcular o erro de posição e ao mesmo tempo analisar a dinâmica da própria posição ou a dinâmica do erro. Na definição das variáveis de entrada optou-se inicialmente pela escolha da variável *taxa de variação do erro de profundidade*.

A literatura de controle e os exemplos encontrados em livros sobre controle "fuzzy" utilizam preferencialmente o ERRO e a TAXA DE VARIAÇÃO DO ERRO. A escolha tem como fundamento de que é preciso conhecer a dinâmica do erro e prever o seu aumento ou diminuição.

A outra escolha foi da amplitude dos conjuntos "fuzzy"; mais uma vez foi necessário efetuar uma série de simulações de forma a especificar os conjuntos "fuzzy". Procurou-se evitar redundâncias e pontos do domínio não pertencentes a nenhum

conjunto "fuzzy" específico. Questões como cardinalidade não foram rigorosamente respeitadas. Percebe-se que, em alguns pontos do domínio, a soma dos graus de pertinência não atinge a unidade; isto, porém, não resultou em perda da eficiência do controlador. Evitou-se, contudo, colocar a cardinalidade maior que a unidade (a literatura especializada recomenda este cuidado). A razão de não respeitar rigorosamente o aspecto da cardinalidade está no fato de que o controlador funcionou melhor quando as funções "fuzzy" apresentavam formas geométricas não regulares.

Assim, em alguns casos têm-se funções "fuzzy" um pouco distorcidas e no caso das funções triangulares têm-se funções do tipo escalenas. Na definição da amplitude dos conjuntos fuzzy que representam os ângulos de leme, percebeu-se que em manobras de manutenção de profundidade exige-se uma amplitude bem menor do que em manobras de mudança de profundidade. Isto evita que naquelas manobras, não só se tenha uma atuação mais freqüente do leme como também evitam-se grandes amplitudes, algo parecido com o que acontece quando se aumenta o ganho em um controlador PID.

Nos controladores "fuzzy" optou-se, inicialmente, por um controle mais simples com apenas duas entradas. Este controlador cumpriu com eficácia os objetivos, mas o comportamento do *ângulo de caturro* não foi satisfatório. Utilizou-se, então, um novo controlador com três entradas que incorpora o CATURRO como variável de entrada. O efeito inicial desta inclusão é o aumento significativo do número de regras e a diminuição da intuição natural para compô-las. Houve também uma demora maior na resposta do controlador ocasionada por dois fatores: o aumento dos cálculos computacionais e a imposição de limitação do caturro. O CATURRO neste novo controlador funciona como forte elemento limitador da atuação do leme, e, conseqüentemente, observam-se ângulos de leme mais reduzidos. O controlador tipo 2 possui um desempenho mais satisfatório que o do tipo 1, a variação do caturro é mais suave, com o sobressinal na profundidade menor, mas a atuação do leme é mais intensa e com valores maiores de picos de sinal.

O controlador tipo PID, usado para fins de comparação, precisou de ajustes já que o controlador inicialmente proposto por CANHETTI não apresentava um desempenho adequado. Percebeu-se que este tipo de controlador, embora mais eficiente



em alguns casos, apresenta inconvenientes como: excessiva atuação no elemento de controle; e constante regulagem dos seus parâmetros; que é muitas vezes, realizada de forma empírica. Constatou-se que para o correto funcionamento do controlador é necessário alterar completamente os parâmetros quando ele é aplicado ao modelo não linear. O controlador também apresentou uma demora computacional bem maior quando atuava no modelo não linear. A demora foi alta, não só comparando com a aplicação do PID ao modelo linear, como também se comparado com os controladores "fuzzy" aplicados ao modelo não linear.

### 6.2.3 Testes de avaliação

Inicialmente, com uma trajetória de referência do tipo senoidal, com amplitude de 500m e frequência de 0,001 segundos, observou-se um desempenho razoável mesmo com um controle rudimentar (com duas entradas) onde as regras são extremamente simples ; utilizou como entrada no controlador apenas *o erro de profundidade e a taxa de variação de profundidade*. O comportamento do ângulo de caturro não é satisfatório pois existem picos superiores a cinco graus de caturro, o que ocasionaria uma sensação de desconforto na tripulação.

A partir dos critérios e da trajetória de referência estabelecidos por GUELER, foram conduzidos os testes do controle. As trajetórias foram compatíveis com as características do submarino e não necessitaram de grandes reformulações.

Uma tarefa importante foi a seleção dos critérios mais adequados para a avaliação dos controladores. Na escolha, optou-se pelos que apresentam maior facilidade computacional, clareza e que representam de forma significativa as características das curvas obtidas nas simulações. Foram assim escolhidos os seguintes parâmetros:

Erro de profundidade; amplitude máxima do erro, amplitude máxima percentual (Máximo erro/profundidade final), erro em regime

Ângulo de Caturro: maior ângulo de caturro, frequência de variação

Ângulo de Leme: maior ângulo, frequência de atuação e grau de exigência GE

Para a manobra de mudança de profundidade foram estabelecidos os seguintes requisitos mínimos para os parâmetros ( manobra de descida com mudança de cota de

200m) ; - máximo ângulo de caturro aceitável (6 graus), sobre-elevação máxima de caturro (30%), sobre-elevação máxima de profundidade (15%), deflexão dos lemes na fase de mergulho (6 graus), deflexão dos lemes na fase de descida (6 graus) período de mergulho (200s), período de descida (100s), período de retomada (200s).

Para a manobra de manutenção da profundidade os requisitos mínimos foram os seguintes: Máximo ângulo de leme (4 graus) , máximo ângulo de caturro (4 graus) variação máxima da profundidade (+- 10 metros).

Todos os controladores atuaram de forma satisfatória, nas duas manobras exigidas ( manutenção e mudança de profundidade ). Os resultados poderiam ser melhores se os estudos fossem concentrados em um tipo somente de controlador ( duas ou três entradas) e em um só modelo ( linear ou não linear), já que muitos dos calores dos conjuntos "fuzzy" , métodos de agregação, e desagregação, formato dos conjuntos "fuzzy" e amplitude dos mesmos forma sendo ajustados á medida que os testes iam sendo realizados .ou seja , com certeza um estudo mais específico e científico poderia ter sido feito e assim poderia ser observado com maior rigor as potencialidades que o controle " fuzzy" pode oferecer.

Foi muito positivo utilizar um controle " fuzzy " baseado em regras simples em um modelo não linear com a influência de perturbações. Outro desafio foi a complexidade do modelo, que mesmo sendo utilizado um PC, requereu muitas vezes casos um dia inteiro para simular 350 segundos.

### **6.3 Recomendações**

Pode-se, no futuro, utilizar um novo controlador que atue no modelo completo com seis graus de liberdade. Para isto seria necessário criar um controlador que atuasse na rotação do motor e outro para as manobras no plano horizontal. Com certeza tanto o controlador de profundidade, quanto estes novos controladores, precisarão de regras mais complexas que envolvam um número maior de variáveis de entrada.

Novas missões podem ser investigadas como, por exemplo, manobras de busca sonar, manobra de ataque e interceptação de navios de superfície, manobras de fuga e ocultação, manobra de mudança de profundidade e rumo simultânea, manobras de mínimo tempo, mínimo consumo, etc.

Poder-se-ia no futuro analisar de forma mais específica a escolha de cada parâmetro "fuzzy", para isto seria melhor utilizar um só controlador e um só modelo, a medida que forem variando os parâmetros "fuzzy" seriam observados a influência deles no cumprimento das manobras.

Para a implementação do controlador pode ser utilizado um computador (muito simples) a bordo dedicado a esta finalidade e poderia ser aplicado outro software especificamente projetado para o controlador e que consiga se comunicar em tempo real com os sensores e softwares específicos dos sistemas de navegação e combate do submarino que atendessem às necessidades do sistema. Deve-se destacar que o software utilizado é um software acadêmico.

**ANEXO A**  
**VALORES ADOTADOS E DERIVADAS HIDRODINÂMICAS**

- VALORES ADOTADOS

SIGLAS	UNIDADE	VALOR
$A_e/A_0$	adm	0,70
B	[N]	14600
$\alpha$	adm	0,16
D	[m]	0,33
Eh	adm	1,105
Et	adm	1,0
Err	adm	1,0
$I_x$	[N.m]	940
$I_y$	[N.m]	3631
$I_z$	[N.m]	3631
$K_{\delta r}'$	adm	$-0,11 \cdot 10^{-3}$
$K_p'$	adm	$-0,31 \cdot 10^{-3}$
$K_p''$	adm	$-0,42 \cdot 10^{-4}$
$K_{qr}'$	adm	$-0,34 \cdot 10^{-3}$
$K_r'$	adm	$-0,79 \cdot 10^{-5}$
$K_i'$	adm	$-0,44 \cdot 10^{-3}$
$K_v'$	adm	$-0,52 \cdot 10^{-3}$
$K_{vr}'$	adm	$-0,30 \cdot 10^{-2}$
$K_{wp}'$	adm	$0,11 \cdot 10^{-3}$
l	[m]	6
m	[Kg]	1460
$M_{\delta s}'$	adm	$0,21 \cdot 10^{-4}$
$M_{\delta s}''$	adm	$-0,37 \cdot 10^{-2}$
$M_q'$	adm	$-0,35 \cdot 10^{-2}$
$M_q''$	adm	$-0,18 \cdot 10^{-3}$
$M_{rp}'$	adm	$0,98 \cdot 10^{-3}$
$M_w'$	adm	$-0,57 \cdot 10^{-3}$
$M_w''$	adm	$0,37 \cdot 10^{-2}$
$M_{vwr}'$	adm	$-0,11 \cdot 10^{-1}$
$N_{\delta r}'$	adm	$-0,42 \cdot 10^{-2}$
$N_p'$	adm	$-0,83 \cdot 10^{-4}$
$N_p''$	adm	$-0,79 \cdot 10^{-5}$

SIGLAS	UNIDADE	VALOR
$N_{pq}$	adm	$-0,65 \cdot 10^{-3}$
$N_r$	adm	$-0,41 \cdot 10^{-2}$
$N_i$	adm	$-0,11 \cdot 10^{-2}$
$N_v$	adm	$-0,11 \cdot 10^{-3}$
$N_v$	adm	$-0,11 \cdot 10^{-1}$
$N_{vr}$	adm	$0,72 \cdot 10^{-2}$
$\rho_0$	[Kg/m <sup>3</sup> ]	$10^3$
w	adm	0,24
$X_{\delta r}$	adm	$-0,32 \cdot 10^{-2}$
$X_{\delta s}$	adm	$-0,25 \cdot 10^{-2}$
$x_B$	[m]	0,09
$X_{qq}$	adm	$-0,23 \cdot 10^{-3}$
$X_{rr}$	adm	$0,39 \cdot 10^{-3}$
$X_u$	adm	$-0,34 \cdot 10^{-3}$
$X_{vr}$	adm	$0,19 \cdot 10^{-1}$
$X_{wq}$	adm	$-0,13 \cdot 10^{-1}$
$Y_{\delta r}$	adm	$0,86 \cdot 10^{-2}$
$Y_p$	adm	$-0,52 \cdot 10^{-3}$
$Y_p$	adm	$-0,31 \cdot 10^{-2}$
$Y_{pp}$	adm	$-0,24 \cdot 10^{-3}$
$Y_r$	adm	$-0,11 \cdot 10^{-3}$
$Y_i$	adm	$0,11 \cdot 10^{-1}$
$Y_v$	adm	$-0,50 \cdot 10^{-1}$
$Y_v$	adm	$-0,23 \cdot 10^{-1}$
$Y_{vr}$	adm	-0,11
$Y_{wp}$	adm	$0,13 \cdot 10^{-1}$
$Z_{\delta s}$	adm	$-0,81 \cdot 10^{-2}$
$z_B$	[m]	0,06
$Z_q$	adm	$-0,92 \cdot 10^{-2}$
$Z_q$	adm	$-0,57 \cdot 10^{-3}$
$Z_{vp}$	adm	$-0,81 \cdot 10^{-1}$
$Z_w$	adm	$-0,17 \cdot 10^{-1}$
$Z_w$	adm	$-0,13 \cdot 10^{-1}$

**ANEXO B**  
**EQUAÇÕES DE MOVIMENTO**

$$\begin{aligned}
\dot{u} = & [m(vr - wq) \\
& + \frac{\rho_0}{2} l^4 (X_{qq} \cdot q^2 + X_{rr} \cdot r^2) \\
& + \frac{\rho_0}{2} l^3 (X_{vr} \cdot vr + X_{wq} \cdot wq) \\
& + \frac{\rho_0}{2} l^2 (X_{\delta r} \cdot u^2 \delta r^2 + X_{\delta s} \cdot u^2 \delta s^2) \\
& + Tp - \frac{Rv}{(1-t)}] \\
& / (m - \frac{\rho_0}{2} l^3 X_u)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\dot{v} = & [m(wp - ur) \\
& + \frac{\rho_0}{2} l^4 (Y_{rr} \cdot \dot{r} + Y_{pp} \cdot \dot{p} + Y_{pp} \cdot p^2 + Y_{pq} \cdot pq) \\
& + \frac{\rho_0}{2} l^3 (Y_{vr} \cdot ur + Y_{vp} \cdot up + Y_{wp} \cdot wp) \\
& + \frac{\rho_0}{2} l^2 (Y_{vr} \cdot uv + Y_{vvr} \cdot v \sqrt{(v^2 + w^2)} + Y_{sr} \cdot u^2 \delta r)] \\
& / (m - \frac{\rho_0}{2} l^3 Y_v)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\dot{w} = & [m(uq - vp) \\
& + \frac{\rho_0}{2} l^4 (Z_{\dot{q}} \cdot \dot{q}) \\
& + \frac{\rho_0}{2} l^3 (Z_{uq} \cdot uq + Z_{vp} \cdot vp) \\
& + \frac{\rho_0}{2} l^2 (Z_w \cdot uw + Z_{\delta s} \cdot u^2 \delta s)] \\
& / (m - \frac{\rho_0}{2} l^3 Z_w)
\end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
\dot{p} = & [(I_x - I_y)qr \\
& + \frac{\rho_0}{2}l^5(K_r \dot{r} + K_{qr}qr) \\
& + \frac{\rho_0}{2}l^4(K_p up + K_r ur + K_v \dot{v} + K_{wp}wp) \\
& + \frac{\rho_0}{2}l^3(K_{vr}uv + K_{\delta r}u^2\delta r) \\
& + x_b B \cos(\theta) \sin(\phi) - Q t_p ] \\
& / (I_x - \frac{\rho_0}{2}l^5 K_{\dot{p}})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\dot{q} = & [(I_z - I_x)rp \\
& + \frac{\rho_0}{2}l^5(M_r rp) \\
& + \frac{\rho_0}{2}l^4(M_w \dot{w} + M_q uq) \\
& + \frac{\rho_0}{2}l^3(M_u u^2 + M_w uw \\
& \quad + M_{ww} w \sqrt{(v^2 - w^2)} + M_{\delta} u^2 \delta s) \\
& - z_b B \sin(\theta) ] \\
& / (I_y - \frac{\rho_0}{2}l^5 M_{\dot{q}})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\dot{r} = & [(I_x - I_y) p q \\
& + \frac{\rho_0}{2} l^5 (N_{\dot{p}} \cdot \dot{p} + N_{pq} \cdot p q) \\
& + \frac{\rho_0}{2} l^4 (N_p \cdot u p + N_r \cdot u r + N_{\dot{v}} \cdot \dot{v}) \\
& + \frac{\rho_0}{2} l^3 (N_v \cdot u v + N_{v \sqrt{v^2 + w^2}} \cdot v \sqrt{v^2 + w^2}) + N_{\delta r} u^2 \delta r \\
& - x_b B \cos(\theta) \sin(\phi) ] \\
& / (I_z - \frac{\rho_0}{2} l^5 N_{\dot{r}})
\end{aligned}$$

onde:

- $m$  [Kg] massa do ml
- $\rho_0$  [Kg/m<sup>3</sup>] densidade da água
- $l$  [m] comprimento do ml
- $X_x$  [adm] derivada hidrodinâmica
- $X_{xx}$  [adm] derivada hidrodinâmica acoplada
- $T_p$  [N] empuxo do propulsor
- $R_v$  [N] resistência ao avanço
- $I_x$  [N.m] momento de inércia do ml em torno do eixo "x"
- $I_y$  [N.m] momento de inércia do ml em torno do eixo "y"
- $I_z$  [N.m] momento de inércia do ml em torno do eixo "z"
- $B$  [N] força de empuxo (flutuação) do ML
- $Q_{T_p}$  [N.m] momento transferido pelo propulsor ao ML

**ANEXO C**  
**EQUAÇÕES AUXILIARES**

### Equações Auxiliares

As equações auxiliares são as equações de Euler, que transformam as coordenadas do sistema de referência com origem no CG do ML para um sistema de referência fixo em terra. As equações de Euler utilizadas foram obtidas de Feldman, 1979.

$$\dot{\phi} = p + \dot{\psi} \sin(\theta)$$

$$\dot{\theta} = q \cos \phi - r \sin \phi$$

$$\dot{\psi} = (r \cos \phi + q \sin \phi) / \cos \theta$$

$$\dot{x}_0 = u \cos \theta \cos \psi + v (\sin \phi \sin \theta \cos \psi - \cos \phi \sin \psi) \\ + w (\sin \phi \sin \psi + \cos \phi \sin \theta \cos \psi)$$

$$\dot{y}_0 = u \cos \theta \sin \psi + v (\cos \phi \cos \psi - \sin \phi \sin \theta \sin \psi) \\ + w (\cos \phi \sin \theta \sin \psi - \sin \phi \cos \psi)$$

$$\dot{z}_0 = -u \sin \theta + v \cos \theta \sin \psi + w \cos \theta \cos \phi$$

onde:

- $x_0$  [m] deslocamento no eixo "Ox" no referencial fixo em terra;
- $y_0$  [m] deslocamento no eixo "Oy" no referencial fixo em terra;
- $z_0$  [m] deslocamento no eixo "Oz" no referencial fixo em terra;

**ANEXO C 1**  
**EQUAÇÃO DO PROPULSOR**

## Propulsor

O modelo do propulsor fornece o torque e o empuxo conforme as seguintes equações:

$$T_p = \rho_0 D^4 K_T N^2$$

$$Q_p = \rho_0 D^5 K_Q N^2$$

onde:

- $T_p$  [N] empuxo do propulsor
- $Q_p$  [N.m] torque do propulsor
- $D$  [m] diâmetro
- $N$  [rps] rotação do propulsor
- $K_T$  [adm] coeficiente de empuxo
- $K_Q$  [adm] coeficiente de torque

Os coeficientes de empuxo e de torque foram parametrizados em função do coeficiente de avanço ( $J$ ) e representados pelas seguintes equações::

$$K_T = -0,2482 J^2 - 0,2272 J + 0,4823$$

$$K_Q = -0,0247 J^2 - 0,0355 J + 0,0721$$

onde:

- $J$  [adm] coeficiente de avanço, dado por:

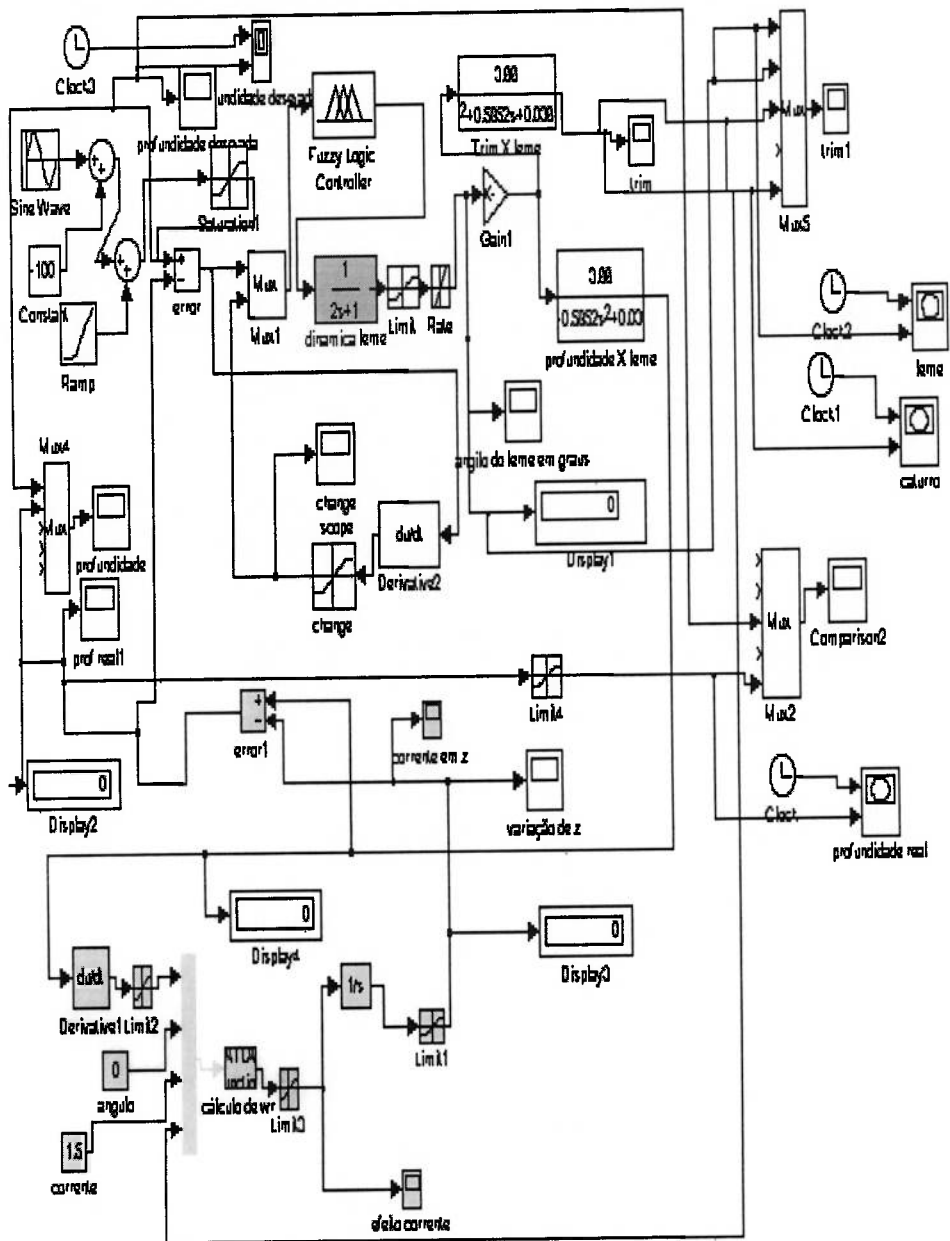
$$J = \frac{u(1-w)}{N D}$$

onde:

- $w$  [adm] coeficiente de esteira

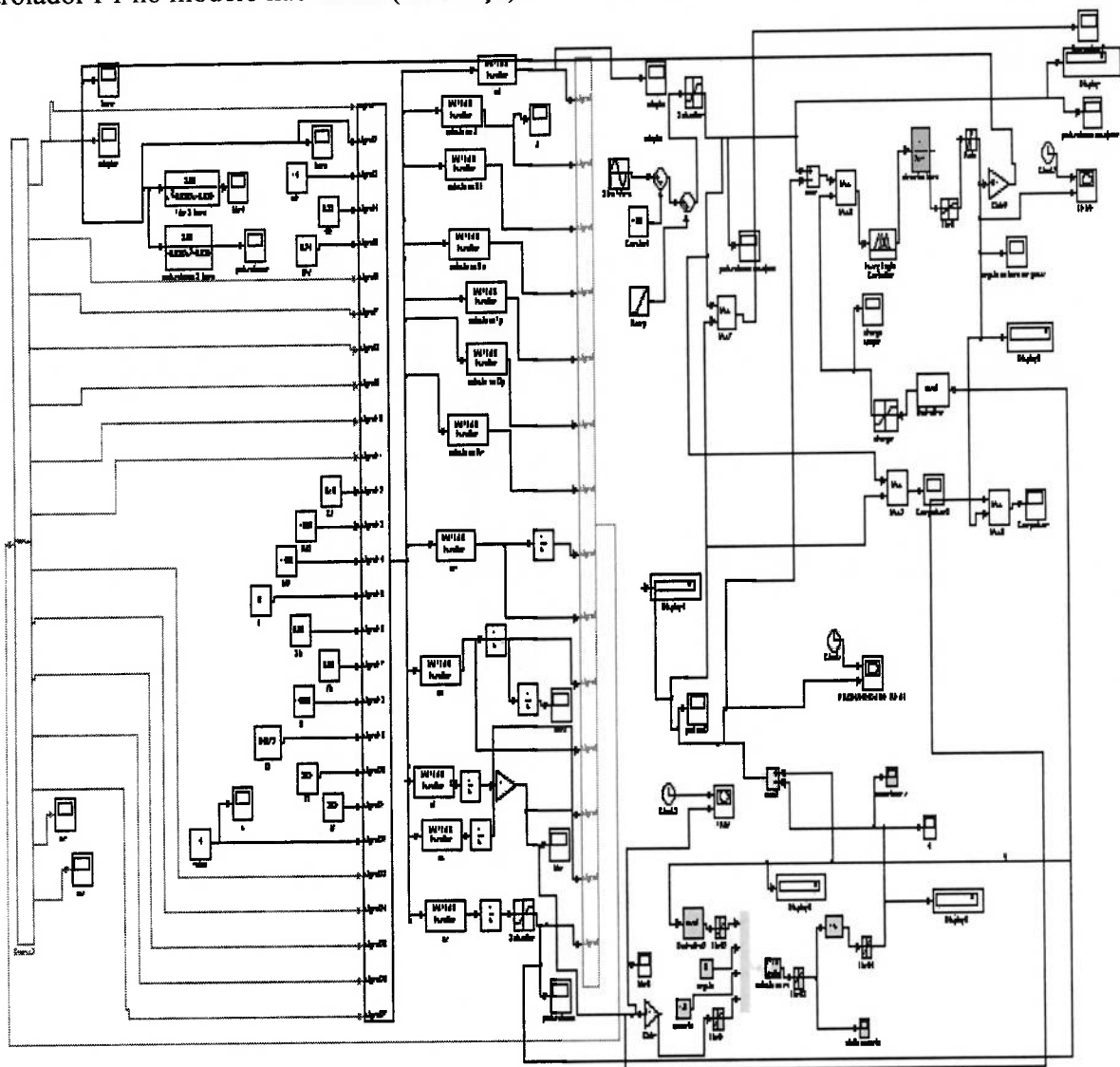
**ANEXO D**  
**MODELOS**

Controlador F1 no modelo linear (mudança)

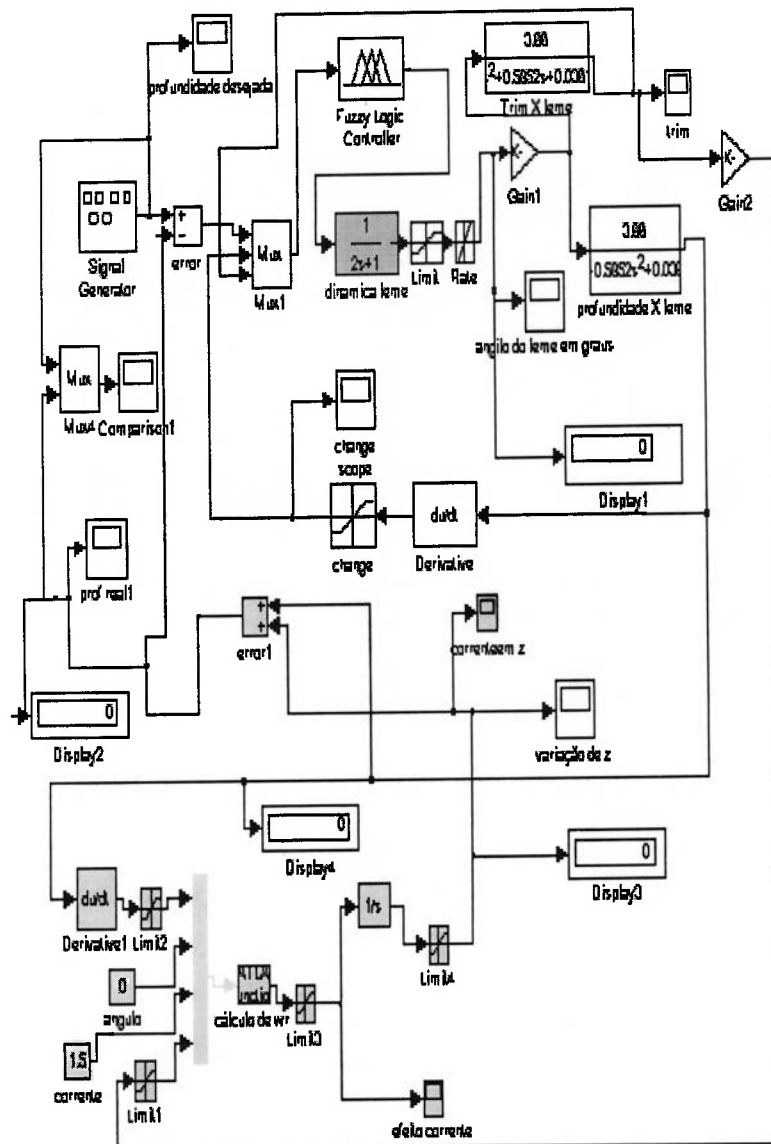




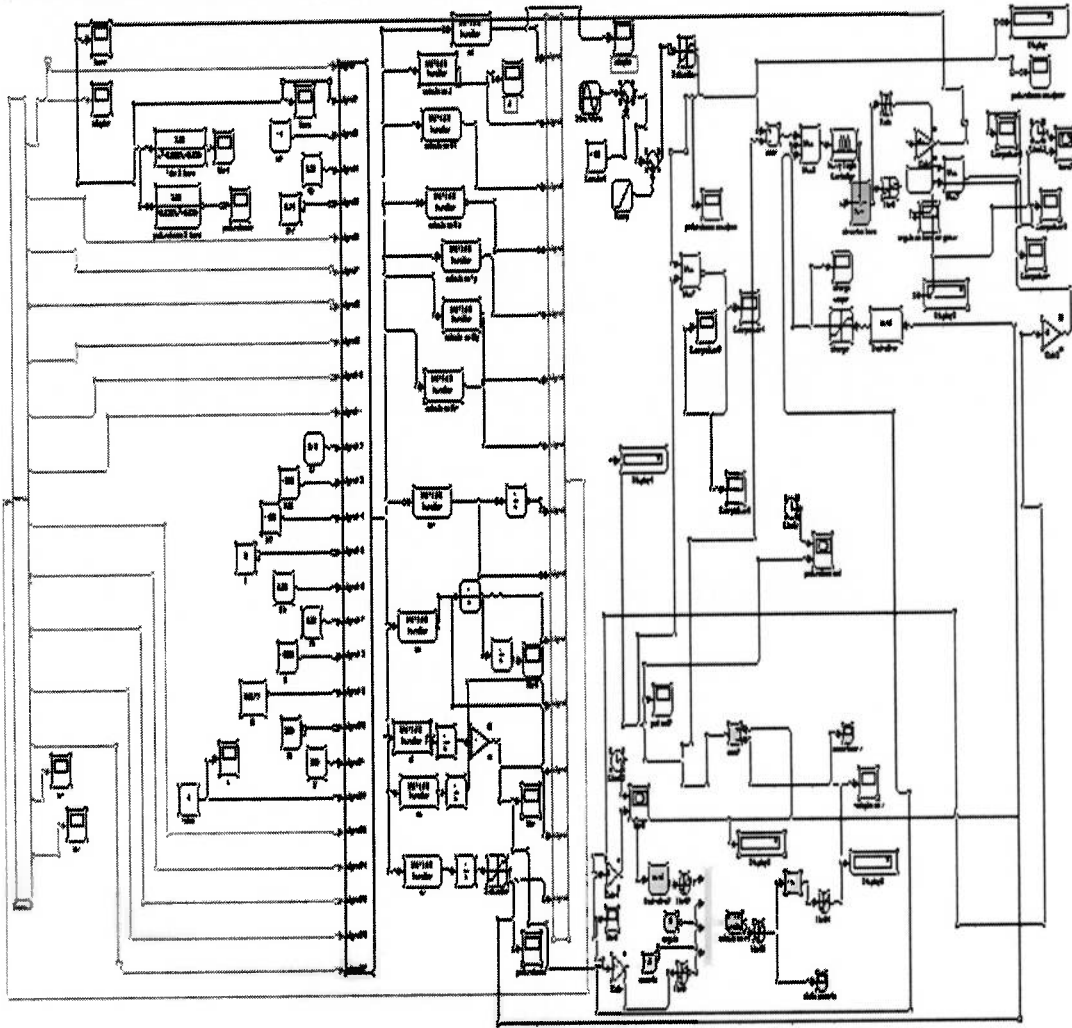
## Controlador F1 no modelo não linear (mudança)



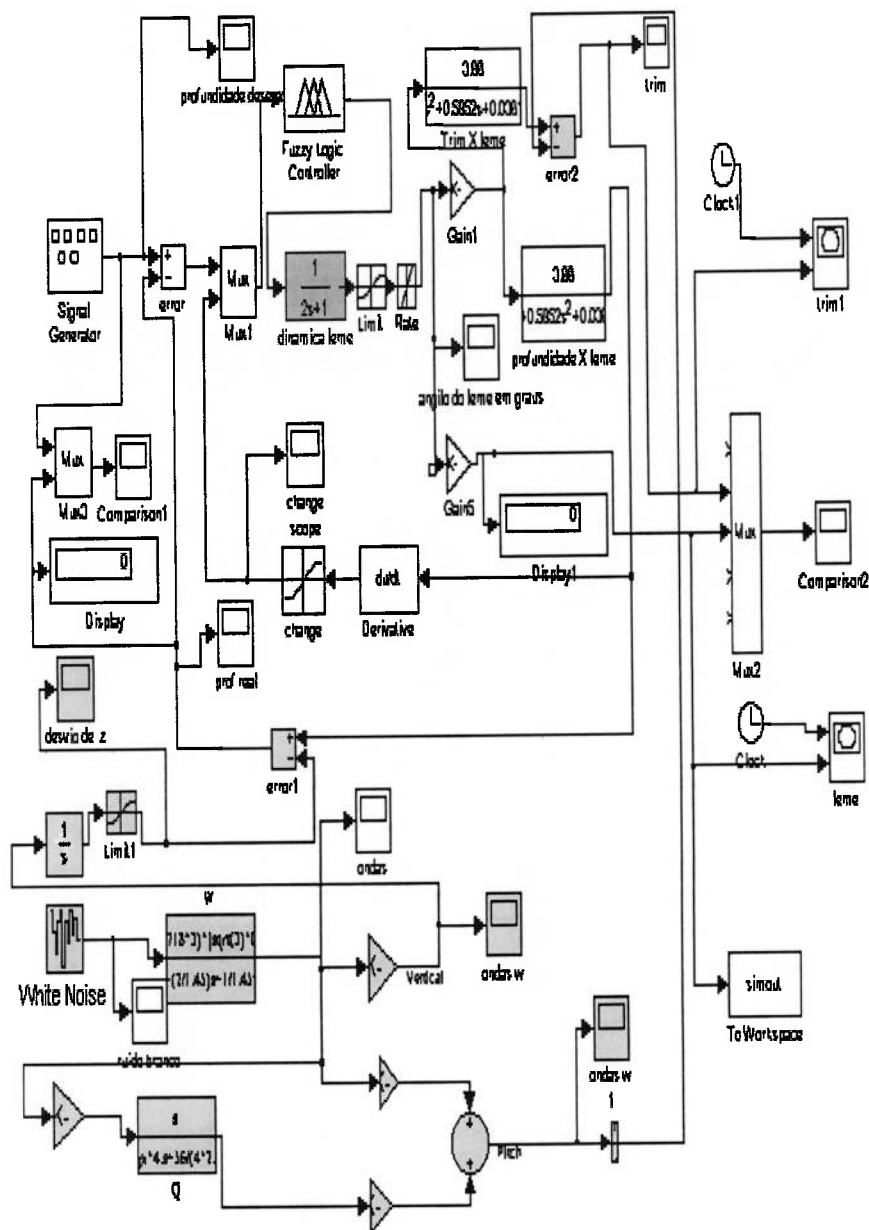
## Controlador F2 no modelo linear (mudança)



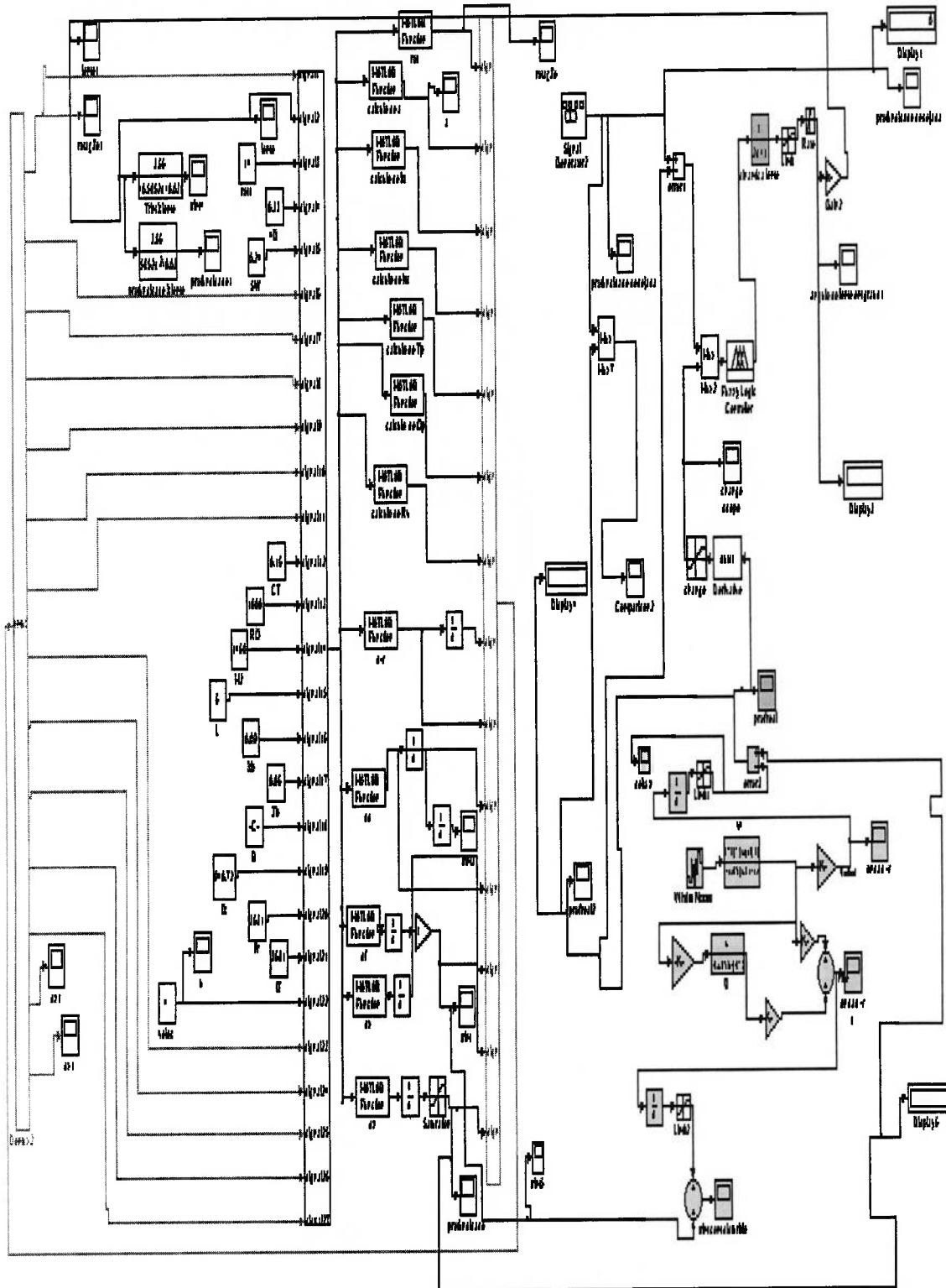
## Controlador F2 no modelo não linear (mudança)



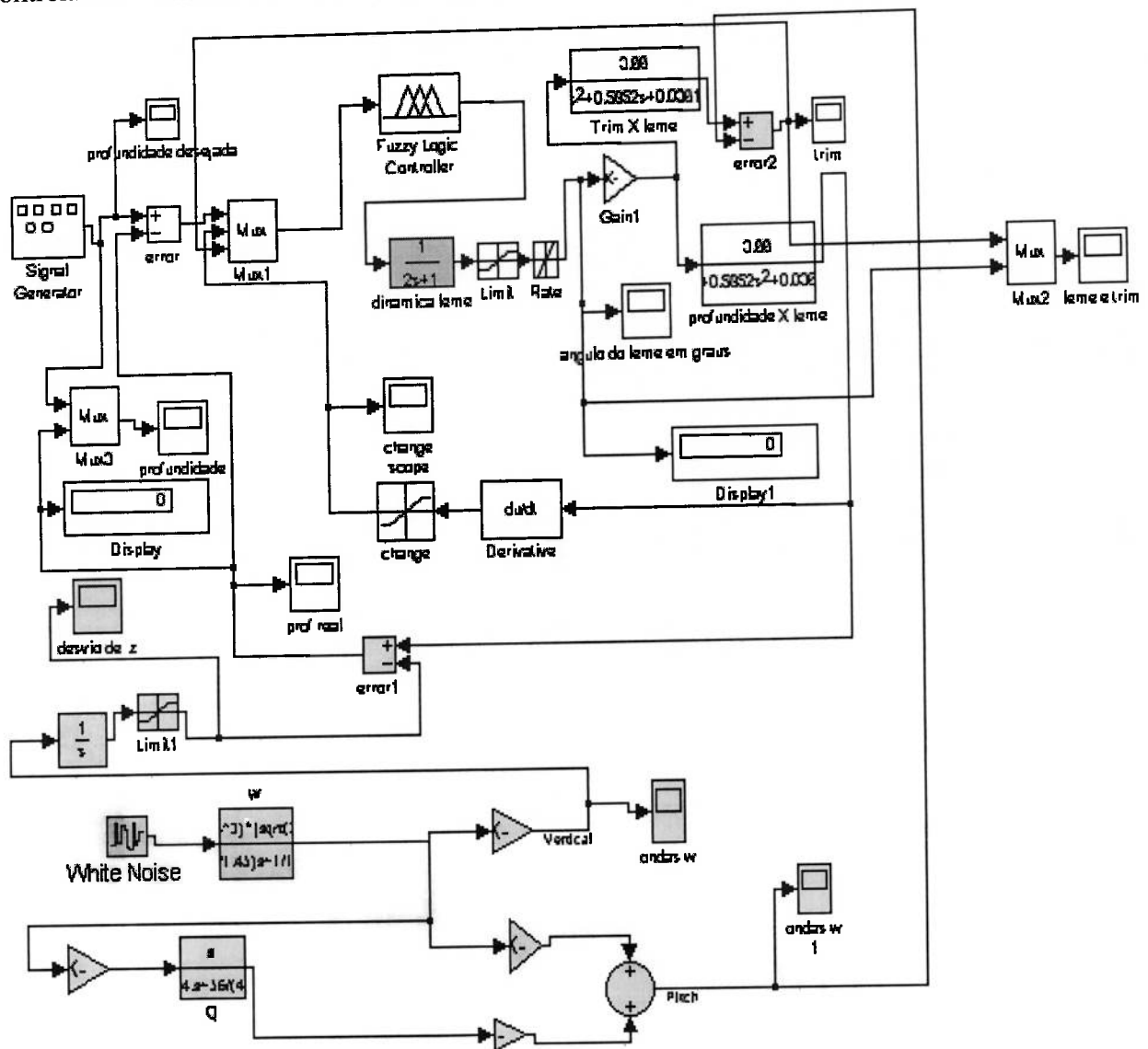
Controlador F1 no modelo linear (manutenção)



Controlador F1 no modelo não linear (manutenção)



## Controlador F2 no modelo linear (manutenção)





## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABKOWITZ, M. A. Stability and motion control of ocean vehicles. Cambridge, The MIT Press, 1972. 184p.

BEZDEK, J. C. "What is Computational Intelligence?", em Zurada, J. M., Marks II, R. J. & Robinson, C. J. (eds.), *Computational Intelligence - Imitating Life*, IEEE Press, 1-12, 1994.

BILDBERG , D. R. Computer Systems for autonomous vehicles. In: OCEANS 81, Boston. Proceedings. Boston, IEEE, 1981. V.1 , p.83-87.

BRINATI , HERNANI LUIZ. Dinâmica de veiculos oceanicos. São Paulo,1991. 358p.Tese (Tese (Livre Doc) - PNV

H. L. CANHETTI , A . C. Modelo livre de Submarinos . São Paulo ,EPUSP , 1998. 150p.(Dissertação de Mestrado apresentada à EPUSP).

C. A. THOMPSON , "Redes Neurais Artificiais: parte 2", *Micro Sistemas*, No 168, pp. 25-26.

BISHOP, R.E.D. & PRICE , W. G. "Probabilistic theory of ship dynamics.London , Chapman & hall , 1974 . 311p.

COLLINS , C. L. ARMS -A proven , remotely operated manipulator system ready now to support offshore drilling in depths to 13000 feet. In:OCEANS 81 , Boston . Proceedings...Boston , IEEE, 1981 . v.2 , p.1165-67

CARMICHEL. A. D. & JANSSON, D. G. ROBOT II, a small unmanned untethered underwater vehicle. In: OCEANS 81, Boston. Proceedings .Boston, IEEE, 1981. v.1, p. 109-12.



CRUZ, J. J. Pilotagem automática de embarcações com o emprego de controle estocástico. São Paulo, EPUSP, 1981. 179p. (Dissertação de Mestrado apresentada à EPUSP

EPPIG , S. H. Vehicle maneuverability augments remote controlled manipulator task capability . In:OCEANS 81 , Boston . Proceedings...Boston , IEEE, 1981 . v.2 , p.1170-74.

FELDMAN, J. DTNSRDC Revised standart submarine equations of motion . David W, Taylor Ship research and development Center , Ship performance Departament, June 1879.

FERREIRA, ADEMAR. Um Sistema de Controle 'FUZZY' de Sinais de Trânsito. São Paulo ,EPUSP , 1999. 58p.(Tese apresentada ao Departamento de Engenharia Eletrônica da EPUSP para o concurso de Livre docência na área de Controle e Automação).

FIGUEIREDO, M., GOMIDE, F. & PEDRYCZ, W. "A Fuzzy Neural Network: Structure and Learning", em Bien, Z., Min, K. C. (eds.), *Fuzzy Logic and its Applications, Information Sciences, and Intelligent Systems*, Kluver Academic Publishers, 177-186, 1995.

FOSSEN , T. I. , Guindance and Control of Ocean Vehicles , University of Trondheim , Norway , 1994.

FRIMM, F.C. "Determinação das características de governo de navios" ; Ensaios com modelos e em escala real. São Paulo ,EPUSP, 1983. 233p. ( Dissertação de Mestrado apresentada a EPUSP).

GUELER , G. F. Modelagem , projeto e Análise de um piloto automático para submarinos . . São Paulo ,EPUSP , 1987. 243p.(Tese de Doutorado apresentada à EPUSP).

GERTHER , M. AND HAGEN , G. R. , Standart equation of motion for submarine simulation , Naval Ship Research and Development Center , Research and Development report , washington , 1967.

GLYNN, J. & BILDBERG, D. R. The UHN Eave-East vehicle. In: OCEANS 81, Boston. Proceedings...Boston, IEEE, 1981. v.1, p. 104-8.

GUPTA , M . M AND J. Qr [1991] "On Fuzzy neuron models ".In: *Proc Int Joint Conf Neural Networks* , vol 3 , 3019-3022 , San Diego .

HAYASHI ,YJ. J. BURKLEY AND E. CZOGALA [1992] "Fuzzy neural networks with Fuzzy signals and weights". In: *Proc . Int Joint Conf.Neural Networks* vol II 696-701 , Baltimore , MD

HATTORI, M. A micro-computer controlled tethered vehicle, JTV-1. In: OCEANS 81, Boston. Proceedings...Boston , IEEE, 1981 . v.2 , p.1139-42.

HIROTA, K. & PEDRYCZ, W. "OR/AND Neuron in Modeling Fuzzy Set Connectives", *IEEETransactions on Fuzzy Systems*, 2(2): 151-161, 1994.

HIROTA, K. & SUGENO, M. (eds.). *Industrial Applications of Fuzzy Technology in the World*, World Scientific, 1995.

HORIHAWA, S. T . FURUHASHI , AND Y. UCHIKAWA [1992] "On Fuzzy modeling using Fuzzy neural networks with back propagation algorithm" *IEEE Trans. Neural Networks* 3(5):801-806

IWANOWSKI , M. & JOHNSTON , J. Development of immersible electric motors for a small inspection class remote controlled vehicle. In:OCEANS 81 , Boston . Proceedings...Boston , IEEE, 1981 . v.2 , p.1168-6.

KANG, H. [1993] "Stability and Control of Fuzzy dynamic systems via cell-state transitions in Fuzzy hypercubes" . *IEEE Trans. Fuzzy .syst.* 1:267-279.

KAZEROONI, H. & SHERIDAN, T. B. General purpose digital simulation of underwater vehicles. In:OCEANS 81 , Boston . Proceedings...Boston , IEEE, 1981 . v.1 , p.123-6.

KELLER, J. M. AND TAHANI [1992] "Backpropagation neural networks for Fuzzy logic" .In: *Inf. Soc.* 62:205-221

KELLER, J. M. AND TAHANI [1992] "Implementation of conjunctive and disjunctive Fuzzy logic rules with neural networks" .In: *Int J. Approximate Reasoning* 6:221-240.

KOSKO , B [1992c] "Fuzzy systems as universal approximations" .In: *Proc IEEE Int. Conf. Fuzzy Syst., 1153-1162 , San Diego.*

LIN , C.T., AND C. S. G. LEE *Neural Fuzzy Systems* PTR PH ,1996

M. M. GOUVÊA JR., P. P. COSTA JR., L. D. B. TERRA, "Artificial Neural Networks: Variable Learning Rate as Function of the Error",In: *Accepted for presentation at 13th ISPE/IEE-International Conference on CAD/CAM, ROBOTICS & Factories of the Future*, Universidad Tecnológica de Pereira, Colômbia, 15-17 December 1997.

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES. "Ocean wave spectra" englewood Cliff , Prentice-Hall , 1963 .423p

NODLAND, W. E. et alli. SPURV II - An unmanned, free swimming submersible, developed for oceanographic research. In: OCEANS 81, Boston. Proceedings...Boston, IEEE, 1981. v.1, p. 92-6.

NOMOTO, M. & SASAKI, K. Development of na underwater sliding vehicle for oceanografhic measurement. In: OCEANS 81, Boston. Proceedings...Boston, IEEE, 1981. v.2, p. 1150-54.

RUSSEL, G. T. & BELLEC, P. The investigation of submersible manouvability by simulation. In: OCEANS 81, Boston. Proceedings. Boston, IEEE, 1981. v.1 , 137-41.

RUSSEL, G. T. & BUGGE, J. Automatic gidance of na unmanned submersible using a hierarchical computer control strategy. In:OCEANS 81 , Boston . Proceedings...Boston , IEEE, 1981 . v.1 , p.118-22

S. HAYKIN, *Neural Networks: A Comprehensive Foundation* , Prentice Hall, New Jersey, 1994.

S. KARTALOPOULOS, *Understanding Neural Networks and Fuzzy Logic - Basic Concepts and Applications* , The Institute of Eletrical and Eletronics Enggineers, Inc., New York, 1996.

SIMPSON, P. K. (ed.). *Neural Networks Applications*, IEEE Press, 1996.

SOTELO, J. J. Aplicação de controle ótimo na modelagem do timoneiro. São Paulo, EPUSP, 1976. 216p. (Dissertação de Mestrado apresentada à EPUSP).

SUMMEY, D.C. & SMITH, N. S. The development and application of underwater vehicle design techniques. In: OCEANS 81, Boston. Proceedings. Boston, IEEE, 1981. v.2, p. 1160-64.

TANAKA , K., M .SANO [1992] "Some proprieties of stability of fuzzy nonlinear feedback systems" .In: *Int. Conf. Ind. Electron.Control,Instrum.Autom.(IECON-1992)* , pp1252-1257, San Diego , Aug.1992.

TAKAGI , T. AND M. SUGENO [1985] "Fuzzy identification of systems and its appliccations to modeling and control' . *IEEE . Trans . Neural Networks* 3(5):pp752-760.

VIANA, H. S. da COSTA. Análise da trajetória e do controle automático de um submarino pelo emprego de um modelo matemático linear. São Paulo, EPUSP, 1983. 175p. (Dissertação de Mestrado apresentada à EPUSP).

YOERGER , M. & JOHNSTON , J. Development of immersible eletric motors for a small inspection class remote controlled vehicle. In:OCEANS 81 , Boston . Proceedings...Boston , IEEE, 1981 . v.2 , p.1168-69.