

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO**

LUCAS CUNHA ALEIXO

**POSICIONAMENTO DINÂMICO DE EMBARCAÇÕES
DESTINADAS AO APOIO MARÍTIMO EM ALTO MAR
UTILIZANDO CONTROLE NEBULOSO**

**VITÓRIA – ES
JUN/2009**

LUCAS CUNHA ALEIXO

**POSICIONAMENTO DINÂMICO DE EMBARCAÇÕES
DESTINADAS AO APOIO MARÍTIMO EM ALTO MAR
UTILIZANDO CONTROLE NEBULOSO**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno Lucas Cunha Aleixo, apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

VITÓRIA – ES

JUN/2009

LUCAS CUNHA ALEIXO

**POSICIONAMENTO DINÂMICO DE EMBARCAÇÕES
DESTINADAS AO APOIO MARÍTIMO EM ALTO MAR
UTILIZANDO CONTROLE NEBULOSO**

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Márcio Coelho de Mattos - Orientador

Prof. xxx

Prof. xxx

Vitória - ES, 19, junho, 2009

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, aos meus pais João Batista Aleixo e Zenilvia Cunha Aleixo por todo o suporte durante minha graduação, aos meus irmãos David e Daniel e em especial ao meu irmão Thiago da Cunha Aleixo que me ajudou a entender melhor o funcionamento da indústria destinada ao apoio marítimo.

Ao meu orientador Márcio Coelho de Mattos e ao professor Rafael Luís Teixeira, que sempre se mostraram prestativos, compreensivos e pacientes com as eventuais dúvidas.

A Agência Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustíveis (ANP) e ao PRH-29 que muito colaboraram com o apoio financeiro e pela oportunidade de ter cursado a ênfase em petróleo e gás.

Aos professores do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo que passaram seus ensinamentos para o enriquecimento do nosso conhecimento e estarmos agora concluindo mais uma etapa de nossas vidas.

RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso estuda duas técnicas de controle, um nebuloso (*fuzzy control*) e outro proporcional integral derivativo (PID) aplicado a um Sistema de Posicionamento Dinâmico (SPD) de uma embarcação destinada ao apoio marítimo. Um SPD é empregado principalmente em operações marítimas de apoio às plataformas semi-submersíveis de exploração e prospecção de petróleo em águas profundas e ultra-profundas. Neste sistema, a embarcação possui propulsores instalados no casco, que são acionados sempre que a embarcação se desloca de seu ponto de referência. Primeiro é feito o estudo e a modelagem matemática da dinâmica da embarcação, do carregamento ambiental (correnteza e vento) e dos propulsores que atuam sobre ela. Então é desenvolvido um simulador numérico utilizando o MATLAB e o SIMULINK, no domínio do tempo, para dois graus de liberdades do navio (deriva e avanço). Finalmente são apresentados e analisados os resultados obtidos por estes controladores.

Palavras Chaves – Sistema de Posicionamento Dinâmico, Controle Nebuloso, Simulador Numérico.

ABSTRACT

This graduation monograph study two techniques of control, a fuzzy control and another Proportional Integral Derivative (PID) applied to a Dynamic Positioning System (DPS) of a vessel destined to the maritime support. A DPS is mainly applied in offshore Exploration & Production (E&P) activities in deep and ultra deep water. In DPS, the vessel has thrusters at the hull and these thrusters are activated when the vessel displaces from the reference position. First, a study about mathematical modeling and this study includes the vessel hydrodynamics, the forces of the environmental loads (current and wind) and thrusters that act on the vessel. Then, a numerical simulator is developed using MATLAB and SIMULINK in the time domain with two degree of freedom (surge and sway) of the vessel. Finally they are presented and analyzed the results gotten for these controllers.

Key Words – Dynamic Positioning System, Fuzzy Control, Numeric Simulator.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Produção total de petróleo no Brasil (em bep). Fonte: ANP.....	13
Figura 2 –	Produção total de gás natural no Brasil (em bep). Fonte: ANP.....	13
Figura 3 –	Camada de pré-sal localizada em Tupi. Fonte: PETROBRÁS.....	14
Figura 4 –	Estimativa da produção de petróleo no pré-sal Petrobrás e parceiros (mil bpd). Fonte: Petrobrás.....	15
Figura 5 –	Embarcações destinadas ao apoio marítimo. Fonte: Maersk Supply Service.	16
Figura 6 –	Embarcação de manuseio de espas. Fonte: Laborde Serviços Marítimos.	18
Figura 7 –	Supridor. Fonte: Viking Energy.	18
Figura 8 –	Supridor de apoio as plataformas. Fonte: Maersk Supply Service.....	19
Figura 9 –	AHTS realizando uma operação numa plataforma. Fonte: PETROBRÁS.	19
Figura 10 –	Embarcação destinada ao apoio a mergulho. Fonte: Naven Ltd.....	20
Figura 11 –	Navio de lançamento de linhas. Fonte: Origin Energy.	20
Figura 12 –	Navio de estimulação de poços de petróleo. Fonte: Marine Group.....	21
Figura 13 –	Navio de pesquisa sísmica. Ilustração de Bruce A. Alderson.	21
Figura 14 –	Maersk Helper. Fonte: Maersk Supply Service.	22
Figura 15 –	Movimentos e forças de uma embarcação. Fonte: Kongsberg Maritime AS modificado.	23
Figura 16 –	Principais elementos de um sistema de posicionamento dinâmico. Fonte: Kongsberg Maritime AS. Modificado	25

Figura 17 – Diagrama de blocos do SPD.	26
Figura 18 – Sinais acústicos abaixo do nível do mar. Fonte: Konsberg Maritime SA.	27
Figura 19 – Diagrama de blocos de um controlador PID.....	28
Figura 20 – Funções de pertinência: (a) Caso exato e (b) Caso nebuloso. Fonte: SALVADOR (2007).	30
Figura 21 – Estrutura de um controlador nebuloso.	31
Figura 22 – Exemplo de variável lingüística (YAMAMOTO, 2005).	32
Figura 23 – Exemplo de defuzzificação. Fonte: SALVADOR (2007).	34
Figura 24 – Coeficiente de arrasto para partes contendo superfícies planas. Fonte: API.	37
Figura 25 – Esquema simplificado das equações do controlador.	40
Figura 26 – Função de pertinência da posição	42
Figura 27 – Função de pertinência da velocidade.....	43
Figura 28 – Função de pertinência do empuxo	44
Figura 29 – Função de pertinência da correnteza.....	45
Figura 30 – Função de pertinência do vento	46
Figura 31 – Escala Beaufort.	49
Figura 32 – Condições ambientais para a primeira simulação.....	50
Figura 33 – Velocidade da embarcação para a primeira simulação.....	51
Figura 34 – Deslocamento da embarcação para a primeira simulação.....	52
Figura 35 – Condições ambientais para a segunda simulação.	53

Figura 36 – Velocidade da embarcação para a segunda simulação.....	53
Figura 37 – Deslocamento da embarcação para a segunda simulação.....	54
Figura 38 – Condições ambientais para a terceira simulação.....	55
Figura 39 – Velocidade da embarcação para a terceira simulação.....	55
Figura 40 – Deslocamento da embarcação para a terceira simulação.....	56
Figura 41 – Condições ambientais para a quarta simulação.....	57
Figura 42 – Velocidade da embarcação para a quarta simulação.....	57
Figura 43 – Deslocamento da embarcação para a quarta simulação.	58
Figura 44 – Condições ambientais para a quinta simulação.	59
Figura 45 – Velocidade da embarcação para a quinta simulação.....	60
Figura 46 – Deslocamento da embarcação para a quinta simulação.....	60
Figura 47 – Condições ambientais para a sexta simulação.	61
Figura 48 – Velocidade da embarcação para a sexta simulação.	61
Figura 49 – Deslocamento da embarcação para a sexta simulação.....	62
Figura 50 – Vista superior do Maersk Helper. Fonte: Maersk Supply Service.	65
Figura 51 – Vista lateral do Maersk Helper. Fonte: Maersk Supply Service.....	65
Figura 52 – Controlador nebuloso utilizando o SIMULINK.....	67
Figura 53 – Controlador Proporcional Integral Derivativo (PID) utilizando o SIMULINK.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coeficiente de forma	38
Tabela 2 – Coeficiente de altura (para um minuto de vento).....	39
Tabela 3 – Regras do controlador nebuloso (posição).....	46
Tabela 4 – Regras do controlador nebuloso (forças ambientais).	47
Tabela 5 – Principais características do Maersk Helper. Fonte: Maersk Supply Service.	66

SIMBOLOGIA

Siglas

ABEAM = Associação de Empresas de Apoio Marítimo;

ANP = Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis;

API = *American Petroleum Institute*;

APR = *Acoustic Position Reference*;

Bep = Barril equivalente de petróleo;

Bpd = Barris por dia;

CG = Centro de gravidade;

DGPS = *Differential Global Positioning System*;

DPS = *Dynamic Positioning System*;

GPS = *Global Positioning System*;

PID = Proporcional – Integral – Derivativo.

GLOSSÁRIO

Barril equivalente de petróleo - é a unidade de uso comum nas medições de consumo de energia equivalente a $6,6 \times 10^9$ J, $1,45 \times 10^9$ cal, $1,68 \times 10^3$ kWh ou 0,14 TEP.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	II
ABSTRACT	III
LISTA DE FIGURAS	IV
LISTA DE TABELAS	VII
SIMBOLOGIA	VIII
GLOSSÁRIO	IX
SUMÁRIO	X
1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Histórico do apoio marítimo.....	16
1.2 Embarcações destinadas ao apoio marítimo	17
1.3 Embarcação destinada ao reboque e manuseio de âncoras (AHTS)	22
1.4 Movimentos e forças básicas de uma embarcação	23
1.5 Objetivo do trabalho	24
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1 Sistema de Posicionamento Dinâmico (SPD)	25
2.1.1 Estratégia de controle do SPD.....	26
2.1.1.1 Sistema de controle e sensores.....	26
2.1.1.2 Sistema de propulsores	27

2.1.1.3 Sistema de potência	28
2.2 Controle Proporcional - Integral - Derivativo (PID)	28
2.3 Lógica Nebulosa (<i>Fuzzy Control</i>)	29
2.3.1 Conjuntos nebulosos	29
2.3.2 Controle nebuloso	30
2.3.3 Funções da interface de fuzzificação	31
2.3.3.1 Variável lingüística	31
2.3.4 Base de conhecimento	32
2.3.5 Lógica de tomada de decisões	33
2.3.6 Funções da interface de defuzzificação	33
3 MODELAGEM MATEMÁTICA	35
3.1 Equação do movimento	35
3.2 Forças ambientais	36
3.2.1 Correnteza	36
3.2.2 Ventos	37
3.3 Propulsores	39
4 REGRAS NEBULOSAS DO CONTROLADOR	41
4.1 Variáveis lingüísticas	41
4.1.1 Variável lingüística posição	41
4.1.2 Variável lingüística velocidade	42
4.1.3 Variável lingüística empuxo	43

4.1.4 Variável lingüística correnteza	44
4.1.5 Variável lingüística vento	45
4.2 Base de regras e inferências	46
4.2.1 Primeira abordagem do controlador nebuloso	46
4.2.2 Segunda abordagem do controlador nebuloso	47
5 RESULTADOS	49
5.1 Simulação 1 (Condições constantes)	50
5.2 Simulação 2 (Beaufort 1)	52
5.3 Simulação 3 (Beaufort 2)	54
5.4 Simulação 4 (Beaufort 3)	56
5.5 Simulação 5 (Beaufort 5)	58
5.6 Simulação 6 (Beaufort 6)	60
6 CONCLUSÕES	63
APÊNDICE A	65
APÊNDICE B	67
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o Brasil vem se destacando no cenário mundial como um interessante mercado em franca expansão de petróleo e gás, conforme mostra o boletim mensal da ANP de abril de 2009.

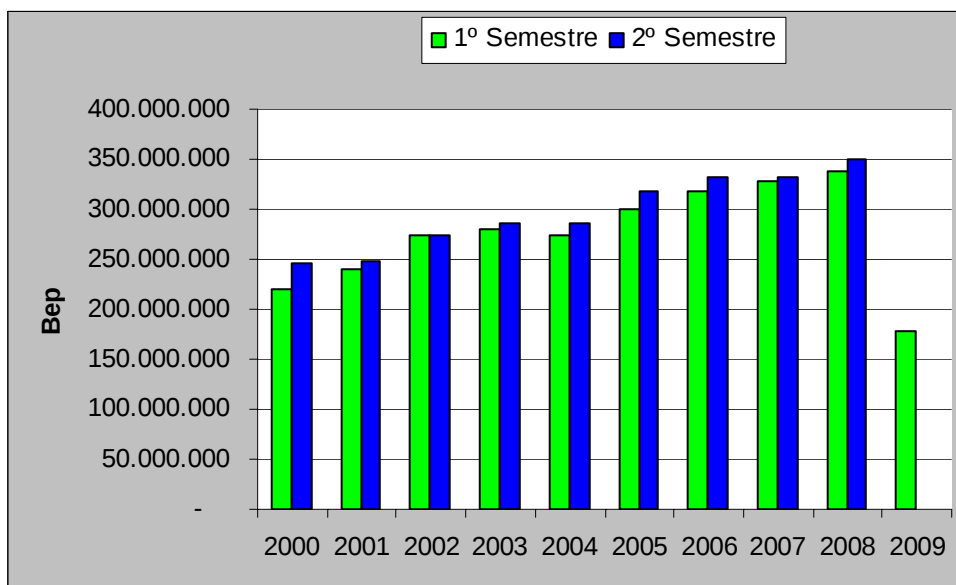


Figura 1 – Produção total de petróleo no Brasil (em bep). Fonte: ANP.

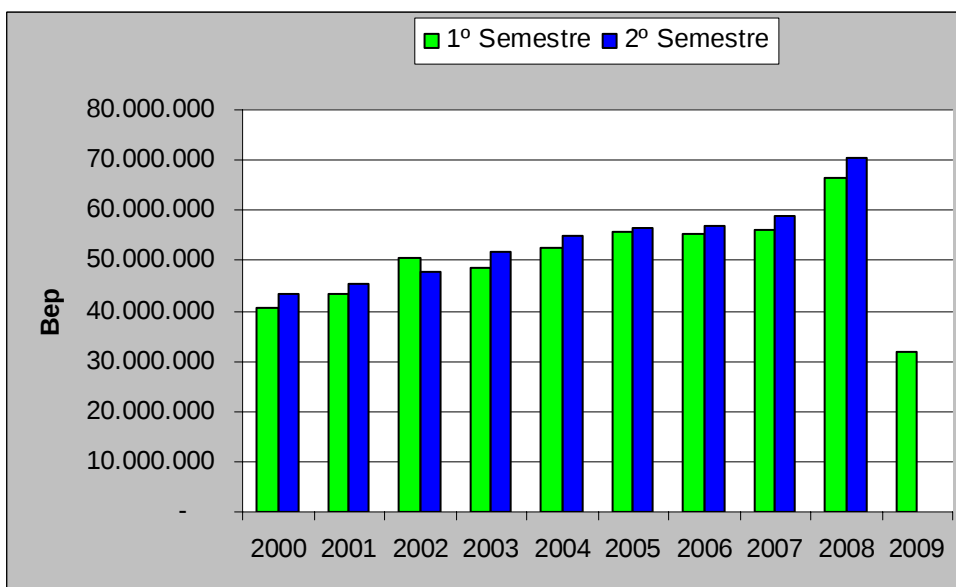


Figura 2 – Produção total de gás natural no Brasil (em bep). Fonte: ANP.

As recentes descobertas de petróleo e gás no pré-sal da costa brasileira trazem um novo horizonte para a indústria do petróleo mundial. A Petrobrás já iniciou a produção em Tupi, a mais de cinco mil metros abaixo da superfície do mar onde se estima encontrar entre 5 a 8 bilhões de barris de petróleo. A figura 3 ilustra a camada do pré-sal localizada em Tupi.

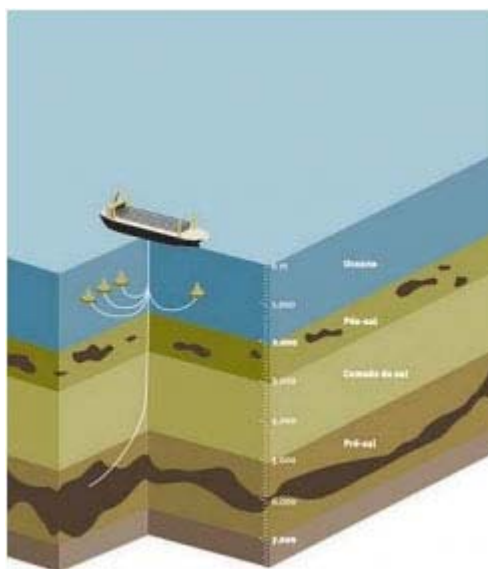


Figura 3 – Camada de pré-sal localizada em Tupi. Fonte: PETROBRÁS.

Devido à grande descoberta do pré-sal, o mercado do Espírito Santo de petróleo que já estava em crescimento, passou a ser um ponto estratégico para o cenário nacional de petróleo e gás, como mostra a figura 4.

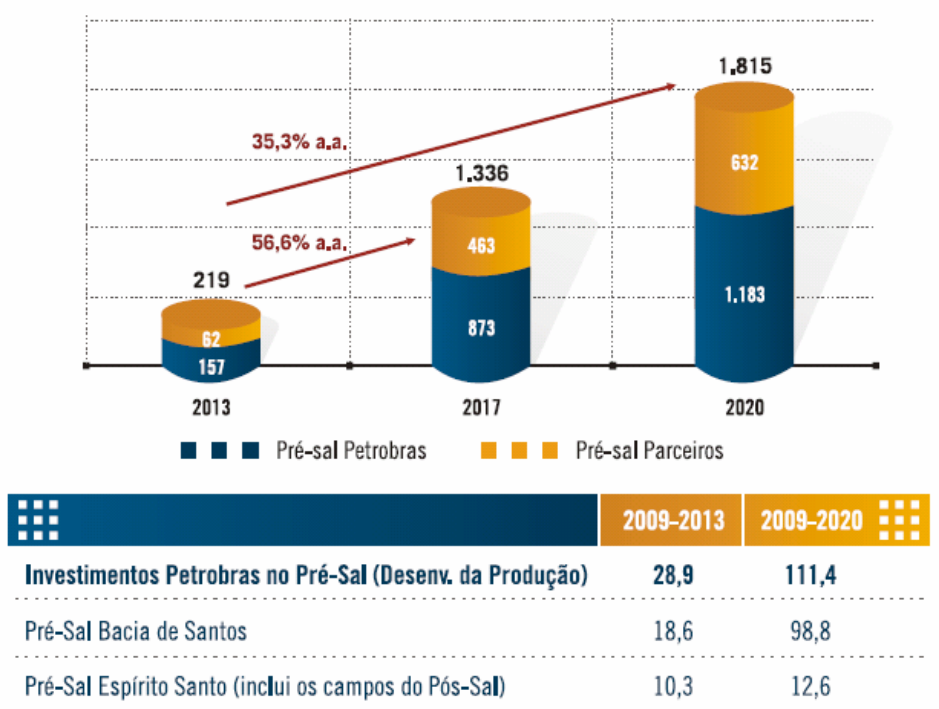


Figura 4 – Estimativa da produção de petróleo no pré-sal Petrobrás e parceiros (mil bpd). Fonte: Petrobrás

Com a expansão da exploração e produção de petróleo e gás e com a nova política brasileira para o petróleo, permitindo contratos com empresas estrangeiras para a exploração de novos campos na plataforma continental, não só a Petrobrás vem expandindo a sua área de atuação, como outras companhias estão se instalando no Brasil, aumentando sensivelmente a demanda de embarcações e equipamentos de Apoio Marítimo (figura 5).



Figura 5 – Embarcações destinadas ao apoio marítimo. Fonte: Maersk Supply Service.

1.1 Histórico do apoio marítimo no Brasil

A evolução das atividades de apoio marítimo no Brasil ocorreu em períodos marcados pelas seguintes etapas:

- Implantação – 1968 a 1975 – As primeiras descobertas de petróleo em mar aberto. A importação das 13 primeiras embarcações pela Petrobrás.
- Expansão – 1976 a 1981 – A frota brasileira atinge 44 navios. A Petrobrás transfere às empresas brasileiras de navegação a operação da frota de navios de apoio marítimo.
- Consolidação – 1982 a 1989 – Operação das primeiras plataformas semi-submersíveis. Adjudicação de contratos em licitação pública para armadores brasileiros. A frota de apoio marítimo brasileira chega a 110 embarcações

- Desarticulação – 1990 a 1997 – A abertura indiscriminada do mercado atingiu o setor de construção naval e navegação. As empresas estrangeiras passam a dominar o mercado. Perda de tecnologia, perda de empregos e drenagem de divisas. A frota de apoio marítimo de bandeira brasileira cai para 43 navios.
- Nova proposta – a partir de 1977 – Com a promulgação da lei nº 9432/97 que regulamenta o transporte aquaviário, as empresas brasileiras de apoio marítimo, através da Associação de Empresas de Apoio Marítimo (ABEAM), apresentam um programa de modernização da frota, mediante a construção local de embarcações apropriadas à operação em águas profundas e ultra-profundas.

O programa vem sendo executado satisfatoriamente permitindo o aumento da frota brasileira com incorporação de novas embarcações dotadas de instalações e equipamentos modernos, adequados às exigências do mercado.

1.2 Embarcações destinadas ao apoio marítimo

As embarcações destinadas ao apoio marítimo realizam diversas funções que tem como principal objetivo sustentar a produção e exploração das plataformas em alto mar. Dependendo do arranjo de convés destas embarcações possuem classificações e funções distintas, são elas:

- Manuseio de espias (*LH*): tipo de embarcação empregada nos pequenos serviços de apoio as unidades tais como: transporte de malotes, pequenas cargas e pessoas, além do transbordo (figura 6).



Figura 6 – Embarcação de manuseio de espas. Fonte: Laborde Serviços Marítimos.

- Supridor (*Supply Vessel*): Embarcação com o convés principal liberado voltado para o transporte de carga geral e suprimento (figura 7).



Figura 7 – Supridor. Fonte: Viking Energy.

- PSV (*Platform Supply Vessel*): Tipo de supridor com projeto otimizado para enfrentar condições meteorológicas adversas (figura 8).



Figura 8 – Supridor de apoio as plataformas. Fonte: Maersk Supply Service.

- Reboque e manuseio de âncoras (*AHTS – Anchor Handling and Towing Supply*): Embarcação construída objetivando as operações de reboque e ancoragem das plataformas (figura 9).



Figura 9 – AHTS realizando uma operação numa plataforma. Fonte: PETROBRÁS.

- Apoio a Mergulho (*DSV – Diving Support Vessel*): Embarcação destinada no apoio a mergulho de profundidade (figura 10).



Figura 10 – Embarcação destinada ao apoio a mergulho. Fonte: Naven Ltd.

- Balsa de serviços (*Barge*): Embarcação empregada em serviços gerais, tais como lançamento de tubos, montagem, etc.
- Lançamento de linhas (*Pipe Laying Vessel*): Embarcação destinada ao lançamento e posicionamento no fundo do mar de cabos de telecomunicações e flexíveis de produção de petróleo (figura 11).



Figura 11 – Navio de lançamento de linhas. Fonte: Origin Energy.

- Navio de estimulação de poços de petróleo (*Well Stimulation Vessel*): Embarcação com capacidade de manobra similar ao supridor com planta de simulação instalada no convés principal (figura 12).



Figura 12 – Navio de estimulação de poços de petróleo. Fonte: Marine Group.

- Navio de pesquisa sísmica (*RV – Research Vessel*): Embarcação destinada ao levantamento sísmico de determinada região a ser explorada ou revisada (figura 13).



Figura 13 – Navio de pesquisa sísmica. Ilustração de Bruce A. Alderson.

Este trabalho de conclusão de curso tem como base de informações, coleta de dados e cálculos, embarcações de reboque e manuseio de âncoras (*AHTS*), mais

especificamente a embarcação Maersk Helper (figura 14) da empresa Maersk Supply Service.

No apêndice A temos as especificações técnicas desta embarcação.



Figura 14 – Maersk Helper. Fonte: Maersk Supply Service.

1.3 Embarcação destinada ao reboque e manuseio de âncoras (AHTS)

Como dito anteriormente, são embarcações destinadas ao reboque e ancoragem das plataformas. Devido a sua complexidade, o arranjo de convés destas embarcações é composto de equipamentos bastante especializados tais como: guinchos de reboque, guinchos de manuseio, pelicanos hidráulicos, guias (*fairleads*) hidráulicas, paiol de amarra (*chain locker*), limitadores no guardo cabo (*horse bar*), entre outros.

O reboque é a operação mais simples, consistindo basicamente da conexão de um cabo de reboque a uma engrenagem de reboque e esta a cabresteira da unidade rebocada.

As operações de manuseio de âncoras são mais complexas por envolverem a relação entre duas unidades independentes (rebocador e plataforma). O

posicionamento de âncoras no fundo do mar obedece a planejamento prévio levando em consideração o solo e limitações provocadas por linhas de produção (*bundle*), cabeça de poço, etc. Manusear uma âncora é posicioná-la no fundo do mar ou recuperá-la para inspeção, reposicionamento ou retirada definitiva (SILVEIRA, 2002).

1.4 Movimentos e forças básicas de uma embarcação

Uma estrutura flutuante está sujeita a forças do vento, das ondas e da correnteza, assim como forças e momentos gerados pelo sistema de propulsão da embarcação.

O SPD calcula as forças que os propulsores devem produzir, a fim de controlar o movimento da embarcação em três graus de liberdade: avanço (*surge*); deriva (*sway*) e compassou ou cabeceio (*yaw*), no plano horizontal (plano do mar), como mostra a figura 15.

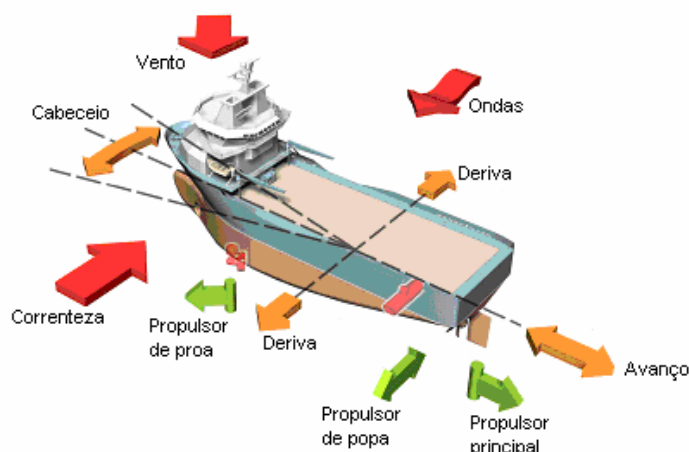


Figura 15– Movimentos e forças de uma embarcação. Fonte: Kongsberg Maritime AS modificado.

O navio também se move em três graus de liberdade verticais: caturro (*pitch*); balanço ou jogo (*roll*) e arfagem (*heave*), porém esses movimentos não são controlados pelo SPD, mas são medidos pelos sensores verticais de referência (VRS – *Vertical - reference Sensor*).

Em Yamamoto (2005) podemos encontrar resultados sobre controle de plataformas marítimas em apenas um grau de liberdade, a deriva (*sway*).

1.5 Objetivo do trabalho

O presente trabalho se concentra na estratégia de controle do SPD da embarcação Maersk Helper, utilizando a técnica conhecida como lógica nebulosa (*fuzzy control*) e a comparando com um controlador PID. Será avaliado desempenho de cada estratégia em manter a posição em dois graus de liberdade no plano, a deriva (*sway*) e avanço (*surge*).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo se propõe a apresentar as revisões bibliográficas sobre o sistema de posicionamento dinâmico, o controle proporcional integral derivativo (PID) e a lógica nebulosa (*fuzzy control*).

2.1 Sistema de Posicionamento Dinâmico (SPD)

O sistema de posicionamento dinâmico é uma técnica para manutenção automática da posição de uma embarcação flutuante dentro de uma tolerância, através de propulsores que geram forças capazes de contraporem às forças causadas por efeitos ambientais (vento, correnteza e ondulações) (MOROOKA, 2005).

De uma maneira geral, os elementos constituintes do SPD são apresentados na figura 16.

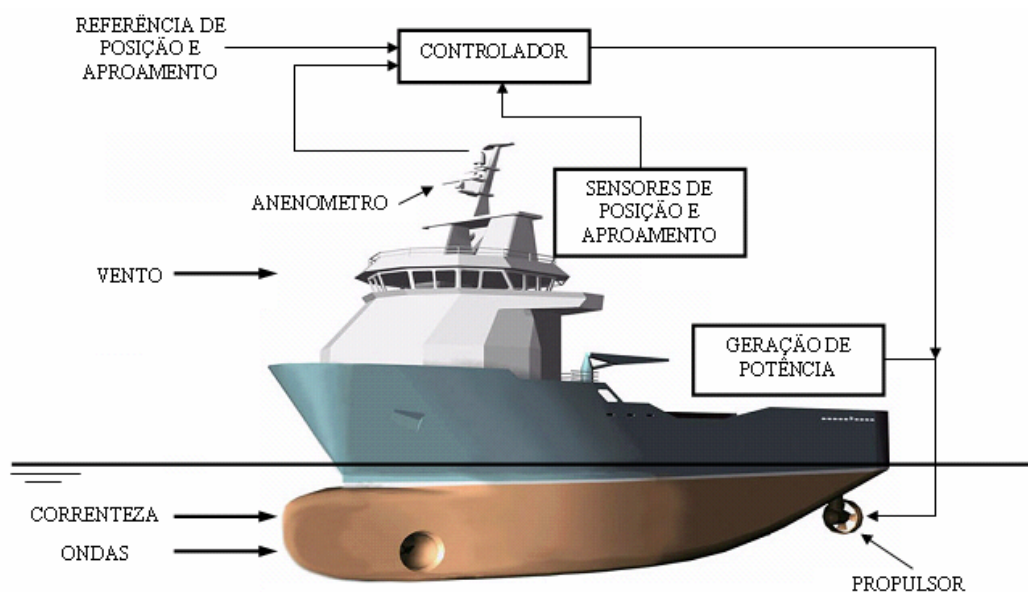


Figura 16 – Principais elementos de um sistema de posicionamento dinâmico. Fonte: Kongsberg Maritime AS. Modificado

Segundo Morooka (2005), O SPD deve manter a o aproamento e os parâmetros de posição, deriva (*sway*) e avanço (*surge*) de uma embarcação estáveis num limite de raio entre 2% a 6% da lâmina d'água, ou seja, para uma profundidade de 1000

metros, a embarcação não pode se afastar mais de 60 metros da posição de referência.

2.1.1 Estratégia de controle do SPD

O sistema de posicionamento dinâmico pode ser dividido em três partes:

2.1.1.1 Sistema de controle e sensores

Composto por computadores e softwares associados e sensores (API, 2005).

O controlador recebe o sinal do deslocamento e do ambiente, e com esses dados, calcula a força e momento requerido, atuando sobre os propulsores para manter o equilíbrio da unidade. O diagrama de blocos que representa esta seqüência é apresentado na figura 17 (SALVADOR, 2007)

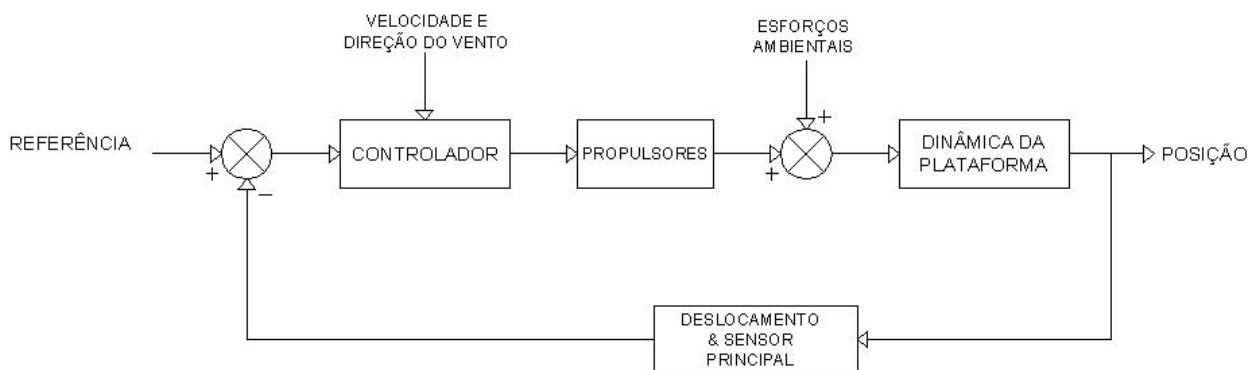


Figura 17 – Diagrama de blocos do SPD.

O sistema de sensores é responsável por medir o deslocamento da embarcação e os parâmetros ambientais, tais como o vento, a correnteza e as ondas.

Há vários tipos de sensores de deslocamento, entre eles o *Differential Global Positioning System* (DGPS), o *Acoustic Position Reference* (APR) e o FANBAEM (laser).

Os dois mais usados em embarcações que realizam apoio marítimo são o DGPS e o FANBAEM, já o APR é muito utilizado em plataformas e navios sonda.

O DGPS usa o sistema de navegação por satélites, o *Global Positioning System* (GPS), removendo seu erro de sinal baseado na leitura de um local fixo conhecido (uma estação em terra) e, em seguida, transmite para a embarcação o valor correto do sinal de GPS.

FANBAEM é um sistema de posição de referência por laser que controla ou auxilia a aproximação da embarcação em plataformas, navios sonda ou em outras embarcações.

O APR (*Acoustic Position-Reference System*) consiste de um emissor e um receptor submarino de ondas localizadas no casco da embarcação e acoplados a um processador com interface ao SPD, tal como mostrado na figura 18.

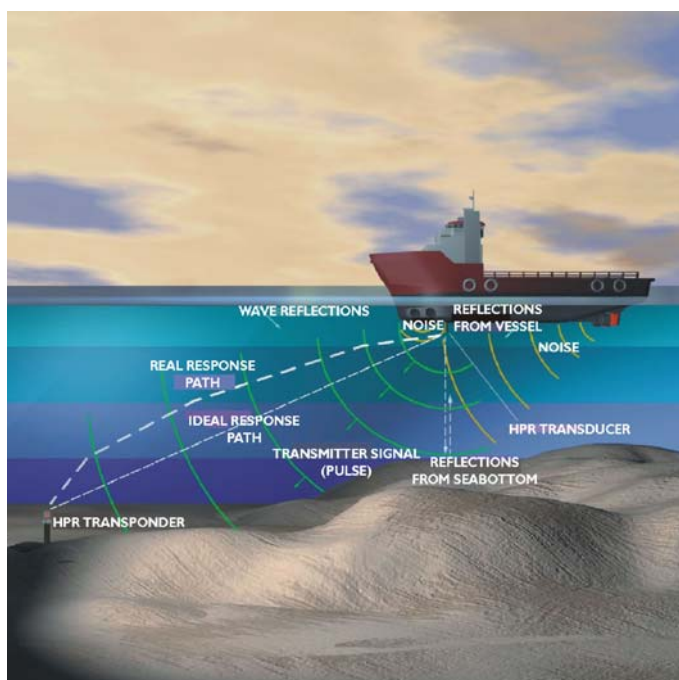


Figura 18 – Sinais acústicos abaixo do nível do mar. Fonte: Kongsberg Maritime SA.

2.1.1.2 Sistema de propulsores

Composto por propulsores e equipamentos auxiliares (API, 2005). Existem vários tipos de propulsores e não há nenhum que apresenta melhor desempenho para SPD (MORGAN, 1978), então o propulsor deve ser escolhido de acordo com a experiência do projetista.

2.1.1.3 Sistema de potência

É composto pelos motores primários e equipamentos auxiliares, painel de distribuição, geradores, entre outros (API, 2005). Um sistema de geração de energia elétrica é necessário para alimentação dos propulsores, podendo empregar corrente contínua ou corrente alternada, dependendo do tipo de motor (MOROOKA, 2005).

2.2 Controle Proporcional - Integral - Derivativo (PID)

Segundo Ogata (2005), o controle PID é uma técnica de controle clássica, onde o sinal de erro $e(t)$ é obtido da subtração entre o sinal de referência $ref(t)$ e o sinal de realimentação $r(t)$ (Equação 1). A figura 19 mostra o diagrama de blocos de um controlador PID.

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_I \cdot \int e(t).dt + K_D \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

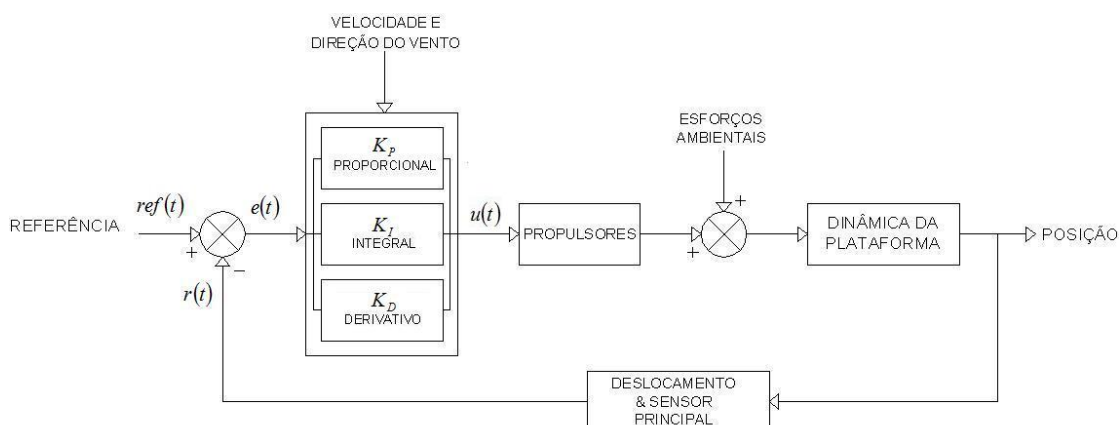


Figura 19 – Diagrama de blocos de um controlador PID.

A obtenção dos coeficientes K_p , K_I e K_D tem se mostrado muito difícil motivando o estudo de controladores utilizando a lógica nebulosa.

Segundo Simões (2007) um número considerável de controladores *fuzzy* estão sendo utilizados em aplicações operacionais, onde executam apenas algumas das funções de um controlador convencional. Tem sido estimado que, antes de 2010, cerca de 80% de todos os controladores serão embutidos com sistemas *fuzzy*

operacionais. A razão é que os micro controladores têm se tornado cada vez menores, mais poderosos, e fáceis de serem programados, com programas que executam funções *fuzzy* em muitas aplicações.

2.3 Lógica Nebulosa (*Fuzzy Control*)

A lógica nebulosa é uma ferramenta que foi desenvolvida por Zadeh (1965), a qual permite aproximar e formalizar a maneira como o conhecimento humano manipula informações imprecisas de forma aproximada. Desta forma, através do uso da lógica nebulosa é possível substituir o conhecimento determinístico e preciso sobre um dado processo qualquer, pelo conhecimento especialista sobre ele (INDELICATO, 1997).

2.3.1 Conjuntos nebulosos

Uma noção básica da teoria de conjuntos é a pertinência de um elemento x em um conjunto A , indicada pelo símbolo $\in$:

$$x \in A \quad (2)$$

Uma forma de se indicar essa pertinência pode ser através de uma função de pertinência $\mu_A(x)$, cujo valor indica se o elemento x pertence ou não ao conjunto A . Por exemplo, no seguinte caso, $\mu_A(x)$ é uma função bivalente (SIMÕES, 2007):

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & \text{se, } x \in A \\ 0, & \text{se, } x \notin A \end{cases} \quad (1)$$

Na teoria dos conjuntos nebulosos, o grau de pertinência poderá assumir valores quaisquer dentro do intervalo contínuo $[0,1]$. A figura 20 mostra um exemplo para os casos exato e nebuloso.

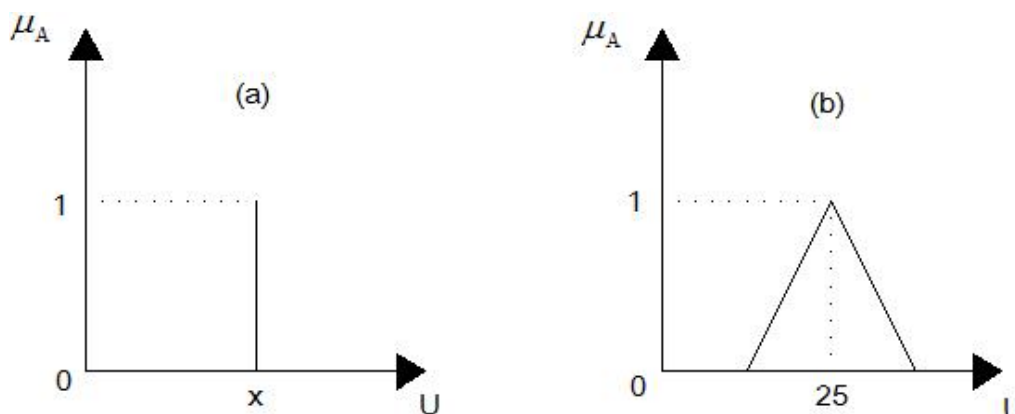


Figura 20 – Funções de pertinência: (a) Caso exato e (b) Caso nebuloso. Fonte: SALVADOR (2007).

2.3.2 Controle nebuloso

Segundo Zadeh (1965), o controlador nebuloso utiliza-se de regras lógicas no algoritmo de controle, com a intenção de descrever em uma rotina, a experiência humana, intuição e heurística empregadas no controle de um processo. Os controladores convencionais, tais como PID, utilizam-se de algoritmos de controle descritos analiticamente através de equações algébricas ou diferenciais do modelo matemático do processo a ser controlado.

Um controlador *fuzzy* é composto dos seguintes blocos funcionais:

- Interface de fuzzificação;
- Base de conhecimento;
- Lógica de tomada de decisões;
- Interface de defuzzificação.

A figura 21 mostra a estrutura de um controlador *fuzzy*.

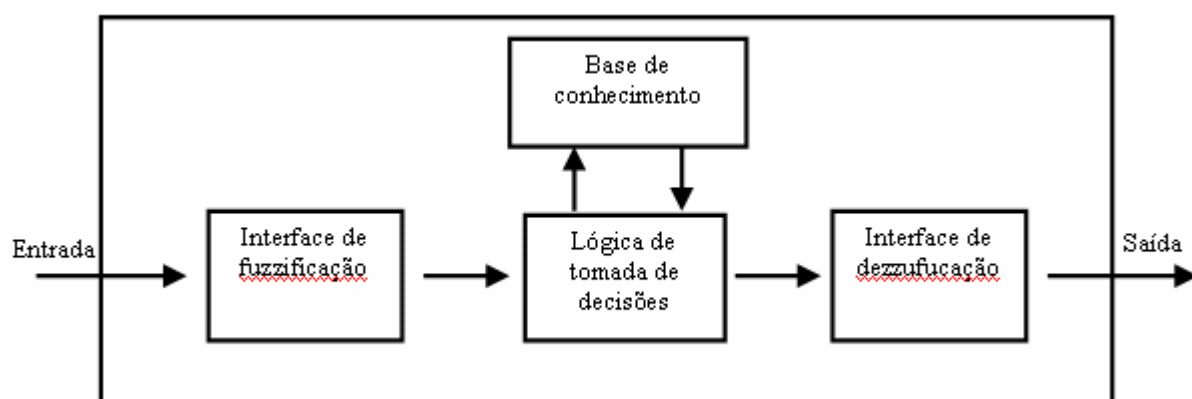


Figura 21 – Estrutura de um controlador nebuloso.

Essa estrutura de controlador representa a transformação que ocorre do domínio do mundo real, que usa números reais, para o domínio *fuzzy*, que usa números *fuzzy*. Nessa transformação um conjunto de inferências *fuzzy* é usado para as tomadas de decisões, e por fim há uma transformação inversa do domínio *fuzzy* para o domínio do mundo real, para que ocorra o acoplamento entre saída do algoritmo *fuzzy* e as variáveis de atuação (SIMÕES, 2007).

2.3.3 Funções da interface de fuzzificação

Os valores discretos (não-*fuzzy*) das variáveis de entrada geralmente são provenientes de sensores das grandezas físicas ou de dispositivos de entrada computadorizados. A interface de fuzzificação usa funções de pertinência em um intervalo $[0,1]$ que pode estar associado a rótulos lingüísticos (SIMÕES, 2007).

2.3.3.1 Variável lingüística

Uma variável nebulosa é uma grandeza cujos valores são nomes de conjuntos nebulosos, associados às faixas específicas dos valores desta grandeza. Assumindo uma grandeza física qualquer, por exemplo, posição, este poderia ser representado por variável nebulosa definida por valores imprecisos tais como posição perto, origem e longe (SALVADOR, 2007).

Uma variável lingüística é caracterizada por uma quintupla $(x, T(x), U, G, M)$, na qual x é o nome da variável, $T(x)$ é o conjunto de termos de x , que é o conjunto de

nomes e valores lingüísticos de x , com cada valor sendo um número nebuloso definido no universo U . G é uma regra sintática para a geração dos nomes de x , e M é uma regra semântica para a associação de cada valor com seu significado, também conhecida como função de pertinência (CAVALCANTE, 1994).

A figura 22 representa graficamente um exemplo de variável lingüística.

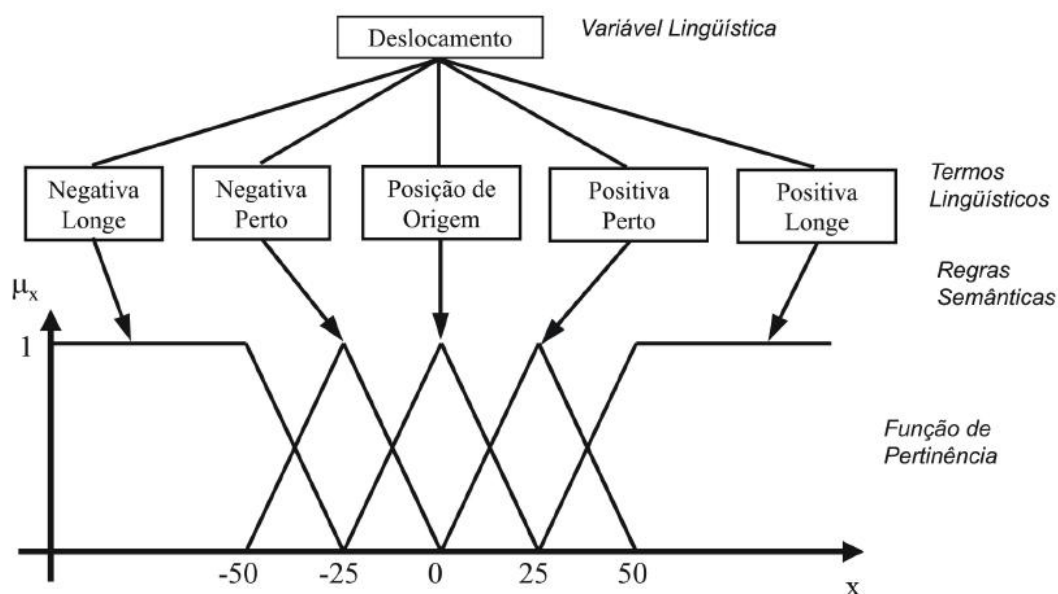


Figura 22 – Exemplo de variável lingüística (YAMAMOTO, 2005).

2.3.4 Base de conhecimento

A base de conhecimento representa o modelo do sistema a ser controlado. Consistindo de uma base de dados (funções de pertinência lingüísticas) e uma base de regras *fuzzy* lingüísticas. A base de dados fornece as definições numéricas necessárias às funções de pertinência usadas no conjunto de regras *fuzzy*. A base de regras caracteriza os objetivos de controle e a estratégia de controle utilizadas por especialistas na área, por meio de um conjunto de regras de controle em geral lingüísticas. (SIMÕES, 2007).

O controlador nebuloso é composto por uma base de regras do tipo mostrada na equação 4.

$$Re_j : Se < w = D_j > e < y = E_j > então < z = F_j > \quad (2)$$

Onde:

Re_j = Regra do controlador nebuloso;

D_j = Primeiro termo lingüístico;

e = Condição de associação dos termos lingüísticos;

E_j = Segundo termo lingüístico;

F_j = Resposta da associação dos termos lingüísticos.

2.3.5 Lógica de tomada de decisões

A lógica de tomada de decisões, incorporada na estrutura de inferência da base de regras, usa implicações *fuzzy* para simular tomadas de decisão humanas. Ela gera ações de controle – conseqüentes – inferidas a partir de um conjunto de condições de entrada – antecedentes.

2.3.6 Funções da interface de defuzzificação

A defuzzificação consiste em obter-se um único valor discreto, utilizável numa ação de controle concreta no mundo real, a partir de valores *fuzzy* de saída obtidos. Este único valor discreto representa um compromisso entre os diferentes valores *fuzzy* contidos na saída do controlador (SIMÕES, 2007).

Existem diversas técnicas de defuzzificação, em Indelicato (1997) poderão ser encontradas algumas destas técnicas de defuzzificação.

Para este trabalho de graduação a técnica de defuzzificação empregada foi o método Centro-da-Área (C-o-A), que é frequentemente chamado de método do Centro-de-Gravidade, pois ele calcula o centro da área formada pela união dos termos da saída do controlador nebuloso.

Por exemplo, utilizando a variável lingüística Empuxo, com dois termos lingüísticos não-nulos, NM_x com valor de pertinência de 0,8 e EO_x com valor de pertinência de

3 MODELAGEM MATEMÁTICA

Neste capítulo será mostrada a modelagem matemática de uma embarcação AHTS, do carregamento ambiental e do sistema de propulsão.

3.1 Equação do movimento

O movimento de uma embarcação pode ser modelado como um sistema massa, amortecedor e mola. Podemos utilizar as equações 6 e 7 para modelar o movimento da embarcação de apoio marítimo (PEREZ, 2006);

$$M.\ddot{x} + b_D(w).\dot{x} + c_D(w).x = F_D + E_x \quad (6)$$

$$M.\ddot{y} + b_A(w).\dot{y} + c_A(w).y = F_A + E_y \quad (7)$$

Onde:

x = deslocamento na direção de deriva (*sway*);

y = deslocamento na direção de avanço (*surge*);

M = massa do navio na direção de deriva (*sway*);

M = massa do navio na direção de avanço (*surge*);

$b_D(w)$ = coeficiente de amortecimento para a direção de deriva;

$b_A(w)$ = coeficiente de amortecimento para a direção de avanço;

$c_D(w)$ = coeficiente de resistência para a direção de deriva;

$c_A(w)$ = coeficiente de resistência para a direção de avanço;

F_D = resultante da força ambiental na direção de deriva (*sway*);

F_A = resultante da força ambiental na direção de avanço (*surge*);

E_x = resultante da força de empuxo na direção de deriva (*sway*);

E_y = resultante da força de empuxo na direção de avanço (*surge*).

Os coeficientes que são dependentes de w têm dupla variação, uma dependendo da altura das ondas e outra dependendo da velocidade da embarcação em relação à referência. Porém, para facilitar a formulação do equacionamento, os coeficientes foram considerados constantes em cada intervalo entre cálculos do controlador nebuloso, variando apenas após cada cálculo. Mais detalhes sobre esses coeficientes podem ser encontrados em Yamamoto (2005).

3.2 Forças ambientais

As embarcações de apoio marítimo estão expostas a diversos fenômenos naturais tais como ações dos ventos, das ondulações e das correntes. Portanto devemos estudar cada ação para efetuar o controle adequado de seu posicionamento.

3.2.1 Correnteza

As forças causadas pela correnteza podem ser obtidas através de experimentos ou cálculos. Essa modelagem pode ser feita em grandes reservatórios de água ou túneis de vento para prever a força da correnteza. Para isso devem ser representados os *risers*, propulsores e o restante de acessórios (SALVADOR, 2007).

No caso do cálculo das forças provenientes de correntes marítimas, adotaremos as equações destinadas a embarcações marítimas semi-submersíveis. (API, 2005).

$$F_{cx} = C_{SS} (C_D \cdot A_c + C_D \cdot A_f) V_{cx}^2 \quad (8)$$

$$F_{cy} = C_{SS} (C_D \cdot A_c + C_D \cdot A_f) V_{cy}^2 \quad (9)$$

Onde:

F_{cx} = força de correnteza na direção $\bar{x}$ (N);

F_{cy} = força de correnteza na direção $\bar{y}$ (N);

C_{ss} = coeficiente de força de correnteza para cascos semi-submersíveis

$$C_{ss} = 515,62(N.seg^2 / m^4);$$

C_D = coeficiente de arrasto (obtido na figura 24);

A_c = somatório de toda a área circular submersa (m^2);

A_f = somatório de toda a área plana submersa (m^2);

V_{cx} = velocidade da correnteza na direção $\bar{x}$ (m/s);

V_{cy} = velocidade da correnteza na direção $\bar{y}$ (m/s).

A figura 24 mostra o gráfico da variação do coeficiente de arrasto com as dimensões da embarcação para as equações 8 e 9.

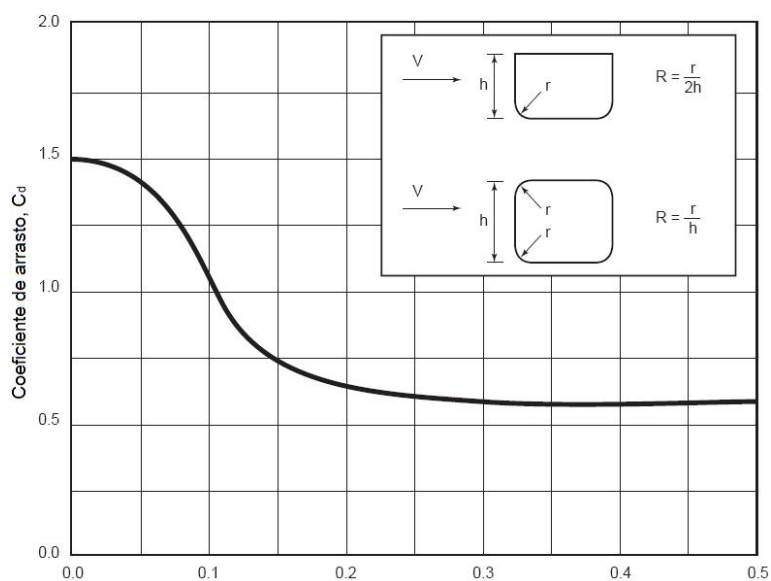


Figura 24 – Coeficiente de arrasto para partes contendo superfícies planas. Fonte: API.

3.2.2 Ventos

As forças eólicas podem ser obtidas através da utilização de equações de forma similar às forças de correnteza (API, 2005).

$$F_{wx} = C_w \sum (C_s \cdot C_h \cdot A) \cdot V_{wx}^2 \quad (10)$$

$$F_{wy} = C_w \sum (C_s \cdot C_h \cdot A) \cdot V_{wy}^2 \quad (11)$$

Onde:

F_{wx} = força do vento na direção $\vec{x}$ (N);

F_{wy} = força do vento na direção $\vec{y}$ (N);

C_w = coeficiente de força de vento ($C_w = 0,615 N \cdot s^2 / m^4$);

C_s = coeficiente de forma (tabela 1);

C_h = coeficiente de altura (tabela 2);

A = área vertical projetada exposta ao vento (m^2);

V_{wx} = velocidade do vento na direção $\vec{x}$ (m/s);

V_{wy} = velocidade do vento na direção $\vec{y}$ (m/s).

Devem ser consideradas todas as áreas projetadas, tais como guindastes, colunas, torres, entre outros. O coeficiente de forma C_s das equações 10 e 11 é dado na tabela 1, e o coeficiente de altura C_h das equações 10 e 11 é dado na tabela 2.

Tabela 1 – Coeficiente de forma

Área exposta	C_s
Superfícies cilíndricas	0,50
Casco (superfície acima do nível do mar)	1,00
Convés	1,00

Estruturas Isoladas (gruas, vigas, ...)	1,50
Áreas abaixo do convés (superfície lisa)	1,00
Áreas abaixo do convés (vigas expostas)	1,30
Rig derrick	1,25

Fonte: API.

Tabela 2 – Coeficiente de altura (para um minuto de vento)

Altura do centróide da área em relação ao nível do mar		
Intervalo em metros		C_h
0,0	15,3	1
15,3	30,5	1,18
30,5	46,0	1,31
46,0	61,1	1,4
61,1	76,0	1,47

Fonte: API.

3.3 Propulsores

Para prevenir falhas mecânicas dos propulsores por fadiga, os controladores não são permitidos variar o valor da força de propulsão continuamente, somente em intervalos de 20 segundos.

Os valores da potência dos propulsores da embarcação podem ser vistos no Apêndice A.

Dessa forma definimos as forças ambientais como sendo o somatório da força do vento com a força da correnteza. Um esquema simplificado das equações do controlador pode ser visto na figura 25.

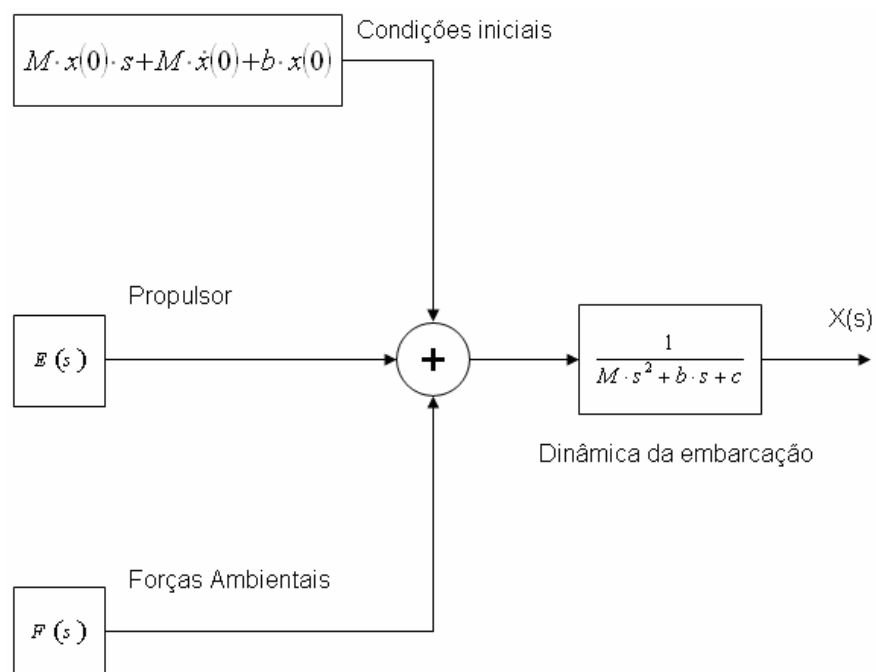


Figura 25 – Esquema simplificado das equações do controlador.

A forma como foi feito o controlador *fuzzy* e o controlador PID são mostrados no Apêndice B.

4 REGRAS NEBULOSAS DO CONTROLADOR

O posicionamento dinâmico de uma embarcação consiste em manter os parâmetros de posição, deriva (*sway*) e avanço (*surge*) estáveis. Neste capítulo serão mostradas as variáveis lingüísticas e as regras de fuzzificação do controlador nebuloso adotado neste trabalho de graduação.

4.1 Variáveis lingüísticas

Neste trabalho de graduação utilizamos cinco variáveis lingüísticas: posição (x), velocidade ($\dot{x}$), empuxo (E), vento (V_w) e correnteza (C).

4.1.1 Variável lingüística posição

$$x = (\text{Posição}, \{NL, NP, PO, PP, PL\}, x \in \mathfrak{R}, M_p) \quad (12)$$

Onde o nome da variável lingüística é Posição, seu universo de discurso é o conjunto dos números reais (correspondente à posição da embarcação em metros), e possui cinco termos lingüísticos associados:

NL = Posição Negativa – Longe;

NP = Posição Negativa – Perto;

PO = Posição de Origem;

PP = Posição Positiva – Perto;

PL = Posição Positiva – Longe.

A função de pertinência M_p associada a cada termo lingüístico está definida na figura 26.

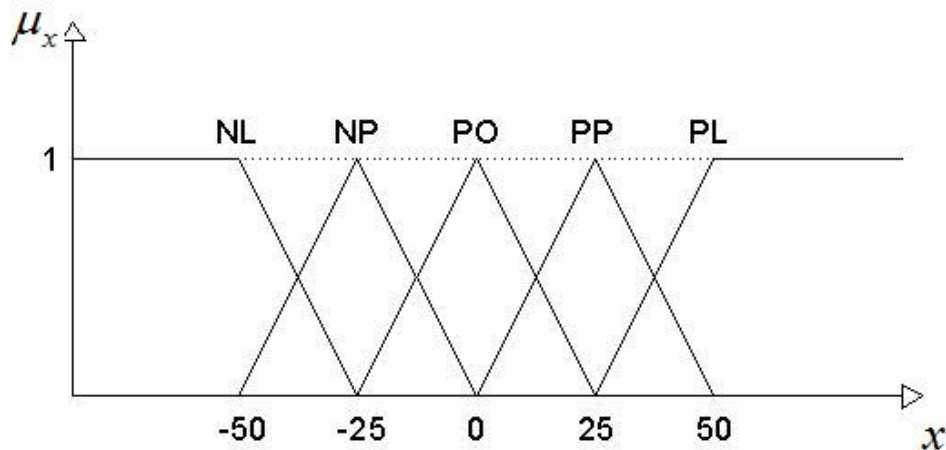


Figura 26 – Função de pertinência da posição

A variável lingüística Posição é válida para os dois graus de liberdade estudados no presente trabalho.

4.1.2 Variável lingüística velocidade

$$\dot{x} = (\text{Velocidade}, \{NA, NB, VZ, PB, PA\}, \dot{x} \in \mathbb{R}, M_v) \quad (13)$$

Onde o nome da variável lingüística é Velocidade, seu universo de discurso é o conjunto dos números reais (correspondente à velocidade da embarcação em metros por segundo), e possui cinco termos lingüísticos associados:

NA = Velocidade Negativa – Alta;

NB = Velocidade Negativa – Baixa;

VZ = Velocidade Zero;

PB = Velocidade Positiva – Baixa;

PA = Velocidade Positiva – Alta.

A função de pertinência M_v associada a cada termo lingüístico está definida na figura 27.

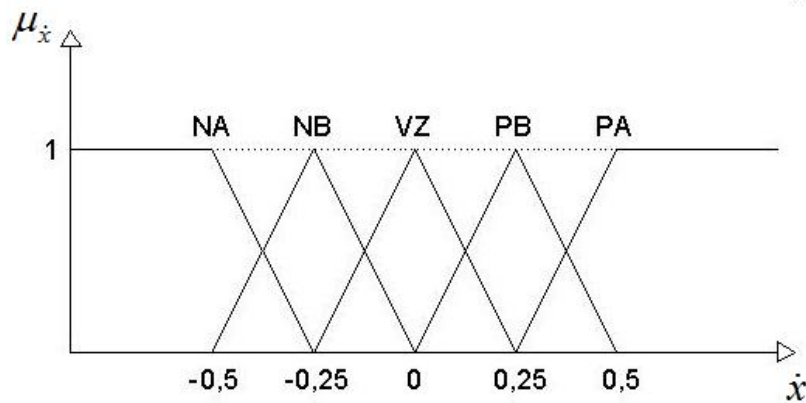


Figura 27 – Função de pertinência da velocidade

A variável lingüística Velocidade é válida para os dois graus de liberdade estudados no presente trabalho.

4.1.3 Variável lingüística empuxo

$$E = (\text{Empuxo}, \{NF, NM, EO, PM, PF\}, E \in \mathbb{R} | -100\% \leq E \leq 100\%, M_E) \quad (14)$$

Onde o nome da variável lingüística é Empuxo, seu universo de discurso compreende o intervalo de -100% a 100%, e possui cinco termos lingüísticos associados:

NF = Empuxo Negativo – Forte;

NM = Empuxo Negativo – Médio;

EO = Empuxo Zero;

PM = Empuxo Positivo – Médio;

PF = Empuxo Positivo – Forte.

A função de pertinência M_E associada a cada termo lingüístico está definida na figura 28.

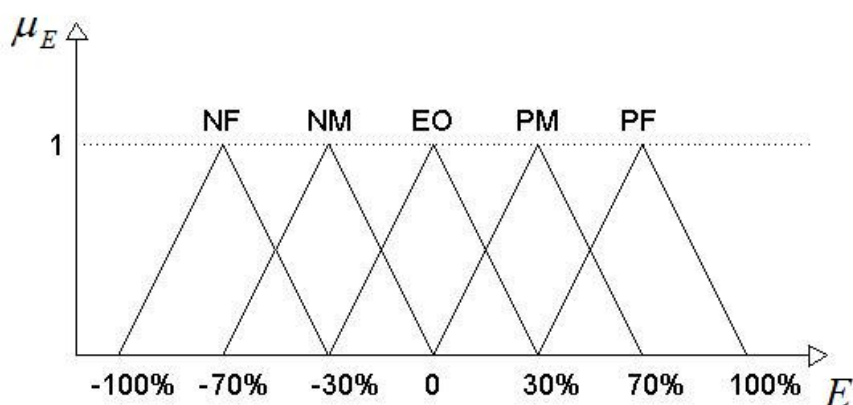


Figura 28 – Função de pertinência do empuxo

A variável lingüística Empuxo é válida para os dois graus de liberdade estudados no presente trabalho.

4.1.4 Variável lingüística correnteza

$$C = (\text{Correnteza}, \{NA, NB, VZ, PB, PA\}, C \in \mathfrak{R}, M_C) \quad (15)$$

Onde o nome da variável lingüística é Correnteza, seu universo de discurso é o conjunto dos números reais e possui cinco termos lingüísticos associados:

NA = Velocidade Negativa – Alta;

NB = Velocidade Negativa – Baixa;

VZ = Velocidade Zero;

PB = Velocidade Positiva – Baixa;

PA = Velocidade Positiva – Alta.

A função de pertinência M_C associada a cada termo lingüístico está definida na figura 29.

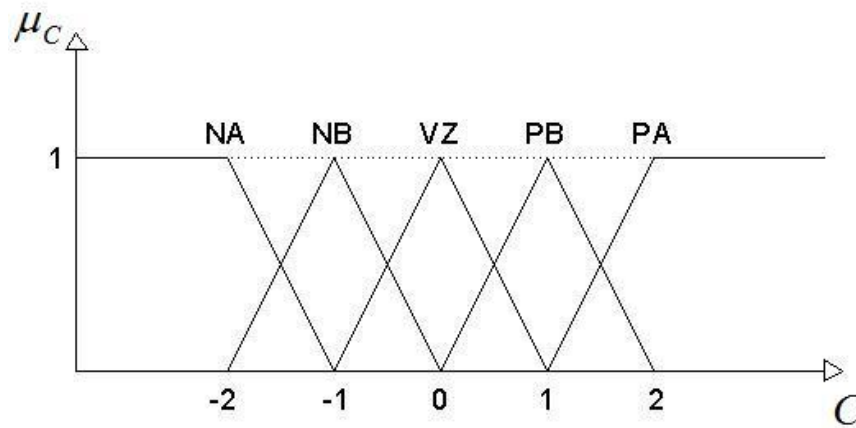


Figura 29 – Função de pertinência da correnteza

A variável lingüística Correnteza é válida para os dois graus de liberdade estudados no presente trabalho.

4.1.5 Variável lingüística vento

$$V_w = (\text{Vento}, \{NA, NB, VZ, PB, PA\}, V_w \in \mathfrak{R}, M_{V_w}) \quad (16)$$

Onde o nome da variável lingüística é Vento, seu universo de discurso é o conjunto dos números reais e possui cinco termos lingüísticos associados:

NA = Altura Negativa – Alta na direção negativa;

NB = Altura Negativa – Baixa na direção negativa;

VZ = Altura Zero;

PB = Altura Positiva – Baixa na direção negativa;

PA = Altura Positiva – Alta na direção negativa.

A função de pertinência M_{V_w} associada a cada termo lingüístico está definida na figura 30.

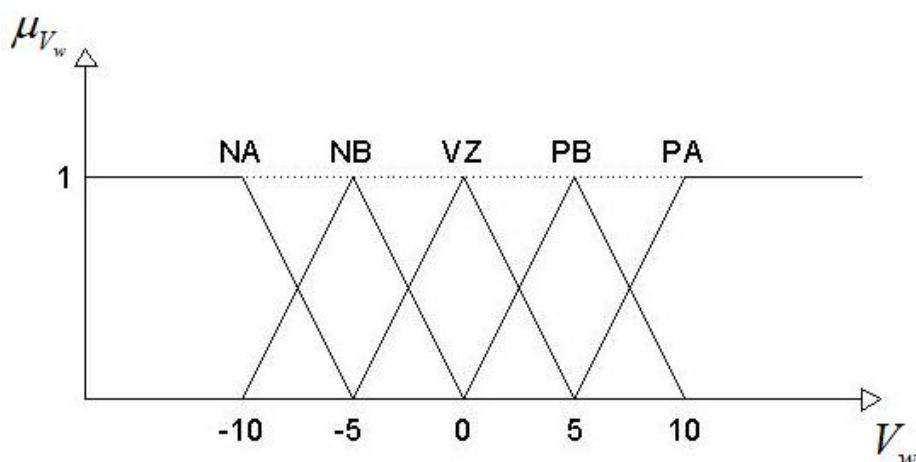


Figura 30 – Função de pertinência do vento

A variável lingüística Vento é válida para os dois graus de liberdade estudados no presente trabalho.

4.2 Base de regras e inferências

Na base de regras estão armazenadas as respostas para cada combinação de termos lingüísticos. Neste trabalho estão armazenadas vinte e cinco regras que valerão para a direção de deriva (*sway*) e para a direção de avanço (*surge*). Todas as regras são avaliadas e as respostas, união de inferências, são enviadas para a defuzzificação.

4.2.1 Primeira abordagem do controlador nebuloso

Numa primeira abordagem do controlador nebuloso, a variável lingüística x corresponderá à posição da embarcação, a variável $\dot{x}$ corresponderá à velocidade da embarcação e a variável E será o empuxo necessário para contrabalancear as forças ambientais. As leituras das vinte e cinco regras utilizadas neste primeiro controlador nebuloso estão listadas na tabela 3.

Tabela 3 – Regras do controlador nebuloso (posição).

		$\dot{x}$				
		NA	NB	VZ	PB	PA
x	NL	NF	NM	NM	NM	NM
	NP	NM	NM	NM	EO	EO
	PO	NM	EO	EO	EO	PM
	PP	EO	EO	PM	PM	PM
	PL	PM	PM	PM	PM	PF

O operador de implicação *AND* fará com que a variável de saída da regra tenha o menor valor de pertinência dentro os valores de entrada, ou seja, para o termo NL_x , da variável Posição x , com pertinência 75% e o termo VZ_x , da variável Velocidade $\dot{x}$, com pertinência 20%, a saída seria NM_x com pertinência 20%.

4.2.2 Segunda abordagem do controlador nebuloso

Nesta segunda abordagem do controlador nebuloso, a variável lingüística C corresponderá à velocidade da correnteza, a variável V_w corresponderá à velocidade do vento e a variável E será o empuxo necessário para contrabalancear as forças ambientais. As leituras das vinte e cinco regras utilizadas neste segundo controlador nebuloso estão listadas na tabela 4.

Tabela 4 – Regras do controlador nebuloso (forças ambientais).

		V_w				
		NA	NB	VZ	PB	PA
C	NA	NF	NM	NM	NM	NM
	NB	NM	NM	NM	EO	EO
	VZ	NM	EO	EO	EO	PM
	PB	EO	EO	PM	PM	PM
	PA	PM	PM	PM	PM	PF

As mesmas regras utilizadas para a direção de deriva (*sway*) serão utilizadas para a direção de avanço (*surge*).

5 RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos nas simulações das ações ambientais para os controladores (nebuloso e PID).

Foram coletados dados da velocidade e direção do vento e da correnteza num intervalo de 5 horas (tempo suficiente para analisar a eficiência do controlador) através da embarcação Maersk Helper (figura 15) da Maersk Supply Service.

Cada simulação possui valores de vento e correnteza de acordo com a escala beaufort. A escala beaufort quantifica a intensidade dos ventos, tendo em conta a sua velocidade e os efeitos resultantes das ventanias no mar e em terra, foi desenvolvida por Francis Beaufort. A escala é mostrada na figura 31.

Grau	Designação	Nós	Km/h	m/s	Aspecto do mar
0	<i>Calmaria</i>	<1	<2	<1	Espelhado
1	<i>Bafagem</i>	1 a 3	2 a 6	1 a 2	Pequenas rugas na superfície do mar
2	<i>Aragem</i>	4 a 6	7 a 11	2 a 3	Ligeira ondulação sem rebentação
3	<i>Fraco</i>	7 a 10	13 a 19	4 a 5	Ondulação até 60 cm, com alguns carneiros
4	<i>Moderado</i>	11 a 16	20 a 30	6 a 8	Ondulação até 1,5 m, carneiros frequentes
5	<i>Fresco</i>	17 a 21	31 a 39	9 a 11	Ondulação até 2,5 m, muitos carneiros
6	<i>Muito fresco</i>	22 a 27	40 a 50	11 a 14	Ondas grandes até 3,5 m; borrifos
7	<i>Forte</i>	28 a 33	51 a 61	14 a 17	Mar revolto até 4,5 m com espuma e borrifos
8	<i>Muito forte</i>	34 a 40	63 a 74	17 a 21	Mar revolto até 7,5 m com rebentação e faixas de espuma
9	<i>Duro</i>	41 a 47	76 a 87	21 a 24	Mar revolto até 9 m; borrifos afetam visibilidade
10	<i>Muito duro</i>	48 a 55	89 a 102	25 a 28	Mar revolto até 12 m; superfície do mar branca
11	<i>Tempestade</i>	56 a 63	104 a 117	29 a 32	Mar revolto até 14 m; pequenos navios sobem nas vagas
12	<i>Furacão</i>	>64	>119	>33	Mar todo de espuma; visibilidade nula

Figura 31 – Escala Beaufort.

Para cada simulação foram comparados um controlador PID e um controlador nebuloso.

5.1 Simulação 1 (Condições constantes)

Para esta simulação inicial, foram adotados valores constantes de vento e correnteza (velocidade igual a 2 m/s e ângulo de incidência de 45° tanto para x como para y), figura 32

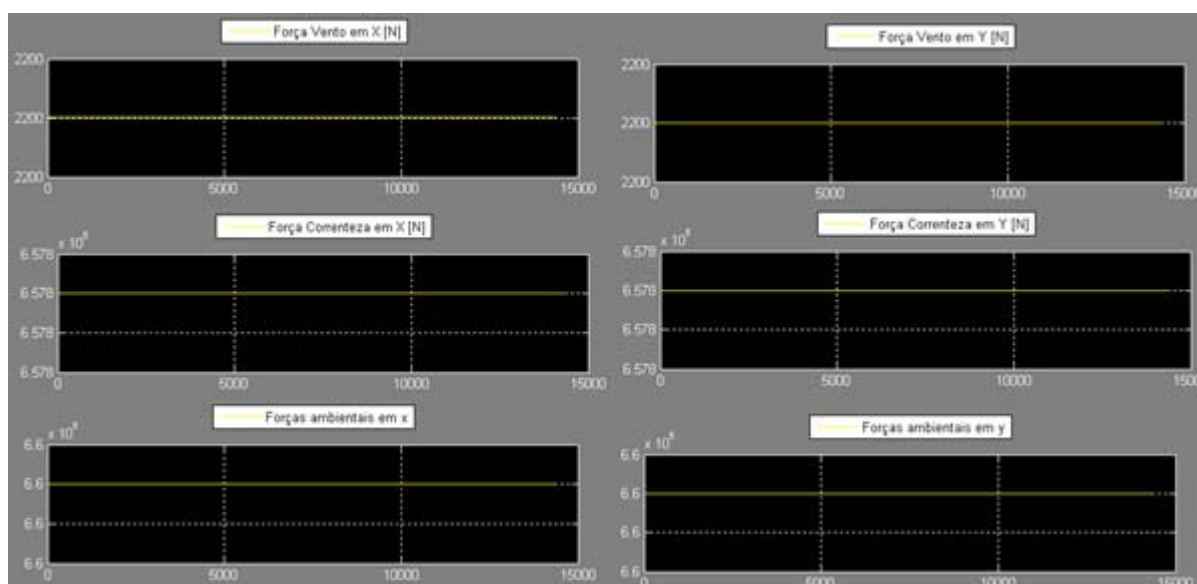


Figura 32 – Condições ambientais para a primeira simulação.

Como era esperado, ambas as forças de vento como correnteza, assim como as forças resultantes desse carregamento foram constantes e iguais a $6,6 \times 10^5$ N. Através dessa primeira simulação, nota-se que a força da correnteza tem maior influência na embarcação do que a força do vento.

Na Figura 33 pode-se visualizar a velocidade do navio na direção de avanço (y) e deriva (x).

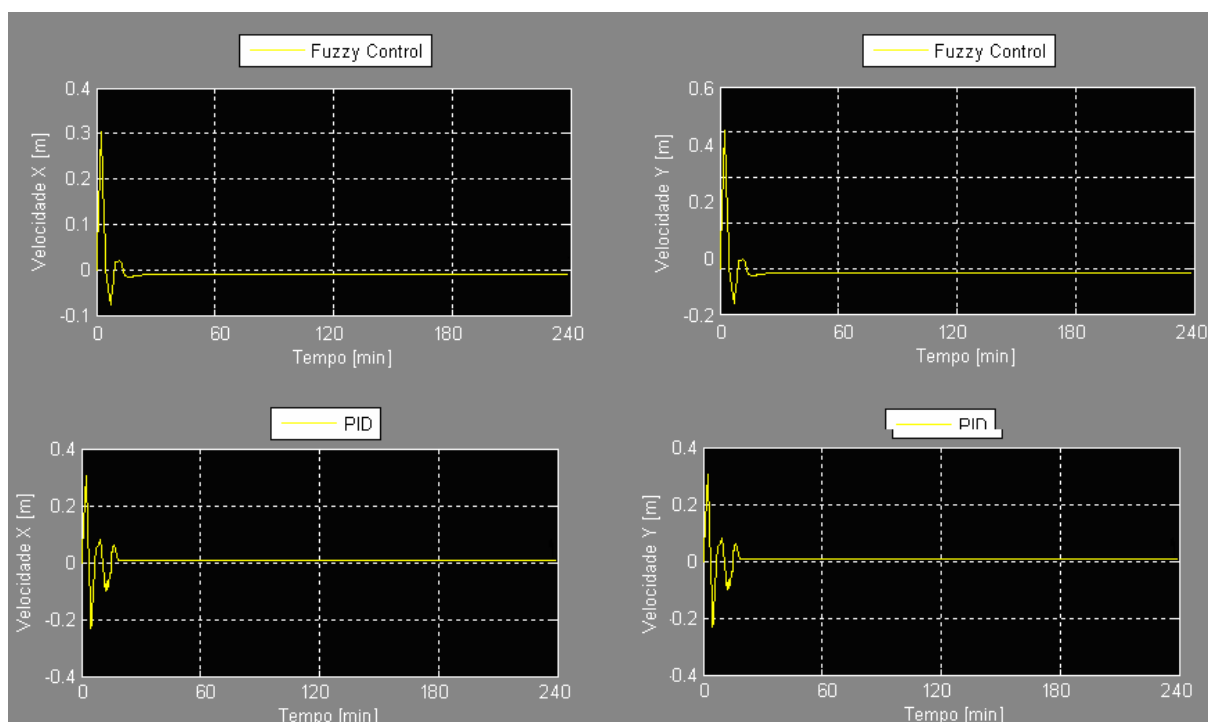


Figura 33 – Velocidade da embarcação para a primeira simulação.

Através da Figura 33 percebe-se que tanto o controlador *fuzzy* como o PID obtiveram um excelente resultado, com valores de velocidade baixa.

Na Figura 34 observa-se o deslocamento do navio nas duas direções de trabalho (avanço e deriva).

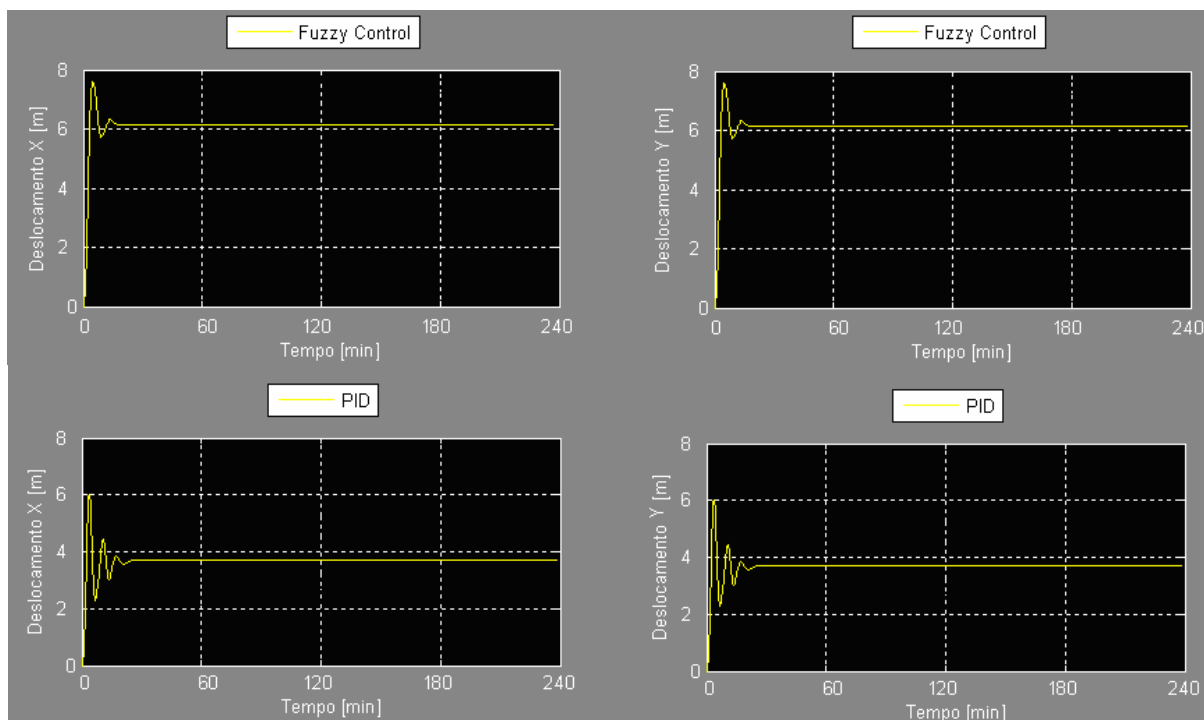


Figura 34 – Deslocamento da embarcação para a primeira simulação.

Devido ao fato da primeira simulação ter valores de vento e correnteza constantes, as respostas de cada controlador é a mesma para cada direção. Percebe-se que o controlador nebuloso consegue manter o navio em um raio de aproximadamente 6 metros, enquanto o controlador PID o manteve em um raio de aproximadamente 4 metros.

5.2 Simulação 2 (Beaufort 1)

Os dados dessa simulação foram coletados no dia 20/04/2009 de 23h54min as 03h54min com o vento variando entre 2,0 m/s e 3,0m/s de velocidade e a direção de 156,8° a 180,7°. Já a correnteza variou de 0,6m/s a 1,0m/s de velocidade e 114,9° a 132,2° de direção.

A força do vento, da correnteza e a resultante para cada direção pode ser vista na Figura 35.

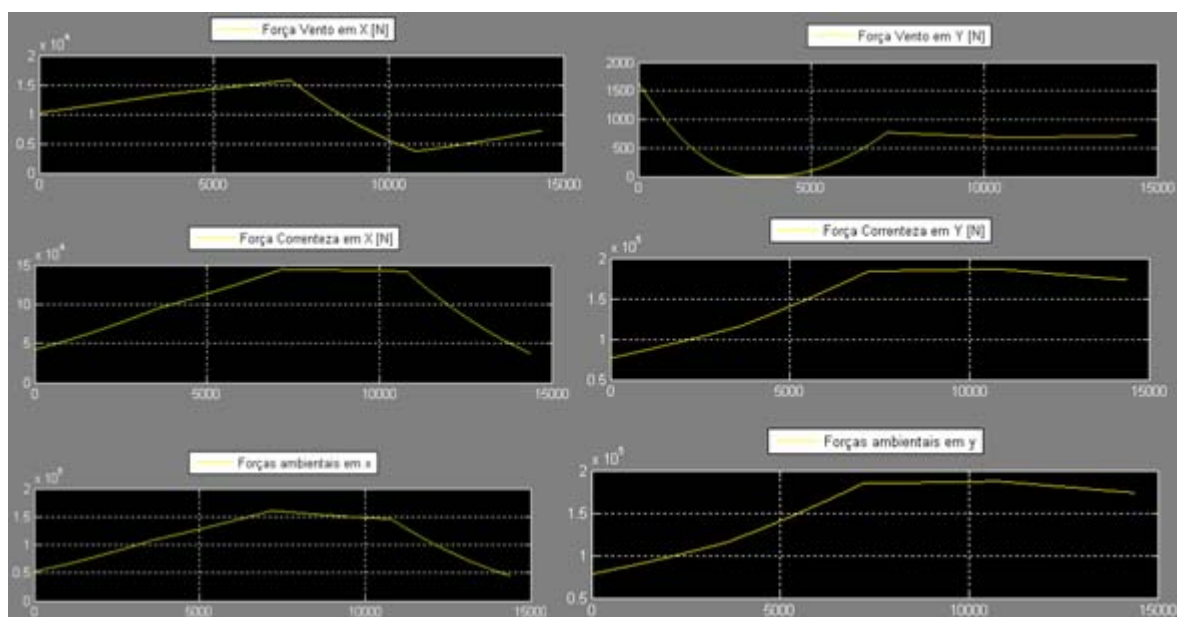


Figura 35 - Condições ambientais para a segunda simulação.

Através da figura 35 percebe-se que as resultantes das forças são parecidas, ou seja, em x variou-se entre $0,5 \times 10^5$ a 2×10^5 N e em y variou-se entre $0,7 \times 10^5$ a 2×10^5 N. Na figura 36 visualiza-se o comportamento da velocidade do navio.

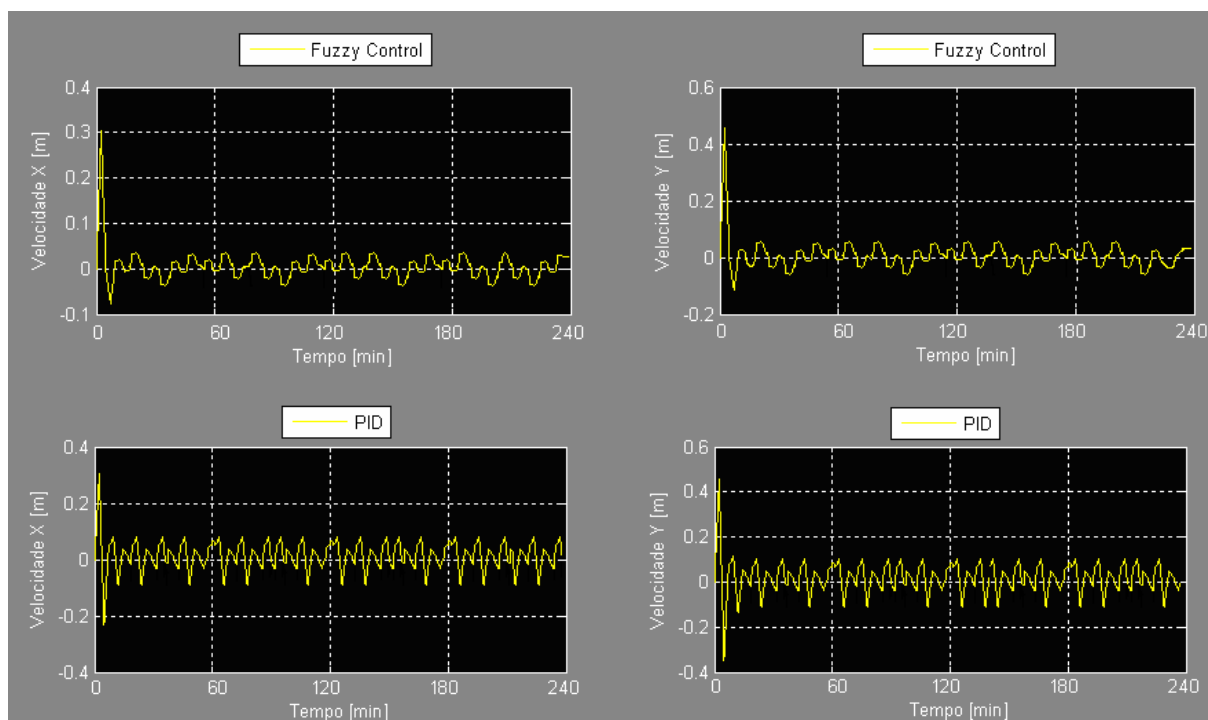


Figura 36 - Velocidade da embarcação para a segunda simulação.

Através da figura 36 nota-se que a embarcação teve comportamento parecido nas duas direções, isso pode ser explicado devido às condições ambientais parecidas tanto em x como em y. Na figura 37 pode-se analisar o deslocamento do navio em cada direção.

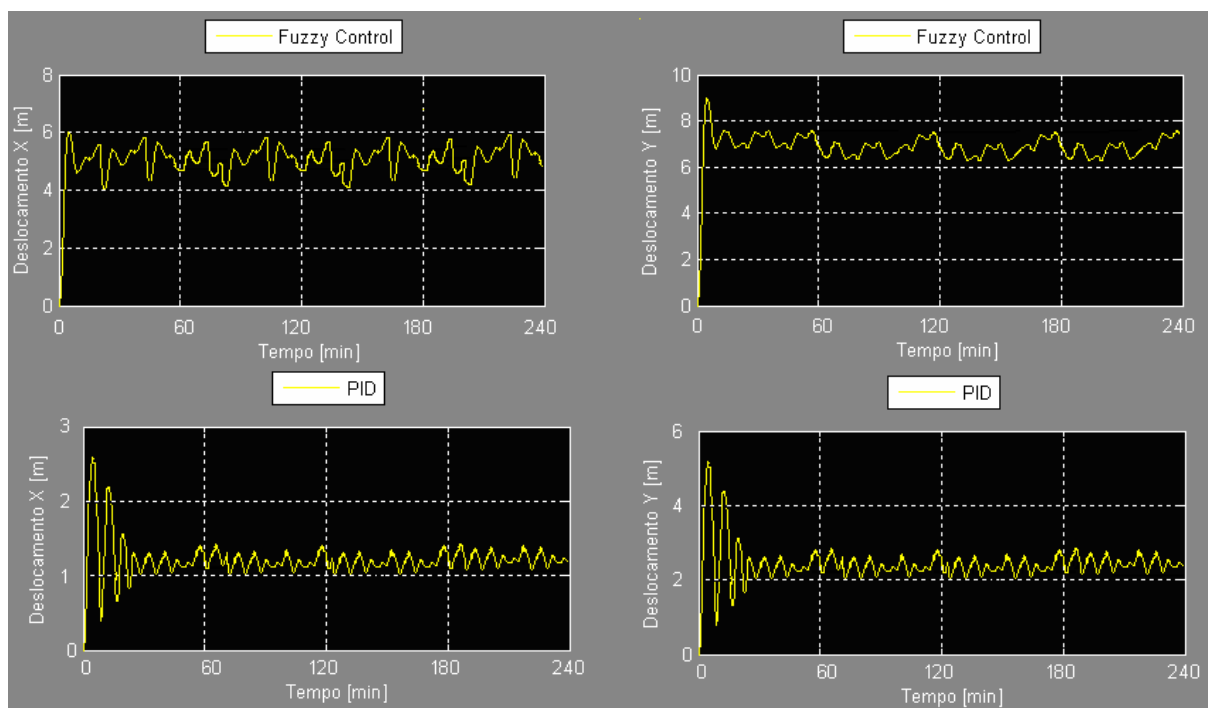


Figura 37 - Deslocamento da embarcação para a segunda simulação.

A figura 37 mostra que os dois controladores mantiveram a embarcação em um raio de deslocamento excelente, com o controlador fuzzy obtendo maior variação comparando com o PID. Percebe-se também que o controlador PID demora mais tempo para estabilizar o navio do que o controlador nebuloso.

5.3 Simulação 3 (Beaufort 2)

Foram coletados os dados no dia 10/04/2009, no intervalo de horário que começou às 11h58min e foi até as 15h58min. Com relação ao vento, sua velocidade variou entre 3,2 m/s até 3,8 m/s com direção entre 291,9° a 308,6° e a correnteza variou entre 2,2 m/s até 2,9 m/s de velocidade e 9,2° e 22,3° de direção.

As forças encontradas para o vento e para a correnteza, assim como a resultante das mesmas podem ser vistas na figura 38.

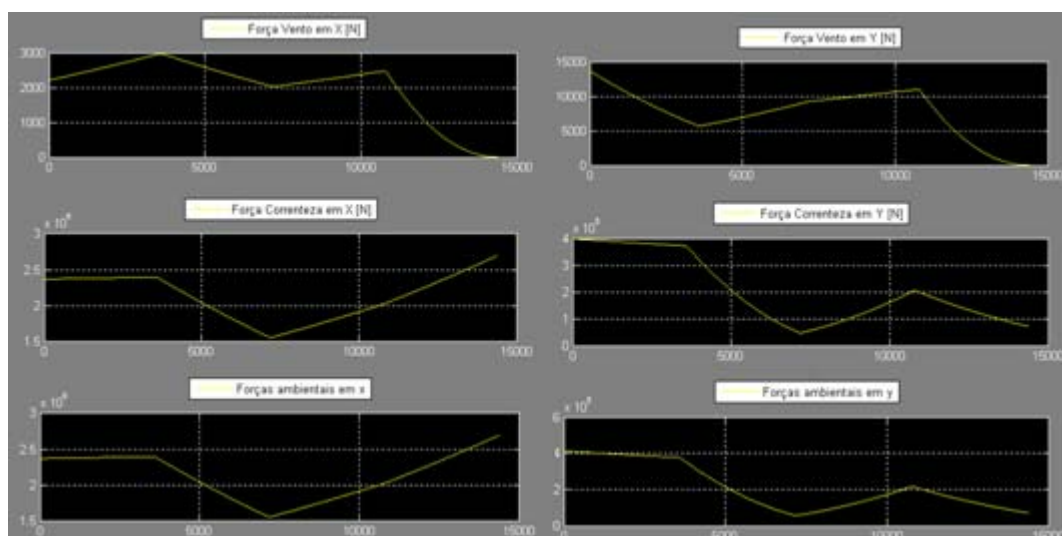


Figura 38 - Condições ambientais para a terceira simulação.

Pode-se visualizar na figura 38 que as forças ambientais foram maiores na direção x (variou entre 1.0×10^6 a 2.0×10^6 N) do que na direção y (variou entre 0.5×10^5 a 4.0×10^5 N).

As respostas dos controladores para a velocidade da embarcação pode ser vista na figura 39.

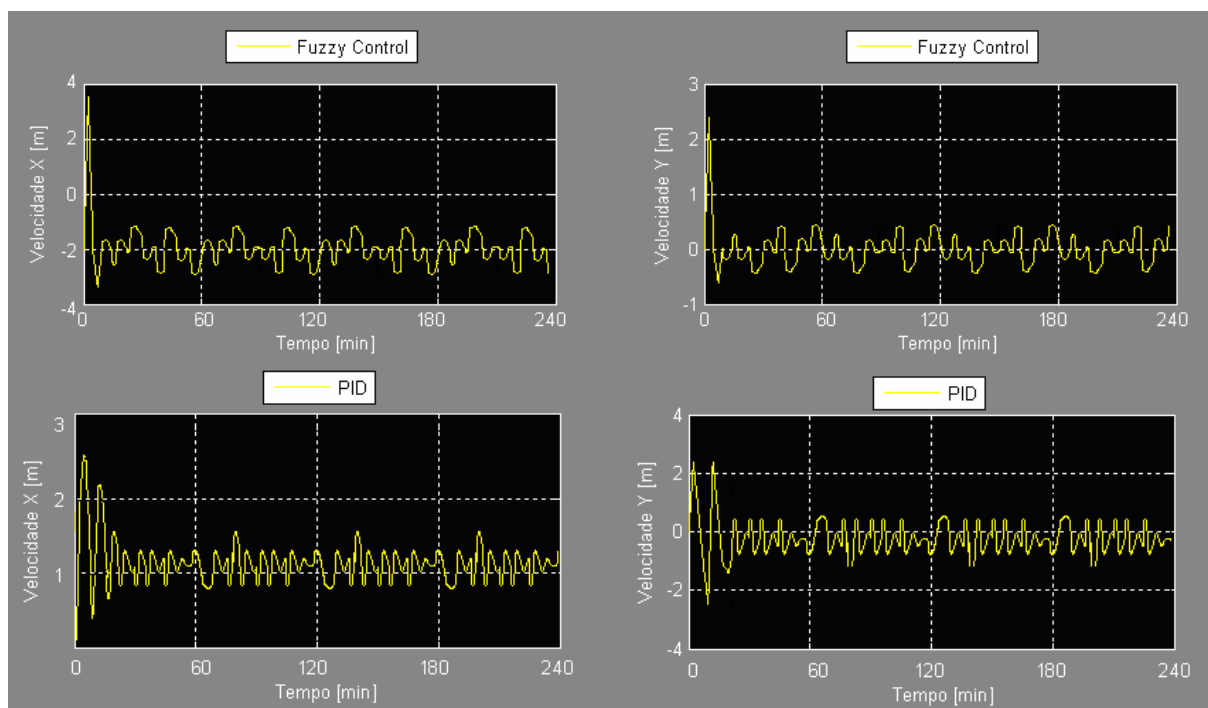


Figura 39 - Velocidade da embarcação para a terceira simulação.

Como era esperada a velocidade do navio obteve maior variação na direção x para os dois controladores. A figura 40 mostra o deslocamento sofrido pelo carregamento ambiental.

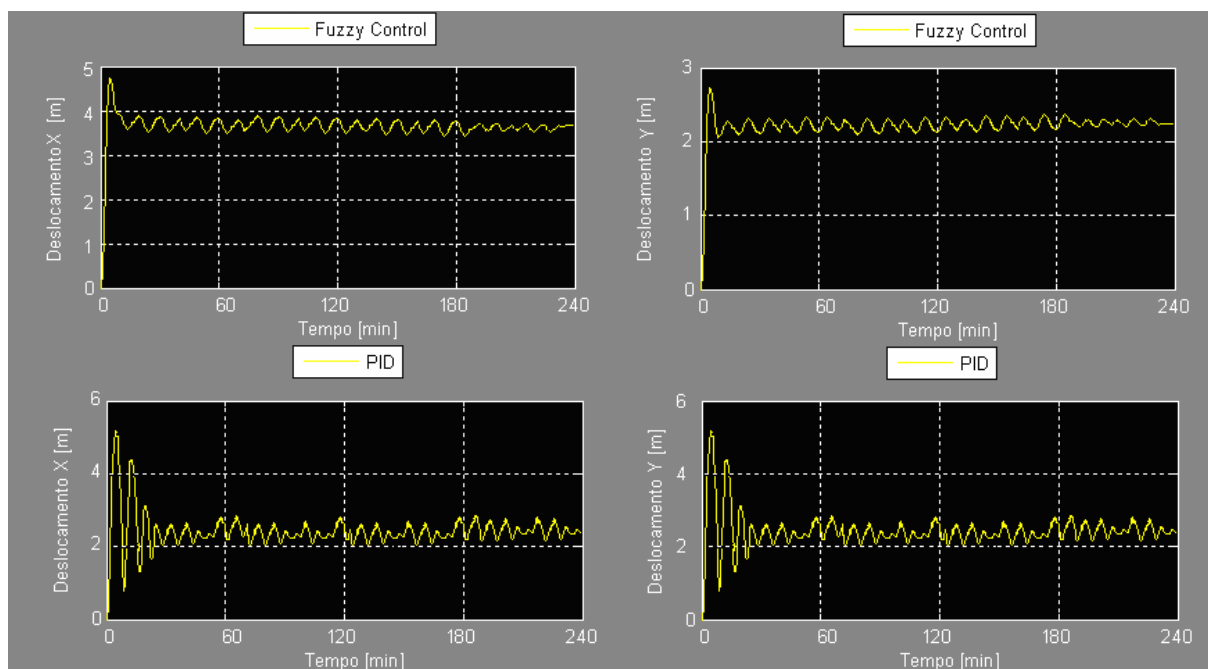


Figura 40 - Deslocamento da embarcação para a terceira simulação.

Os dois controladores mantiveram o navio em um raio de deslocamento aceitável. O controlador *fuzzy* obteve uma resposta mais rápida que o PID.

5.4 Simulação 4 (Beaufort 3)

Os dados dessa simulação foram coletados no dia 09/04/2009 de 12h30min as 16h30min com o vento variando entre 5,0 m/s e 6,7m/s de velocidade e a direção de 194,4° a 206,1°. Já a correnteza variou de 2,0m/s a 2,1m/s de velocidade e 4,8° a 5,6° de direção.

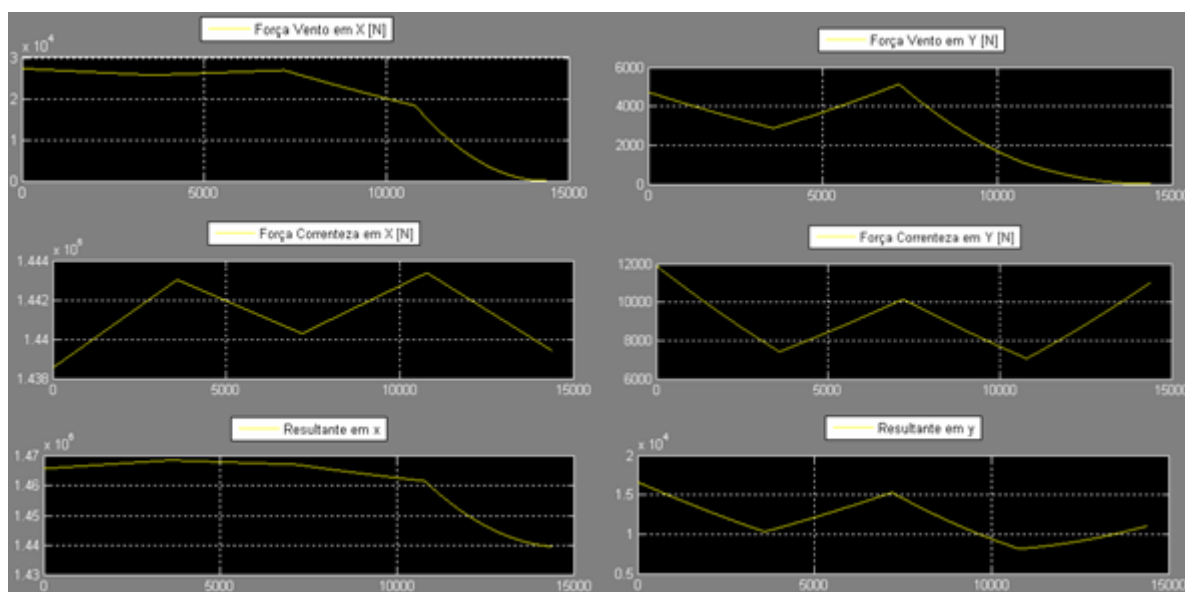


Figura 41 - Condições ambientais para a quarta simulação.

Através da figura 41 percebe-se que a resultante da força em x (direção de deriva) é maior que em y (direção de avanço), ou seja, em x variou-se entre 1.43×10^6 a 1.47×10^6 N e em y variou-se entre 0.5×10^4 a 2×10^4 N. Na figura 42 visualiza-se o comportamento da velocidade do navio.

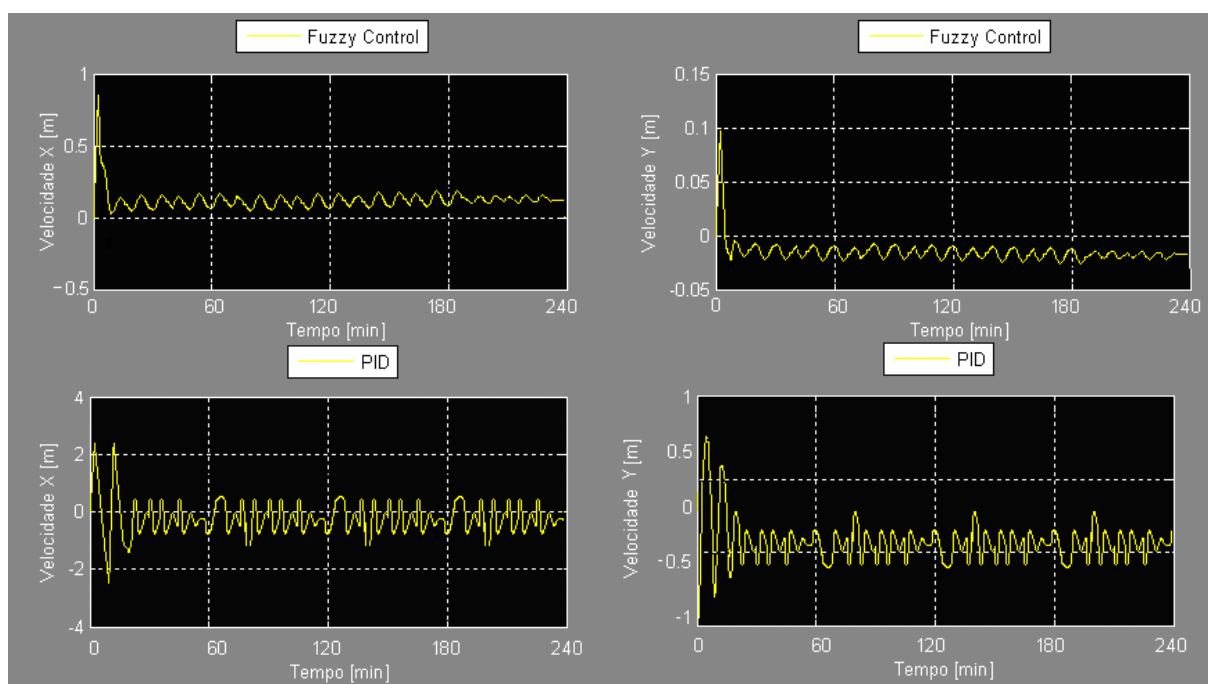


Figura 42 - Velocidade da embarcação para a quarta simulação.

Como era esperada a velocidade da embarcação obteve maior variação na direção x para os dois controladores. A figura 40 mostra o deslocamento sofrido pela resultante das forças de vento e correnteza.

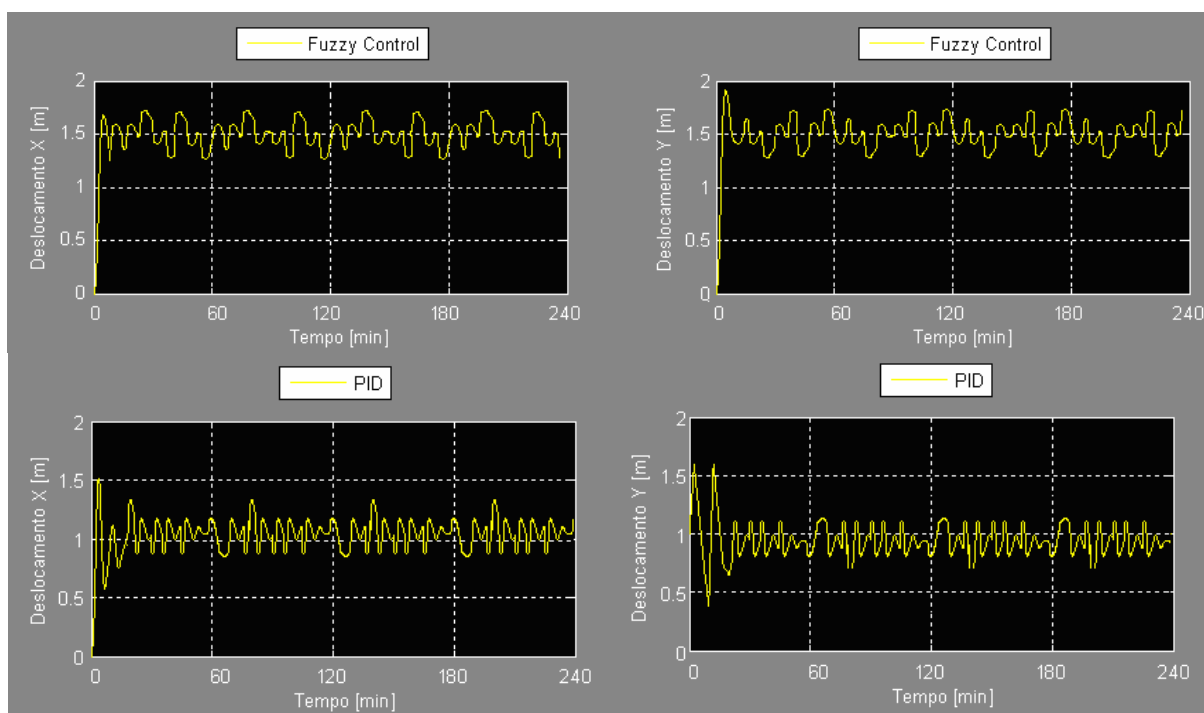


Figura 43 - Deslocamento da embarcação para a quarta simulação.

Os dois controladores mantiveram o navio em um raio de deslocamento aceitável. Os controladores *fuzzy* e PID obtiveram tempo de respostas similares.

5.5 Simulação 5 (Beaufort 5)

Dados coletados no dia 08/04/2009, de 12h01min até 16h01min com vento variando entre 4,2 m/s a 9,5 m/s de velocidade e 229,3° a 254,2° de direção e a correnteza variando entre 2,1 m/s a 2,2 m/s de velocidade e 56,4° a 57,1° de direção.

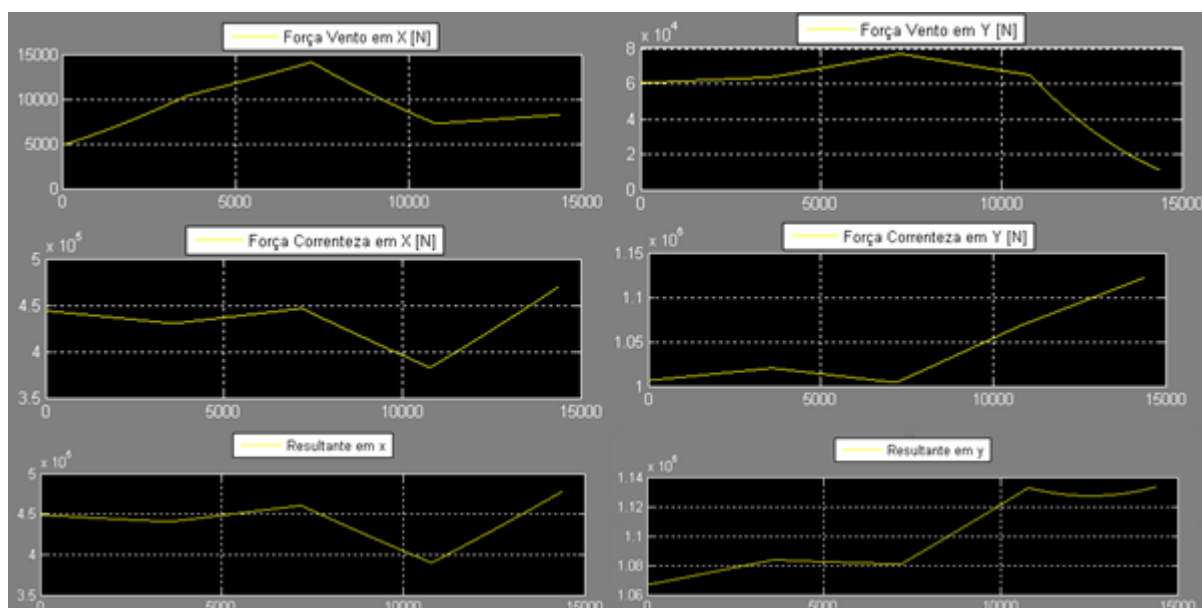


Figura 44 - Condições ambientais para a quinta simulação.

Pode-se visualizar na figura 45 que as forças ambientais foram maiores na direção y (variou entre 1.6×10^6 a 1.14×10^6 N) do que na direção x (variou entre 3.5×10^5 a 5.0×10^5 N).

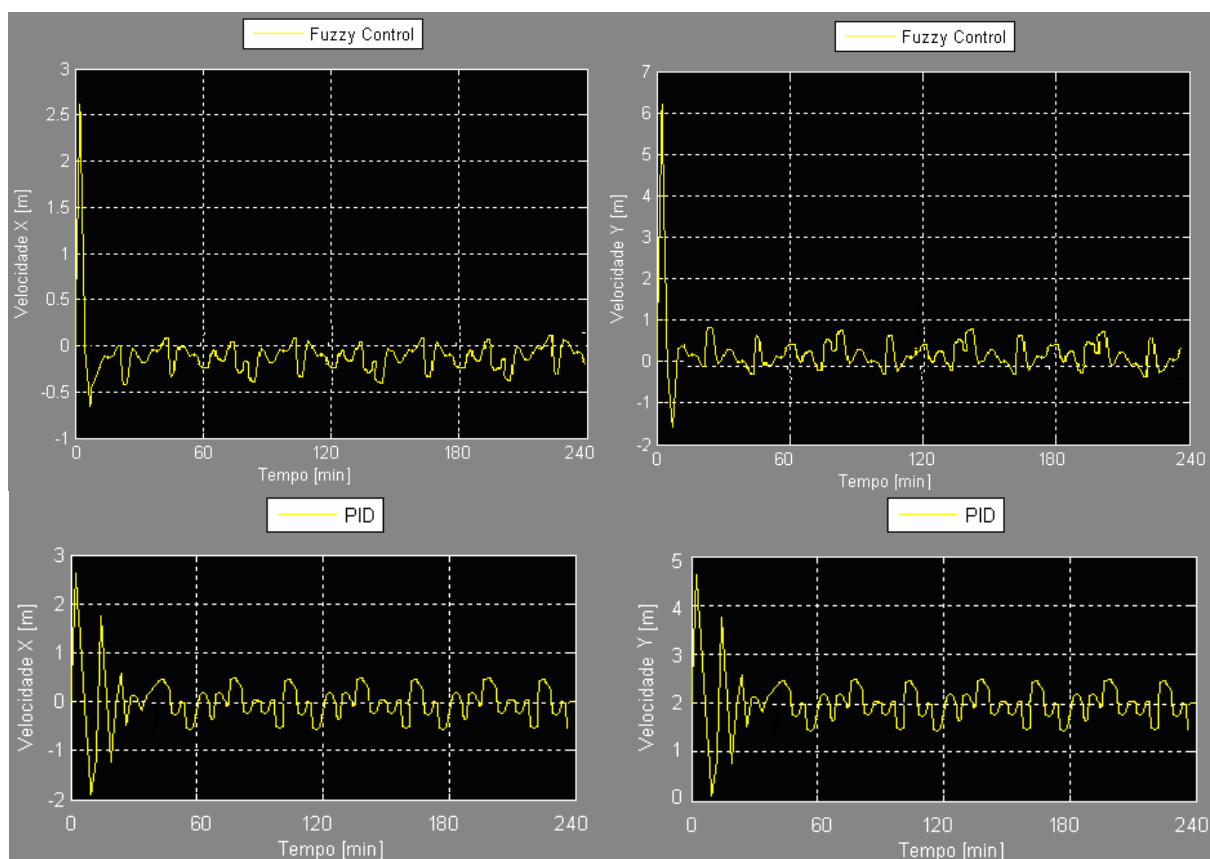


Figura 45 - Velocidade da embarcação para a quinta simulação.

Como era esperada a velocidade da embarcação obteve maior variação na direção y para os dois controladores. A figura 46 mostra o deslocamento sofrido pela resultante das forças de vento e correnteza.

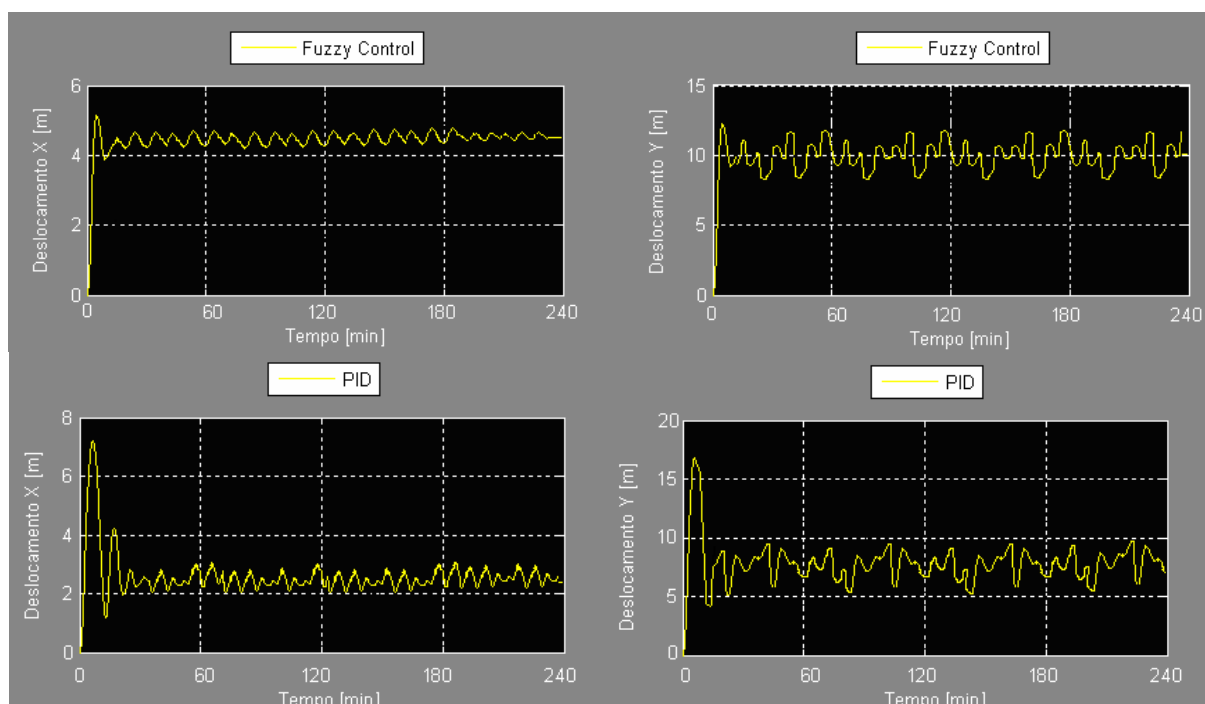


Figura 46 - Deslocamento da embarcação para a quinta simulação.

Nota-se na figura 46 um grande raio de deslocamento na direção y para os dois controladores. Porém apesar dos mesmos estabilizarem longe da posição de referência, eles variam sua posição em um raio de deslocamento aceitável (aproximadamente 5 metros).

5.6 Simulação 6 (Beaufort 6)

Foram coletados os dados no dia 21/04/2009, no intervalo de horário que começou às 11h59min e foi até as 15h58min. Com relação ao vento, sua velocidade variou entre 4,4 m/s até 9,2 m/s com direção entre $141,3^\circ$ a $188,2^\circ$ e a correnteza variou entre 0,7 m/s até 1,1 m/s de velocidade e $113,0^\circ$ e $118,4^\circ$ de direção.

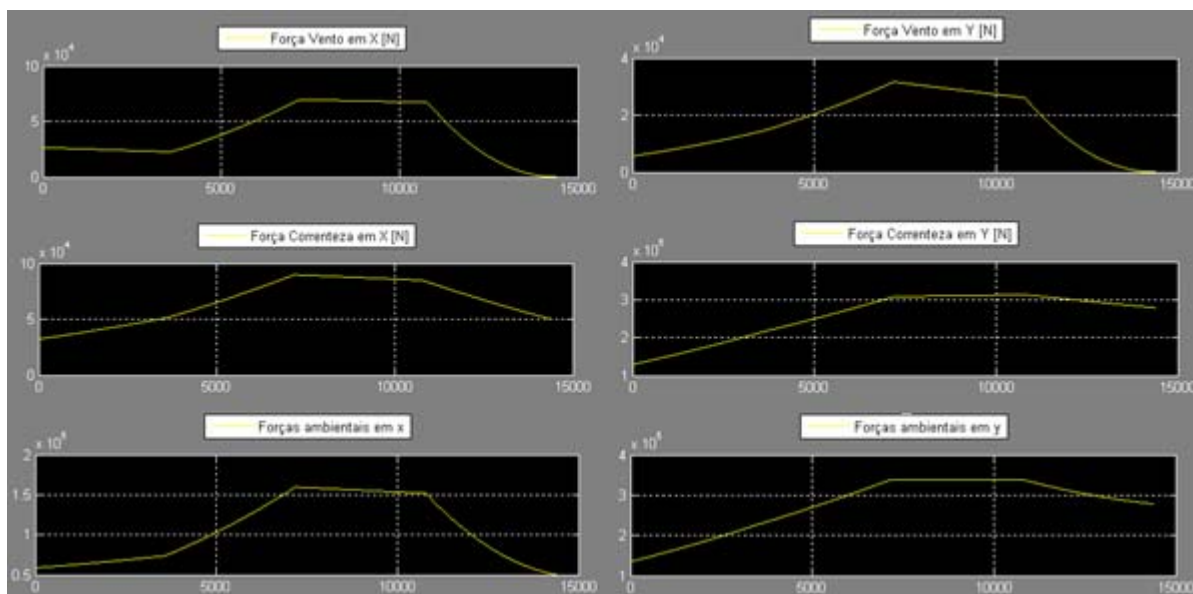


Figura 47 - Condições ambientais para a sexta simulação.

Através da figura 47 percebe-se que as resultantes das forças são parecidas, ou seja, em x variou-se entre 0.5×10^5 a 2×10^5 N e em y variou-se entre 1.0×10^5 a 4×10^5 N. Na figura 48 visualiza-se o comportamento da velocidade do navio.

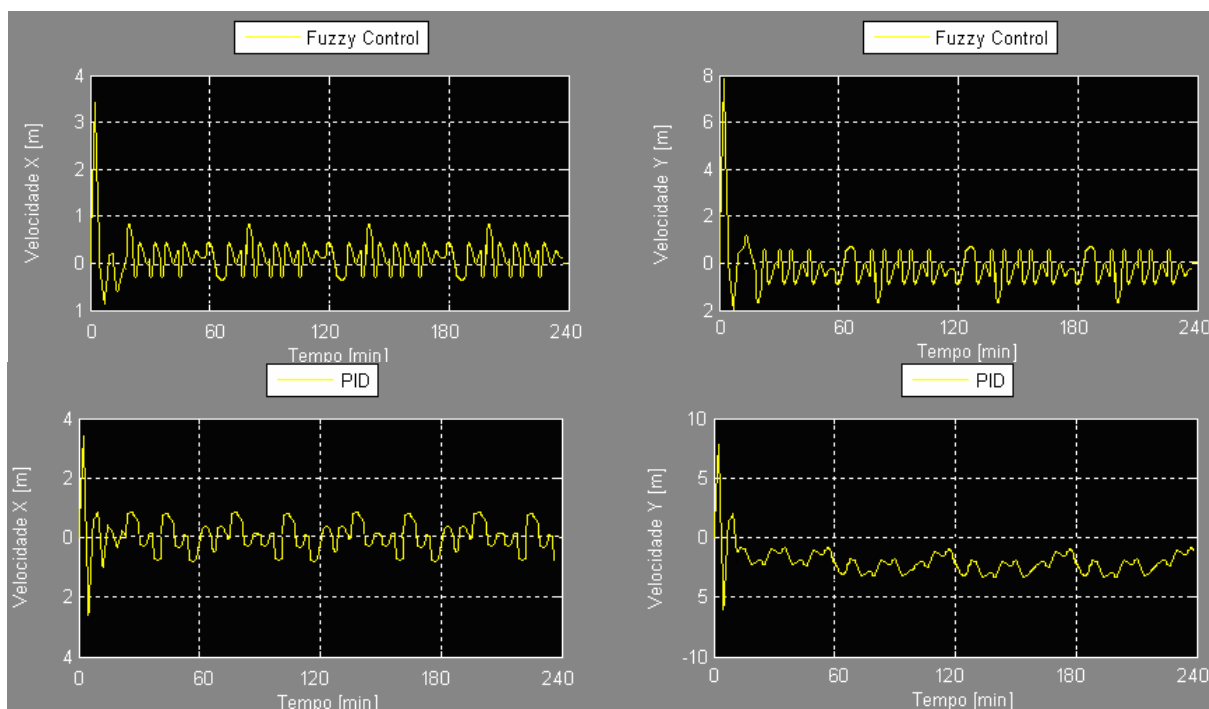


Figura 48 - Velocidade da embarcação para a sexta simulação.

Percebe-se na figura 48 que a velocidade da embarcação possui maior variação na direção de avanço (y).

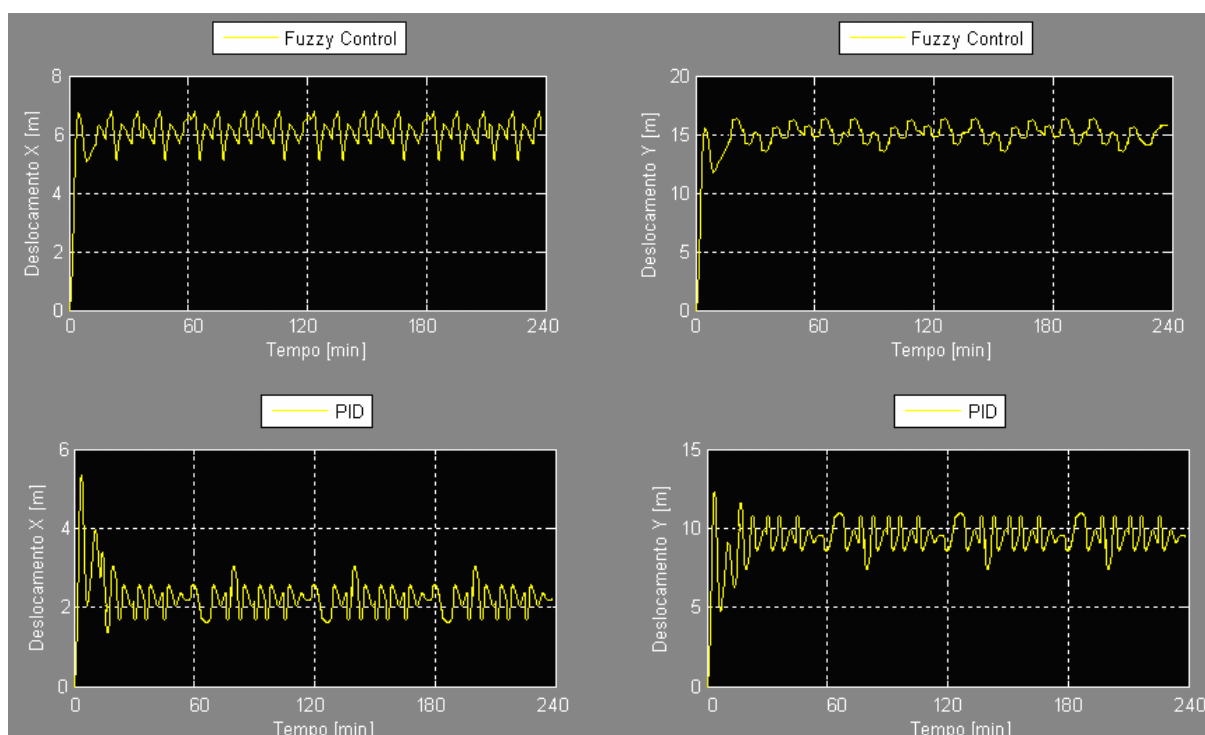


Figura 49 - Deslocamento da embarcação para a sexta simulação.

Nota-se na figura 49 um grande raio de deslocamento na direção y para os dois controladores (assim como aconteceu na simulação anterior). Porém apesar dos mesmos estabilizarem longe da posição de referência, eles variam sua posição em um raio de deslocamento aceitável.

6 CONCLUSÕES

No presente trabalho, foram realizadas seis simulações numéricas da dinâmica de embarcações destinadas ao apoio marítimo, considerando os esforços ambientais correnteza e ventos, visando obter um posicionamento aceitável para os dois graus de liberdade estudados (deriva e avanço), dentro do limite de tolerância e buscando um menor tempo de resposta dos controladores nebuloso e PID.

Foi desenvolvido um programa computacional utilizando o SIMULINK e o MATLAB para simular o posicionamento da embarcação.

Foram apresentados os resultados do SPD comparando o controlador nebuloso com um controlador clássico PID, foram apresentados as forças ambientais, a velocidade da embarcação e seu deslocamento.

O controlador PID apresentou bom desempenho, mantendo a embarcação perto da referência em todas as simulações. A vantagem do controlador PID é a simplicidade do algoritmo de controle e a grande disponibilidade de literaturas a seu respeito, incluindo diferentes aplicações em engenharia de controle. A desvantagem do PID é a dificuldade de se determinar e ajustar os três ganhos: K_p , K_i e K_d .

No presente trabalho, a possibilidade de se usar controle nebuloso em sistema de posicionamento dinâmico de embarcações foi apresentada. As principais vantagens do *Fuzzy Control* são a simples forma de controle e a fácil adequação em sistemas de controle com malhas de realimentação. Seu ajuste é realizado com base na experiência e no conhecimento a respeito do sistema.

Uma oportunidade de continuação desse projeto seria a criação de um laboratório para simulações de atividades marítimas em águas profundas e ultra profundas na UFES. Dessa forma, poder-se-ia encontrar um modelo mais apropriado para a dinâmica da embarcação assim como a verdadeira consequência da força dos ventos e da correnteza e a partir dos trabalhos realizados nessa área, desenvolveria um controlador mais eficaz que os empregados na indústria atualmente.

Para a realização deste trabalho de graduação foram necessários conhecimentos adquiridos em diversas disciplinas do curso de Engenharia Mecânica. Como exemplo, podemos citar conhecimentos em modelagem e controle de sistemas mecânicos adquiridos nas disciplinas Vibrações Mecânicas (MCA03383) e Sistemas de Controle (MCA03387); conhecimentos de programação adquiridos nas disciplinas Processamento de Dados I (INF02622), Processamento de Dados II (INF02628) e Sistemas de controle (MCA03387); conhecimentos na área de cálculo diferencial na disciplina Cálculo III (MAT03362) e conhecimentos adquiridos na área de petróleo e gás nas disciplinas de Fundamentos da Engenharia de Petróleo I (MCA05773), Fundamentos da Engenharia de Petróleo II (MCA05774) e Tópicos Especiais na Indústria do Petróleo (MCA05771).

APÊNDICE A

Para este trabalho de conclusão de curso, foi adotada a embarcação Maersk Helper da empresa dinamarquesa Maersk Supply Service como fonte de coleta de dados e fonte de cálculos.

O Maersk Helper é autorizado (classificado) para operar como supridor, rebocador, recolhedor de óleo e realizar manuseio de ancoragem. Possui sistema de posicionamento dinâmico para auxiliar nessas atividades.

Na figura 50 e na figura 51, temos a vista superior e a lateral da embarcação respectivamente.

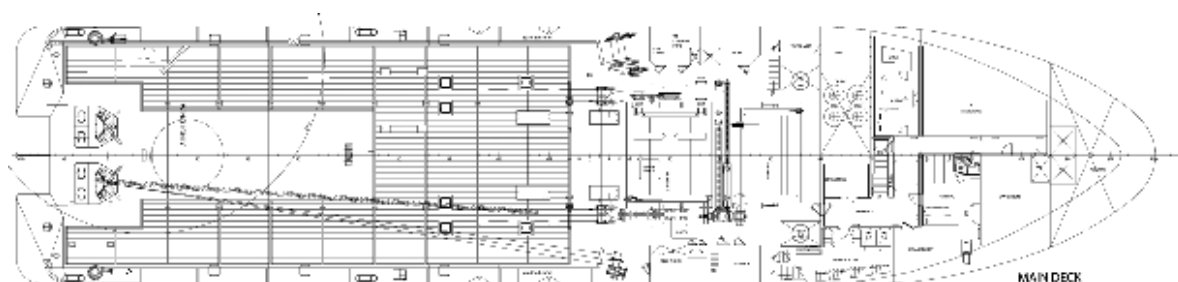


Figura 50 – Vista superior do Maersk Helper. Fonte: Maersk Supply Service.

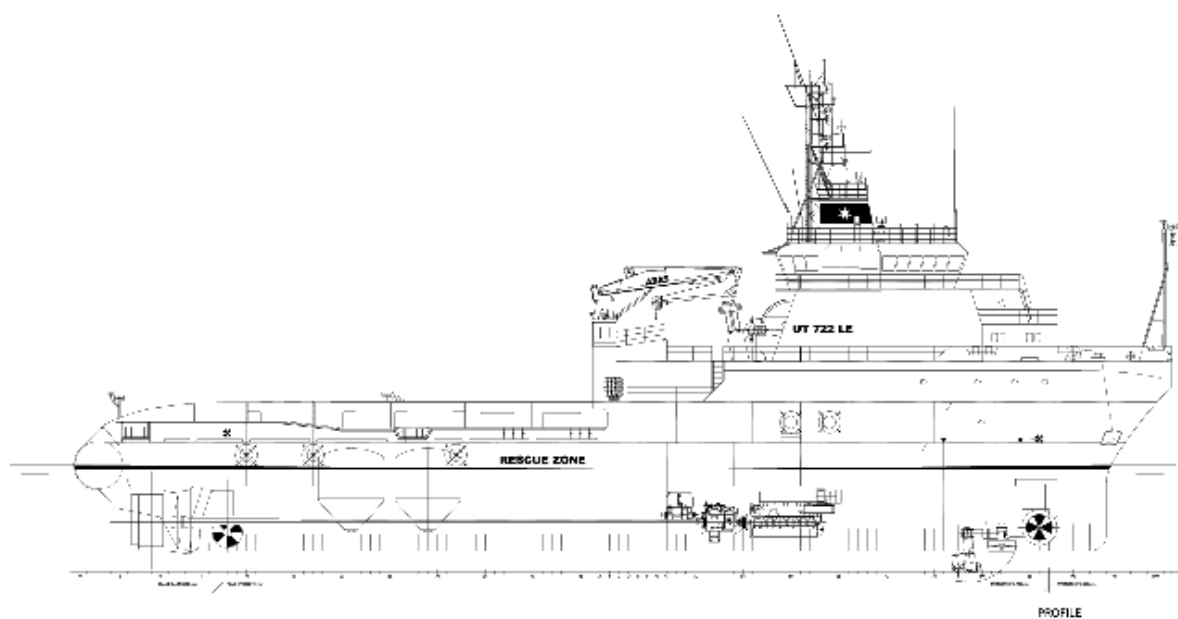


Figura 51 – Vista lateral do Maersk Helper. Fonte: Maersk Supply Service.

Na tabela 5 temos as principais especificações técnicas da embarcação.

Tabela 5 – Principais características do Maersk Helper. Fonte: Maersk Supply Service.

Dimensões	Comprimento total	80,00 m
	Boca	18,00 m
	Altura do pontal (calado + borda livre)	8,00 m
Porte bruto / Capacidade do navio	Navio carregado em 6,60 m de calado	2618 ton
	Navio leve em 6,00 m de calado	1750 ton
	Peso bruto (carregado, com tripulantes e consumíveis)	3427 ton
	Peso líquido (desacregado, sem tripulantes nem consumíveis)	1029 ton
Maquinário da embarcação	Motor principal	12877 KW
	Propulsor de proa	883 KW
	Propulsor de proa a ré	883 KW
	Propulsor de popa	883 KW
	Geradores auxiliares à diesel	1500 KW
	Geradores auxiliares de emergência à diesel	170 KW
Velocidade / Consumo	Velocidade máxima / consumo de diesel	59 ton / 24 hrs
	Consumo de diesel em velocidade econômica	22 ton / 24 hrs
	Consumo no porto	1-2 ton / 24 hrs
	Consumo parado em alto mar	5-8 ton / 24 hrs

APÊNDICE B

Neste apêndice são mostradas as principais funções criadas no SIMULINK.

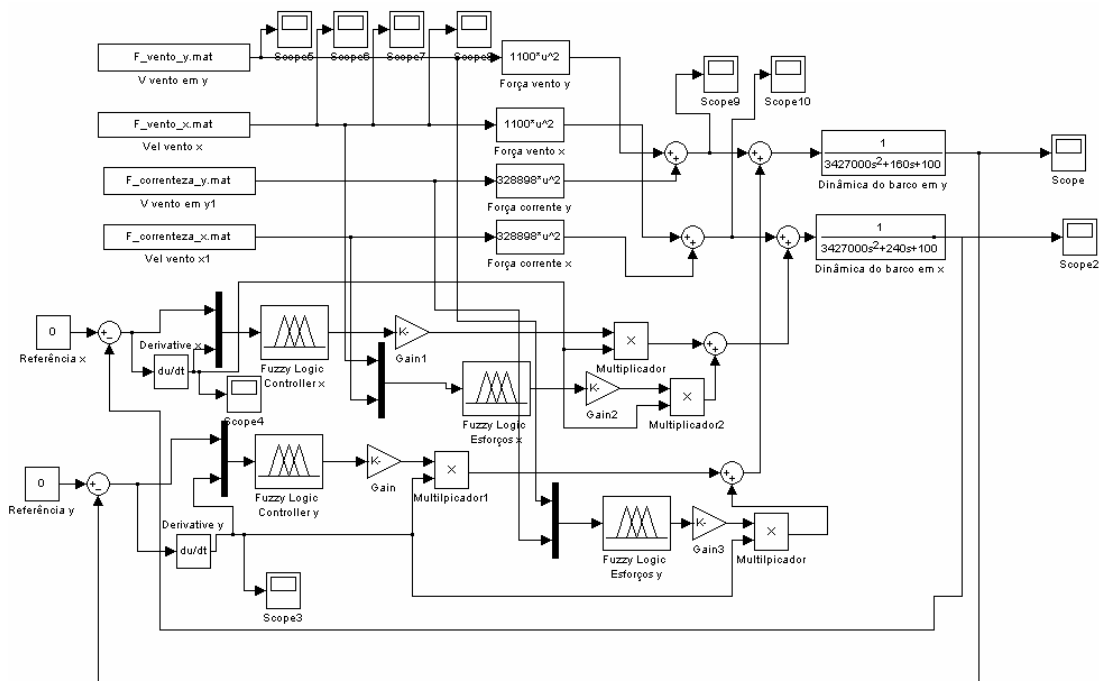


Figura 52 – Controlador nebuloso utilizando o SIMULINK.

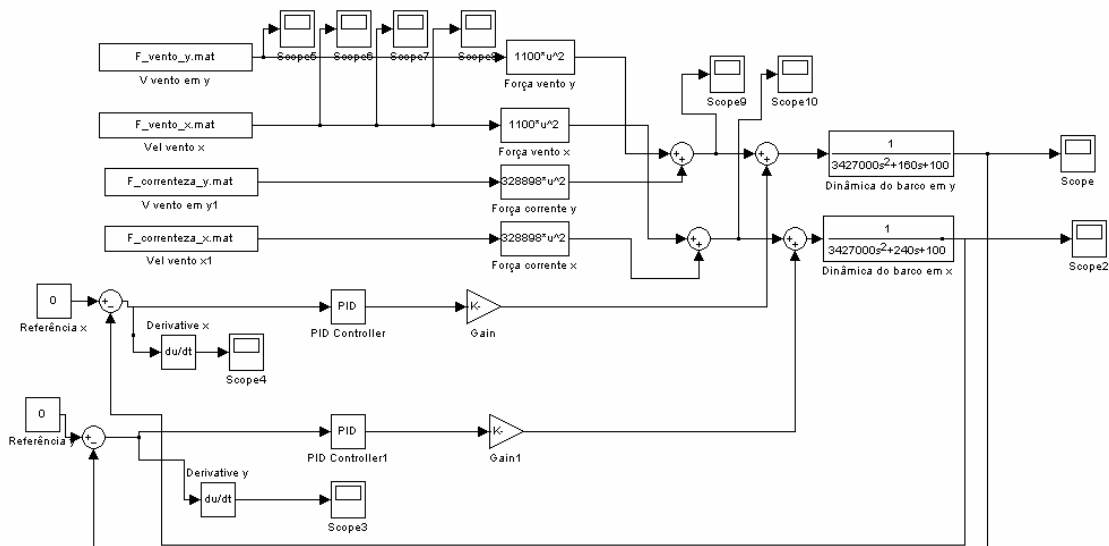


Figura 53 - Controlador Proporcional Integral Derivativo (PID) utilizando o SIMULINK.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, (2005), **Design and Analysis of Station Keeping Systems for Floating Structures**, API Recommended Practice 2SK, third edition.

CAVALCANTI, J. H. F.; LIMA, A. M. N.; DEEP, G. S., (1994) Controlador Fuzzy/Neural de Plantas Não Lineares. **10º Congresso Brasileiro de Automática**, 6º CLACA, Rio de Janeiro.

INDELICATO, A., (1997), **Estrutura para o Reconhecimento de Referências Geométricas Utilizando Ultra-som e Lógica Nebulosa**, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, UFES.

MAERSK SUPPLY SERVICE (2008), **Multipurpose Offshore Support Vessels H – Type**, Technical Specifications.

MATSUMOTO, É. Y., (2008), **Simulink 7.2 – Guia Prático**, Editoria Érica, 1ª edição.

MORGAN, M. J., (1978), **Dynamic Positioning of Offshore Vessels**, PPC, Books Division, Tulsa.

MOROOKA, C.K.; YAMAMOTO, M., (2005), **Dynamic Positioning System of Semi – Submersible Platform Using Fuzzy Control**. Departamento de Engenharia de Petróleo – Unicamp.

OGATA, K., (1982), **Engenharia de Controle Moderno**, Prentice Hall do Brasil.

PEREZ, T.; SMOGELI, O. N.; FOSSEN T. I.; SORENSEN A. J., (2006), **An Overview of the Marine Systems Simulator (MSS): A Simulink Toolbox for Marine Control System**, Department of Marine Technology, Norwegian University of Science and Technology – NTNU, Trondheim, NORWAY

SALVADOR, S. S., FONTENELLE, F. M., (2007), **Estudo de um Controlador Nebuloso para posicionamento dinâmico de plataformas em alto mar**, Departamento de Engenharia Mecânica – UFES.

SILVEIRA, M. M., (2002), **Introdução ao Apoio Marítimo**, Navsoft Consultoria e Serviços LTDA.

SIMÕES, M. G., SHAW, I. S., (2007), **Controle e Modelagem Fuzzy**, Editoria Blucher 2ª edição, FAPESP.

YAMAMOTO, M., (2005), **Estudo de Diferentes Técnicas de Controle Aplicadas a um Sistema de Posicionamento Dinâmico de uma Plataforma Semi-Submersível**, Universidade Estadual de Campinas.

ZADEH, L. A., (1965), **Fuzzy Set**, Department of Electrical Engineering, University of California, Berkeley, California.