

**UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ**

**Paulo Eduardo de Andrade Ziliani**

**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA PARA  
CAPTAÇÃO DA ENERGIA DAS ONDAS E DOS  
VENTOS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA  
EM PLATAFORMAS DE PETRÓLEO**

**TAUBATÉ – SP**

**2008**

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ**

**Paulo Eduardo de Andrade Ziliani**

**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA PARA  
CAPTAÇÃO DA ENERGIA DAS ONDAS E DOS  
VENTOS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA  
EM PLATAFORMAS DE PETRÓLEO**

Dissertação apresentada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

Área de Concentração: Energia e Gestão Ambiental na Indústria.

Orientador: Prof. Dr. José Rui Camargo.

**TAUBATÉ - SP**

**2008**

**PAULO EDUARDO DE ANDRADE ZILIANI**

**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA PARA CAPTAÇÃO DA ENERGIA DAS  
ONDAS E DOS VENTOS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM  
PLATAFORMAS DE PETRÓLEO**

Dissertação apresentada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

Área de Concentração: Energia e Gestão Ambiental na Indústria.

Orientador: Prof. Dr. José Rui Camargo.

DATA: \_\_\_\_\_

RESULTADO: \_\_\_\_\_

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. José Rui Camargo

Universidade de Taubaté

Assinatura \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Carlos Alberto Chaves

Universidade de Taubaté

Assinatura \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Carlos Daniel Ebinuma

Universidade Estadual Paulista

Assinatura \_\_\_\_\_

Dedico este trabalho *in memoriam* ao meu Avô Aristides Félix de Andrade

Aos meus familiares à minha esposa e meus filhos que sempre estiveram ao meu lado nos momentos de dificuldade. Aos meus pais que incondicionalmente me apoiaram durante toda a minha vida, à minha querida Avó que sempre me presenteou com seu amor dedicação e carinho.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dr. José Rui Camargo pela atenção, paciência, auxílio e orientação durante a execução deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Sebastião Cardoso pela sua sempre disposição em ajudar e discutir idéias inovadoras.

Ao Prof. Dr. Ederaldo Godoy Júnior pelo seu dinamismo e ajuda na elaboração dos trabalhos.

Ao DPO (*Dynamic Positioning Operator*) Leandro Timm Larz que contribuiu de modo fundamental na coleta de dados.

À minha família que sempre me apoiou e sem a qual a realização desse trabalho não teria sido possível.

Ao Prof. Dr. Carlos Alberto Chaves pelas suas observações precisas de fundamental importância na estruturação deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Daniel Ebinuma pela suas pontuações sempre consistentes que ajudaram de maneira indispensável na consolidação desta tese.

# **ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA PARA CAPTAÇÃO DA ENERGIA DAS ONDAS E DOS VENTOS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM PLATAFORMAS DE PETRÓLEO**

## **RESUMO**

Neste trabalho, será mostrado um sistema de geração de energia elétrica de aplicação prática a partir da captação dos movimentos verticais produzidos em plataformas de petróleo e pelos ventos *offshore*. Trata-se de um estudo de caso em que será proposta a utilização dos tensionadores da plataforma SEDCO 710 modificados, para gerar energia elétrica. O sistema de geração eólico será distribuído em pequenas turbinas de geração ao longo da plataforma, para não comprometer a estabilidade da mesma. A energia produzida pelos movimentos verticais (*heave*) será quantificada para, a partir de então, dimensionar motores hidráulicos adequados ao ciclo característico das ondas. Essa periodicidade foi monitorada por 10 (dez) meses em amostras registradas a cada 06 (seis) horas e analisadas por histogramas, cuja finalidade será mostrar o comportamento do *heave* (amplitude), velocidade, direção e rajadas dos ventos nesse período. Este estudo aponta soluções de simples aplicação e execução quando comparado aos existentes. A partir da quantificação da potência elétrica possível de ser obtida, uma comparação com o sistema instalado na SEDCO 710 será feita, apontando-se redução de consumo de óleo diesel e impacto ambiental.

**Palavras-chave: Geração de Energia; Meio-ambiente; Fontes alternativas de Energia.**

# **TECHNIQUE FEASIBILITY ANALYSIS FOR CAPTATION OF THE ENERGY OF THE WAVES AND WINDS FOR ELECTRIC ENERGY GENERATION IN OIL RIGS**

## **ABSTRACT**

In this work, an electric energy generation system of practical application from the recover of the heaves produced in oil rigs and winds offshore will be shown. One is about a case study where the use of the oil rig SEDCO 710 tensioners will be considered to generate electric energy. The wind system of generation will be shared in small turbines throughout the rig, due to keep rig stability. The energy produced for the heaves will be quantified for, from now on, find out properly hydraulic motor adequate to the characteristic waves cycle. This regularity was monitored by 10 (ten) months in samples registered to each 06 (six) hours and analyzed by histograms, whose purpose will be to show the heave profile (length), speed, direction and gusts of the winds during this period. This work does show solutions of simple application and easier to implement when compared with the existing ones. From the quantification of the possible electric power of being gotten, a comparison with the system installed in SEDCO 710 will be made, pointing topics like save diesel oil and reducing environmental impact.

**Key-words:** Energy Generation; Environment; Renewable energy.

## LISTAS DE TABELAS

TABELA 2.1 - Seleção da frequência de corte e fator damping para medidas de <i>heave</i> .....	63
TABELA 3.1 - <i>Heave, pitch, roll and current</i> coletados do sistema de posicionamento dinâmico Kongsberg SEATAX operando na plataforma de perfuração e completação SEDCO 710, no entorno das seguintes coordenadas geográficas, 22° 21,649' S 40° 04,095' W.....	66
TABELA 4.1 - Data de aquisição, tipo e fabricante dos tensionadores da plataforma SEDCO 710 .....	92
TABELA 4.2 - Especificação técnica dos compensadores tensionadores .....	93
TABELA 4.3 - Rotação e número de pólos para geradores síncronos com frequência de geração de 60 Hz.....	101
TABELA 5.1 - Especificações técnicas do grupo motogerador instalado na plataforma SEDCO 710 .....	110
TABELA A.1 - Conversão de unidades de pressão.....	122
TABELA A.2 – Conversão força e peso.....	122

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 - Demonstrativo do consumo de energia no mundo e projeções futuras .....	23
FIGURA 1.2 - Plataforma de perfuração .....	24
FIGURA 1.3 - AQUABUOY sistema de conversão composto por bóia, bomba, turbina Pelton e gerador elétrico .....	32
FIGURA 1.4 - PELAMIS sistema de conversão por extração mecânica que se utiliza de motores hidráulicos de deslocamento variável .....	32
FIGURA.1.5 - Características e propagação das ondas .....	35
FIGURA 1.6 - O mapa revela a média anual da potência em Kilowatts por metro para vários lugares ao redor do mundo .....	36
FIGURA 1.7 - Mapa das principais correntes marinhas que passam pela costa Brasileira... ..	37
FIGURA 1.8 – Velocidade média anual dos ventos medidas a 50 m de altura .....	39
FIGURA 1.9 - Ilustração de uma plataforma de perfuração e completação DP conectada ao BOP .....	41
FIGURA 1.10 – Esquema proposto para geração de energia elétrica em plataformas DP .....	42
FIGURA 1.11 – Tensionadores tipo dual da plataforma SEDCO 710 .....	42
FIGURA 1.12 - Plataforma de Produção P-50 .....	44
FIGURA 1.13 – Diagrama esquemático do sistema de geração de energia para plataformas fixas .....	45
FIGURA 1.14 – Ilustração gráfica da relação entre potência e a velocidade do vento .....	47
FIGURA 1.15 - Diversos tipos de turbinas eólicas, com número de pás variável .....	48
FIGURA 2.1 - Eixo de referência geográfica e do veículo ( <i>Geographic and body frames</i> ) ...	51
FIGURA 2.2 - Anemômetro utilizado na plataforma SEDCO 710 .....	53
FIGURA 2.3 - Unidade de Referência do Movimento (M.R.U.) .....	54

FIGURA 2.4 - Representação esquemática dos <i>Frames</i> nas embarcações.....	55
FIGURA 2.5 - Eixos utilizados na montagem dos sensores .....	56
FIGURA 2.6 - Diagrama de blocos do SEATAX M.R.U.....	57
FIGURA 2.7 - Sensor de variação angular baseada na aceleração de Coriolis.....	58
FIGURA 2.8 - Sensor de aceleração linear .....	59
FIGURA 2.9 - Representação esquemática do circuito integrador fornecendo informações de velocidade e posição do veículo.....	61
FIGURA 3.1 - Localização geográfica da Plataforma de Perfuração SEDCO 710 .....	64
FIGURA 3.2 - Características dos gráficos estatísticos dos histogramas .....	67
FIGURA 3.3 - Interpretação da representação gráfica do histograma, representação simétrica e multi modal.....	68
FIGURA 3.4 - Interpretação da representação gráfica do histograma, representação do histograma tipo planalto e de queda abrupta com tendência negativa .....	68
FIGURA 3.5 - Representação da distribuição gráfica da mediana média e moda .....	70
FIGURA 3.6 - Caracterização da distribuição normal .....	73
FIGURA 3.7 - Histograma do <i>Heave</i> .....	74
FIGURA 3.8 - Histograma da velocidade do vento.....	75
FIGURA 3.9 - Histograma e distribuição de frequências das rajadas de vento na plataforma SEDCO 710.....	76
FIGURA 3.10 - Distribuição da velocidade dos ventos e rajadas de Outubro de 2006 a Julho de 2007 na plataforma SEDCO 710 .....	77
FIGURA 3.11 - Amplitude média das ondas entre o período de Outubro de 2006 e Julho de 2007, os dados foram obtidos a cada 06 horas.....	78
FIGURA 4.1. - Sistema genérico. Fluxos de energia, matéria e informação.....	81
FIGURA 4.2 - Reservatório hidráulico padrão .....	83

FIGURA 4.3 - Representação esquemática básica de um motor hidráulico .....	84
FIGURA 4.4 - Motor hidráulico do tipo palheta .....	86
FIGURA 4.5 - Motor hidráulico do tipo pistão .....	86
FIGURA 4.6 - Motor hidráulico do tipo engrenagem .....	86
FIGURA 4.7 - Anel tensionador, interface entre o fundo do mar e a plataforma .....	90
FIGURA 4.8 - Sistema de compensação do movimento vertical ( <i>Heave</i> ) da plataforma .....	90
FIGURA 4.9 - Desenho do tensionador de 80.000 lbs de capacidade, abertura de 150" , cilindro de 12 1/2" eixo de 6" de diâmetro externo .....	92
FIGURA 4.10 - Esquemático do funcionamento de um tensionador comum.....	93
FIGURA 4.11 - Esquemático da adaptação dos tensionadores para bombeamento de fluido sob alta pressão. ....	95
FIGURA 4.12 – Bloco de ancoramento do tensionador .....	96
FIGURA 4.13 – Diagrama esquemático do funcionamento do conjunto de geração de energia elétrica em plataforma de petróleo a partir dos tensionadores.....	97
FIGURA 4.14 – Desaceleração do fluxo de ar ao passar por um rotor eólico .....	102
FIGURA 4.15 – Potência máxima alcançada quando $v_1/v_2=1/3$ .....	103
FIGURA 5.1 - Análise comparativa das emissões dos gases provenientes da queima do diesel puro e biodiesel EEOB .....	107
FIGURA A.1 - Representação Esquemática do cilindro e pistão.....	120
FIGURA A.2 - Resposta em frequência de um filtro passa-baixas representada em um diagrama de Bode.....	122
FIGURA A.3 - Representação gráfica em diagrama de blocos da solução geral da equação A.5 .....	124

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIE	Agência Internacional de Energia
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BOP	<i>Blow-Out Preventers</i> (Preventores de <i>Blow-Out</i> )
CBEE	Centro Brasileiro de Energia Eólica
CRESESB/CEPEL	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica
DP	<i>Dinamic Positioning</i> (Posicionamento Dinâmico)
DPEM	Densidade da Potência Eólica Média
DPMM	Densidade de Potência Instantânea Média Horária Mensal
EE	Energia Elétrica
EEOB	Éster Etílico de Óleo de Girassol
EH	Energia Hidráulica
EIA	<i>Energy Information Administration</i> (Administração da informação da Energia)
EIA/RIMA	Estudos e Relatórios de Impactos Ambientais
ELETROBRÁS	Centrais Elétricas Brasileiras S/A
EM	Energia Mecânica
E.P.I.	Equipamento de Proteção Individual
ET	Energia Térmica
H.P.	<i>Horse Power</i>
MCT	Ministério de Ciência e Tecnologia
MRU	<i>Motion Reference Unit</i> (Unidade de Referência do Movimento)
OPD	<i>Ocean Power Delivery</i>
p.s.i.	<i>ponds square inch</i> (libras por polegada quadrada)

PETROBRAS Petróleo Brasileiro S/A

UCP Unidade de Conversão primária

UCS Unidade de Conversão Secundária

ULC Unidade de Limitação e Controle

UFPE Universidade Federal de Pernambuco

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a_{err}$	Erro do vetor aceleração	$m/s^2$
$A$	Área da secção transversal do aerogerador	$m^2$
$E_{extraída}$	Energia cinética do vento atrás do rotor	J
$E_G$	Energia elétrica gerada durante um ano	kWh/ano
$E_{70\%}$	Energia gerada a 70% da capacidade do motogerador	MW.h
$E_{CO2}$	Emissões anuais de dióxido de carbono	g/ano
$F$	Força	N
$f$	Frequência de oscilação da onda	Hz
$f_c$	Frequência de corte	Hz
$g$	Aceleração da gravidade	$m/s^2$
$H$	Altura da onda	m
$l_m$	Amplitude média da onda	m
$m$	Fluxo mássico de ar	kg/s
$N$	Potência hidráulica produzida pelo êmbolo do pistão hidráulico	kW
$N_{hp}$	Potência hidráulica produzida pelo êmbolo do tensionador	HP
$n_m$	Velocidade do motor hidráulico	rpm
$n$	Número de unidades da amostra	
$n_G$	Velocidade de rotação do gerador elétrico	rpm
$P$	Potencial energético das ondas	kW/m
$P_{extraída}$	Potência eólica recuperável	$W/m^2$
$P_{max. eol.}$	Máxima potência eólica	$W/m^2$
$P_e$	Potência elétrica total gerada pelo sistema proposto	kW
$P_G$	Potência elétrica gerada	kW

$P_{Ghp}$	Potência elétrica gerada em H.P.	HP
$p_t$	Pressão de trabalho do tensionador	Pa
$p_1$	Pressão de pré-carga no acumulador	Pa
$p_2$	Pressão máxima de operação do sistema	Pa
$p_3$	Pressão mínima de operação do sistema	Pa
$Q_t$	Deslocamento de fluido na unidade de tempo para um tensionador	m <sup>3</sup> /s
$Q_{t16}$	Deslocamento de fluido na unidade de tempo para 16 (dezesesseis) tensionadores	m <sup>3</sup> /s
$S$	Área de ação das pás de uma turbina eólica	m <sup>2</sup>
$s$	Desvio padrão	
$t_m$	Tempo que o pistão do tensionador leva para completar um período	s
$T$	Torque do motor hidráulico	kgm
$V_{ac1}$	Volume de pré-carga do acumulador	m <sup>3</sup>
$V_{ac2}$	Volume para condição de máxima pressão no acumulador	m <sup>3</sup>
$V_{ac3}$	Volume mínimo de operação do sistema	m <sup>3</sup>
$v_1$	Velocidade do vento antes de passar pelo aerogerador	m/s
$v_2$	Velocidade do vento após passar pelo aerogerador	m/s
$v_v$	Velocidade do vento	m/s
$v_{mp}$	Velocidade média do pistão	m/s
$\bar{X}$	Média aritmética	
$X_i$	Valor da amostra	

## LETRAS GREGAS

$\delta\phi$	Diferencial do ângulo de <i>pitch</i> e <i>roll</i>	<i>rad</i>
$\eta_p$	Rendimento do pistão do tensionador	
$\eta_m$	Rendimento do motor hidráulico.	
$\eta_G$	Rendimento do gerador elétrico	
$\rho_{ar}$	Massa específica do ar a 20°C	kg/m <sup>3</sup>
$\rho$	Massa específica da água do mar	kg/m <sup>3</sup>
$\omega_c$	Frequência angular	Hz

## SUMÁRIO

RESUMO .....	05
ABSTRACT .....	06
LISTA DE TABELAS.....	07
LISTA DE FIGURAS.....	08
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	11
LISTA DE SÍMBOLOS .....	13

### **CAPÍTULO 1 O CONSUMO DE ENERGIA E EQUIPAMENTOS DE GERAÇÃO EM AMBIENTES *OFFSHORE***

1.1 INTRODUÇÃO .....	21
1.2 OBJETIVO.....	24
1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	25
1.4 SISTEMAS E EQUIPAMENTOS DE CAPTAÇÃO DE ENERGIA DAS ONDAS E DOS VENTOS EXISTENTES. ....	29
1.4.1 EQUIPAMENTOS E SISTEMAS DE TRANSFORMAÇÃO DA ENERGIA DAS ONDAS.....	29
1.4.2 EQUIPAMENTOS DE CAPTAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA.....	33
1.5 POTENCIAL ESTIMADO DE ENERGIA <i>OFFSHORE</i> .....	35
1.5.1 POTENCIAL DAS ONDAS.....	35
1.5.2 POTENCIAL DA ENERGIA DOS VENTOS .....	37

<b>1.6</b>	<b>PROPOSTAS PARA O USO DE ESTRUTURAS OCEÂNICAS PARA O APROVEITAMENTO DA ENERGIA DAS ONDAS E EÓLICA</b> .....	40
1.6.1	PLATAFORMAS DP.....	40
<b>1.6.1.1</b>	<b>Descrição do Sistema</b> .....	43
1.6.2	PLATAFORMAS FIXAS .....	43
<b>1.6.2.1</b>	<b>Descrição do Sistema</b> .....	45
1.6.3	TURBINAS EÓLICAS EM AMBIENTE <i>OFFSHORE</i> .....	46

## **CAPÍTULO 2 METODOLOGIA**

<b>2.1</b>	<b>EFEITOS DO MEIO AMBIENTE NA EMBARCAÇÃO MEDIDOS PELO SEATEX</b> .....	50
2.1.1	VENTOS.....	50
2.1.2	ONDAS.....	51
<b>2.2</b>	<b>INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO</b> .....	52
2.2.1	ANEMÔMETROS ( <i>SURGE SWAY YAW</i> ) .....	52
<b>2.2.1.1</b>	<b>Localização dos anemômetros</b> .....	53
2.2.2	M.R.U. (MEDIDORES DE <i>PITCH, ROLL</i> E <i>HEAVE</i> ) .....	53
<b>2.2.2.1</b>	<b>Localização dos sensores</b> .....	55
<b>2.2.2.2</b>	<b>Descrição do diagrama de blocos do MRU para o processamento dos valores do <i>heave</i></b> .....	56
<b>2.2.2.3</b>	<b>Princípio de Funcionamento dos Sensores do MRU</b> .....	57
<b>2.2.2.4</b>	<b>Processamento dos sinais para obter os valores de <i>heave</i></b> .....	60

## **CAPÍTULO 3 MEDIDAS DE VELOCIDADE DOS VENTOS, AMPLITUDE DAS ONDAS E ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS MEDIÇÕES**

<b>3.1</b>	<b>MEDIÇÕES DAS CONDIÇÕES DE MAR E VENTOS NA BACIA DE CAMPOS RIO DE JANEIRO .....</b>	<b>64</b>
<b>3.2</b>	<b>INTRODUÇÃO A TEORIA ESTATÍSTICA .....</b>	<b>66</b>
3.2.1	MÉDIA ARITMÉTICA .....	69
3.2.2	MEDIANA.....	69
3.2.3	MODA .....	70
3.2.4	RELAÇÃO ENTRE MÉDIA MEDIANA E MODA.....	70
3.2.5	DESVIO PADRÃO .....	71
<b>3.2.5.1</b>	<b>Interpretação do desvio padrão .....</b>	<b>71</b>
3.2.6	DISTRIBUIÇÃO NORMAL.....	73
<b>3.3</b>	<b>ANÁLISE ESTATÍSTICA DA VELOCIDADE DOS VENTOS, RAJADAS E AMPLITUDE DAS ONDAS NA PLATAFORMA SEDCO 710.....</b>	<b>74</b>

## **CAPÍTULO 4 SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PROPOSTO À PLATAFORMA SEDCO 710**

<b>4.1</b>	<b>SISTEMA HIDRÁULICO BÁSICO .....</b>	<b>79</b>
<b>4.2</b>	<b>RESERVATÓRIO E TUBULAÇÕES.....</b>	<b>82</b>
4.2.1	RESERVATÓRIO .....	82

4.2.2	TUBULAÇÕES .....	83
<b>4.3</b>	<b>MOTOR HIDRÁULICO .....</b>	<b>84</b>
4.3.1	TIPOS DE MOTORES HIDRÁULICOS.....	85
<b>4.4</b>	<b>ACUMULADORES HIDRÁULICOS.....</b>	<b>87</b>
<b>4.5</b>	<b>TENSIONADORES COMPENSADORES DO MOVIMENTO VERTICAL (HEAVE) DA PLATAFORMA.....</b>	<b>89</b>
<b>4.6</b>	<b>MUDANÇAS PROPOSTA AOS TENSIONADORES DA SEDCO 710 PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....</b>	<b>94</b>
4.6.1	DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DA MODIFICAÇÃO DO TENSIONADOR.....	95
4.6.2	SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DOS TENSIONADORES.....	96
<b>4.7</b>	<b>POTÊNCIA RECUPERÁVEL PELOS TENSIONADORES E FORNECIDA AOS GERADORES ELÉTRICOS .....</b>	<b>97</b>
4.7.1	POTÊNCIA FORNECIDA AOS MOTORES HIDRÁULICOS .....	99
<b>4.8</b>	<b>DIMENSIONAMENTO DE UNIDADES EÓLICAS DE GERAÇÃO .....</b>	<b>101</b>
4.8.1	LIMITE DE BETZ.....	101

## **CAPÍTULO 5     RESULTADOS E DISCUSSÕES**

<b>5.1</b>	<b>OS COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS E O EFEITO ESTUFA .....</b>	<b>104</b>
<b>5.2</b>	<b>OS MOTOGERADORES E OS IMPACTOS AMBIENTAIS .....</b>	<b>105</b>
<b>5.3</b>	<b>EMISSÕES E CONSUMO DOS MOTOGERADORES .....</b>	<b>106</b>
<b>5.4</b>	<b>IMPACTOS AMBIENTAIS DO SISTEMA PROPOSTO .....</b>	<b>109</b>
<b>5.5</b>	<b>POTÊNCIA INSTALADA, REDUÇÃO NO CONSUMO DE DIESEL E NAS EMISSÕES DE CO<sub>2</sub>.....</b>	<b>110</b>

<b>CAPÍTULO 6 CONCLUSÃO .....</b>	<b>113</b>
-----------------------------------	------------

<b>6.1 SUGESTÃO PARA FUTUROS PROJETOS.....</b>	<b>114</b>
--	------------

<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>115</b>
--	------------

## **ANEXOS**

## CAPÍTULO 1

### O CONSUMO DE ENERGIA E EQUIPAMENTOS DE GERAÇÃO EM AMBIENTES *OFFSHORE*

#### 1.1 INTRODUÇÃO

O mundo vive uma grande escassez de energia e a principal fonte, atualmente, é a proveniente do petróleo. Este, como todos sabem, tem limitações de quantidade e tempo de utilização pela humanidade. Por isso, a necessidade de fontes de energia alternativas é fundamental. Várias empresas e institutos de pesquisa em todo o mundo, buscam meios viáveis para oferecer uma energia elétrica proveniente de fontes não convencionais e em quantidade suficiente para suprir as necessidades humanas. As energias térmica e elétrica, são as mais requisitadas em sua forma primária para serem utilizadas em máquinas e equipamentos empregados no cotidiano das pessoas. Assim vários mecanismos de transformação são projetados com o intuito de transformar a energia, de suas formas primárias como (mecânica, hidráulica, nuclear, térmica, orgânica, etc.) em energia elétrica e, a partir de então, ser utilizada em indústrias e residências.

A partir da primeira crise do petróleo, esforços, no sentido de diminuir a dependência desse tipo de combustível, têm-se observado na maior parte do planeta. De acordo com estudos feitos pela AIE (Agência Internacional de Energia), em 1974, por ocasião do primeiro choque do petróleo, 45% de toda a energia fornecida no mundo era de origem petrolífera e 16,2% eram provenientes de gás. Trinta (30) anos depois, parte desse consumo foi transferido para o gás sendo o petróleo responsável por 34,4 % e o gás passou a responder por 21,2 % de

toda a energia consumida no globo. A matriz energética brasileira provém, em sua grande parte, de fontes renováveis sendo: 39% petróleo e seus derivados; 29,6% Biomassa; 14,4% hidráulica e elétrica; 6,6% carvão mineral; 1,5% urânio. O mundo, no entanto, tem, em sua esmagadora maioria, fontes de energia não renováveis sendo, 34,4% petróleo e seus derivados; 10,8% proveniente da biomassa; 2,2% hidráulica e elétrica; 21,2% gás natural; 24,4% carvão mineral; 6,5% urânio e 0,5% outros. Os números apontam assim, para um quadro bastante favorável ao Brasil, se comparado ao resto do mundo. Quanto ao uso de fontes renováveis de energia, o oceano, ainda não foi sequer tocado. Sabe-se que dezenas de milhares de MW são produzidos pelos oceanos, se considerar apenas os movimentos das ondas, o Brasil possui um litoral de mais de 8.000 km de extensão e uma plataforma continental de 200 milhas náuticas que são utilizadas apenas para explorar petróleo e fornecer matéria-prima à incipiente indústria pesqueira local. Esse imenso potencial marinho, poderia ser utilizada, também para produção de energia renovável aproveitando-se o movimento das águas e ventos oceânico. Embora vários problemas e questões ainda necessitem de soluções, do ponto de vista da confiabilidade, durabilidade e sustentabilidade de todas as tecnologias envolvidas no sistema de geração de energia a partir das ondas, existem vários nichos de exploração, pode-se constatar ainda que a maioria das companhias que desenvolvem tecnologia de exploração da energia das ondas estão localizadas em regiões de grande potencial com valores que variam de 90 a 50 kW/m, o que, por si só, já viabiliza alguns equipamentos. Ainda assim, existe o desafio de produzir energia elétrica a partir desse tipo de fonte renovável, (energia das ondas) com fornecimento estável em regiões, como no Brasil, cuja densidade de potência não ultrapassa a 25 kW/m. Assim, esse é um trabalho que precisa ser desenvolvido e que irá viabilizar uma produção de energia proveniente das ondas em lugares de baixa densidade de potência.

Embora a dependência das fontes não-renováveis esteja diminuindo, a população mundial continua em franca expansão e isso significa que, inevitavelmente, o consumo de energia aumentará, já existe projeções quantitativas desse provável aumento, conforme ilustra a figura 1.1.

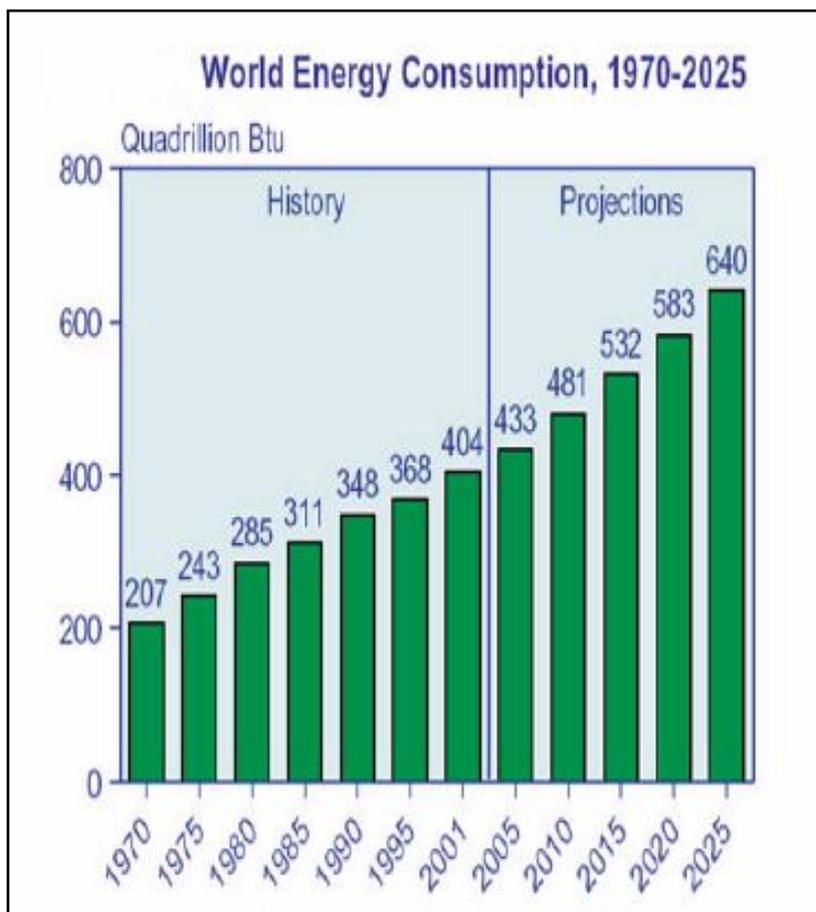


Figura 1.1 – Demonstrativo do consumo de energia no mundo e projeções futuras. Fonte: *Energy Information Administration (EIA)*, 2001

Tendo essa análise como horizonte, o presente trabalho apresenta alternativas que poderiam ser utilizadas no aproveitamento de parte dessa energia tendo como base de atuação, plataformas de exploração e produção de petróleo. Neste capítulo será feita uma revisão bibliográfica sobre o assunto mostrando métodos de análise das ondas e dos ventos e estágios de desenvolvimento dos equipamentos atualmente produzidos ou pesquisados; Sistemas e equipamentos de captação da energia das ondas e dos ventos existentes e em

desenvolvimento; Potencial da energia disponível *offshore*, onde se menciona o potencial das correntes marinhas, ondas e ventos;. Plataformas fixas e D.P. e sugestões para o uso das plataformas de petróleo existentes para transformar a energia das onda, ventos *offshore* e correntes marinha em energia elétrica.

## 1.2 OBJETIVO

Este trabalho tem o propósito de mostrar a viabilidade técnica para geração de energia elétrica em uma plataforma de petróleo, a partir de uma adaptação sugerida nos tensionadores utilizados no sistema de compensação da referida sonda (plataforma). Essa unidade de perfuração, pertence à TRANSOCEAN e está registrada sob a designação de SEDCO 710, operando atualmente na Bacia de Campos Rio de Janeiro. A referida plataforma tem características semelhantes à sonda apresentada na figura 1.2. Trata-se, desse modo, de um estudo de caso em que será sugerida uma modificação nos tensionadores, e uma avaliação qualitativa (viabilidade técnica) e quantitativa (Potência elétrica gerada) do sistema proposto, na referida plataforma.



Figura 1.2 – Plataforma de perfuração. Fonte: TRANSOCEAN INC., 2006

No capítulo 2 apresenta-se a metodologia utilizada na aquisição dos dados e informações necessárias à execução deste trabalho.

No capítulo 3 serão apresentados os dados obtidos bem como uma análise gráfica e estatística dessas informações.

No capítulo 4 faz-se uma breve descrição de um circuito hidráulico padrão e seu correspondente, que é o proposto neste trabalho. Apresentam-se, também, alguns cálculos básicos para determinar o potência recuperada pelos tensionadores e uma figura esquemática do sistema proposto.

No capítulo 5 apresentam-se discussões dos resultados, onde será totalizada a energia que poderia ser produzida ao longo do ano, a quantidade de CO<sub>2</sub> que deixaria de ser emitido para a atmosfera e uma breve análise econômica destacando o volume de óleo diesel que deixaria de ser consumido.

No capítulo 6 as conclusões serão apresentadas bem como sugestões para continuidade deste estudo.

### **1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Segundo PIZER (2006), “O comportamento não linear de uma onda curta sobreposta a uma onda longa é fielmente reproduzido pelo método Lagrangiano”.

Conforme CARCAS e YEMM (2005), “Portugal adquiriu no dia 19 de Maio de 2005 uma planta de geração de 2,25 MW da companhia *Ocean Power Delivery* (OPD). A unidade é composta por 09 (nove) módulos de 250 kW constituindo assim uma *Wave Farm*. Essa é a primeira fase de uma planta de 24 MW que será instalada a 5 km da costa Norte de Portugal, próximo à cidade de Póvoa de Varzim. Essa planta, quando finalizada sua instalação, deverá prover de energia elétrica 15000 habitantes e deixará de emitir 60000 toneladas de dióxido de carbono na atmosfera já que estará substituindo uma unidade de geração convencional. Considerando-se que a energia produzida pelas ondas tem custos 50% menores que a energia

eólica e 25% do custo da energia solar, têm-se nas ondas do oceano o mais baixo custo de produção de energia alternativa firme e comercial”

Segundo JOUANNE e WALLACE (2005), “é estimado que se 0,2 por cento da energia armazenada pelo oceano pudesse ser utilizada, poder-se-ia fornecer energia suficiente para atender à demanda do mundo inteiro”. Esta afirmação confirma o grande potencial dessa fonte de energia e o chamamento para um outro desafio.

Este desafio consiste em confirmar na prática, através do desenvolvimento de dispositivos que transforme a energia mecânica produzida pelas ondas em energia elétrica firme e confiável. Isto não constitui uma tarefa fácil.

Conforme HEATH (2003), “por mais de dois séculos inventores têm produzido patentes para sistemas de captura de energia das ondas e ainda assim não conseguimos implantar plantas de geração de potência proveniente da energia das ondas que seja representativa na malha mundial de energia produzida no mundo.” Ainda segundo Heath, “a realidade da energia das ondas é o seguinte: 1- Existe uma fonte de energia extremamente grande disponível; 2- A tecnologia disponível para extração dessa energia já existe; 3- O problema consiste em solucionar os problemas de custo aceitável para o mercado”, embora já existam companhias que exploram esse potencial comercialmente. A indústria da energia das ondas está agora em um estágio de desenvolvimento similar à indústria do vento nos anos 80 quando protótipos privados eram desenvolvidos sob suporte e algum dinheiro público.

Conforme RETZLER (2003), “as ondas são caracterizadas por possuírem grande força e baixa velocidade. Essa é uma combinação ideal para aplicação de óleo hidráulico a alta pressão. No entanto, o movimento das ondas no mar constitui um complexo arranjo e pode-se considerar que possui grande semelhança a uma senóide, por isso pode-se utilizar métodos analíticos para calcular a energia fornecida pela mesma”.

Segundo DAVEY (1999), “O objetivo da simulação foi a validação do modelo experimental construído em escala (*Wavegen experiment*, Gato e Falcão, 1988) estudar uma faixa de condições de fluxo, aperfeiçoar a turbina, sua geometria para melhorar seu desenho em escala real e cálculos na condição estática e em rotação muito maior do que o período de onda ( $>100$  rad/s) considerando a velocidade de entrada constante”. Existem também métodos numéricos que fornecem resultados mais próximos da realidade. Estes métodos são fundamentais para o estudo do comportamento das ondas. Existem ainda *softwares* que analisam o comportamento do fluxo de fluidos em máquinas hidráulicas como o CFX extensivamente utilizado em turbinas construídas especialmente para trabalhar no regime de ondas.

De acordo com MOLLINSON (1985). “Embora a estimativa da potência da onda incidente seja um elemento crítico para os projetistas de conversores de energia de ondas instalada na costa, métodos completamente seguros não existem. Atualmente o método aceitável é o uso da Análise de Fourier para produzir um espectro de ondas decompostas em séries de Fourier no domínio do tempo. A onda incidente é definida como a soma desse espectro de ondas e a potência em cada onda é calculada usando o número de onda e altura da mesma. A potência total incidente é igual à potência individual de cada uma das ondas individuais”.

Isso mostra que o CFX pode também ser usado nos conversores de energia das ondas. Além da energia das ondas, instalações *offshore* podem ser utilizadas para produzir energia elétrica a partir da energia eólica. No entanto alguns requisitos são necessários para viabilizar a instalação de um parque de geração eólica.

Conforme SIMÕES e ESTANQUEIRO (2006), “existe a possibilidade de se iniciar estudos de viabilidade técnica para o primeiro P.E. (Parque Eólico) *offshore*, com o seguinte perfil: Distância inferior a 15 km da costa, profundidade inferior a 40 m, declive suave entre

20 e 40 m de profundidade NEP's > 2300 h/ano, proximidade de pontos de interligação à rede elétrica”.

Segundo a ANEEL (2002), existem várias divergências sobre o potencial eólico Brasileiro entre especialistas e instituições. Até poucos anos as estimativas eram da ordem de 20.000 MW, hoje a maioria dos estudos indicam 60.000 MW.

Conforme o Centro de Referência para Energia Solar e Eólica (CRESESB/CEPEL) (2003), que publicou um estudo sobre o tema, estima-se o potencial eólico Brasileiro da ordem de 143.000 MW. Essas divergências decorrem, principalmente, da falta de informações (dados de superfície) e das diferentes metodologias empregadas.

Segundo SILVA, ALVES, CAVALCANTI e DANTAS (2002), dentre os Estados estudados, aquele que apresentou o menor potencial eólico foi o Estado do Maranhão. O Estado do Rio Grande do Norte, entretanto, foi o que registrou a maior potência eólica. As localidades que apresentaram valores mensais de densidade da potência eólica média (DPEM) superiores a  $100 \text{ W/m}^2$ , foram Paulistana, PI (julho, agosto e setembro) e Acaraú, CE (setembro, outubro e novembro). Nesta última localidade, a DPMM alcançou, no mês de outubro,  $138,302 \text{ W/m}^2$ .

Segundo ARAÚJO (1996), entre os principais impactos socioambientais negativos das usinas eólicas destacam-se os sonoros e os visuais. Os impactos sonoros são devidos ao ruído dos rotores e variam de acordo com as especificações dos equipamentos, o autor cita que as turbinas de múltiplas pás são menos eficientes e mais barulhentas que os aerogeradores de hélices de alta velocidade.

Conforme TAYLOR (1996), outro impacto negativo das centrais eólicas é a possibilidade de interferências eletromagnéticas, que podem causar perturbações nos sistemas de comunicação e transmissão de dados (rádio, televisão etc.). De acordo com este autor, essas interferências variam muito, segundo o local de instalação da usina e suas

especificações técnicas, particularmente o material utilizado na fabricação das pás. Também a possível interferência nas rotas de aves deve ser devidamente considerada nos estudos e relatórios de impactos ambientais (EIA/RIMA). Evidente que essas condições precisam ser analisadas caso a caso.

Segundo GRUBB e MEYER (1993), “para que a energia eólica seja considerada tecnicamente aproveitável, é necessário que sua densidade seja maior ou igual a  $500 \text{ W/m}^2$  a uma altura de 50 m do solo o que requer uma velocidade mínima do vento de 7 a 8 m/s”. Essas condições não são muito fáceis de encontrar, segundo a Organização Mundial de Meteorologia. Em apenas 13% da superfície da terra o vento apresenta uma média igual ou superior a 7 m/s a uma altura de 50 m.

## **1.4 SISTEMAS E EQUIPAMENTOS DE CAPTAÇÃO DE ENERGIA DAS ONDAS E DOS VENTOS EXISTENTES**

### **1.4.1 EQUIPAMENTOS E SISTEMAS DE TRANSFORMAÇÃO DA ENERGIA DAS ONDAS**

Já existem equipamentos que empregam diversos arranjos e tecnologias. Alguns dos principais equipamentos são:

- AquaBuoy fabricado pela AquaEnergy (EUA)
- *Offshore* OWC fabricado por Energetech (Austrália)
- *Pneumatic Stabilized Platform* fabricado por Float (EUA)
- *Mc Cabe Wave Pump* fabricado por Hydram (Irlanda)
- *SEA DOG Wave Pump* fabricado por *Independent Natural Resources* (EUA)
- Pelamis fabricado por *Ocean Power Delivery* (Reino Unido)

- *PowerBuoy* fabricado por *Ocean Power Technologies* (EUA)
- *Ocean Wave Energy Converter* fabricado por *Ocean Wave Energy Company* (EUA)
- *Wave Pump* fabricado por *Ocenergy* (EUA)
- MRC1000 fabricado por OreCON (Reino Unido)
- *Floating Wave Power Vessel* fabricado por *SeaPower Group* (Suécia)
- *Archimedes Wave Swing* fabricado por *Teamwork Tech* (Holanda)
- *Wave Energy Module* fabricado por *U.S. Wave Energy* (EUA)
- *Wave Dragon* fabricado por *Wave DragonApS* (Dinamarca)
- *Water Pump* fabricado por *Waveberg* (EUA)
- *Wavebob* fabricado por *WaveBob* (Irlanda)
- *Offshore OWC* fabricado por *WaveGen* (Reino Unido)

Esses dispositivos utilizam as mais variadas configurações e arranjos, de um modo geral, a grande maioria utiliza uma bomba acoplada a um acumulador de fluido para obter energia suficiente para girar algum dispositivo; nesse caso, a maior parte deles são turbinas hidráulicas que, por sua vez, estão acopladas a um gerador elétrico gerando a partir daí energia elétrica. Existem configurações que possuem os módulos de bombeamento no oceano e a unidade de geração em terra. A grande maioria desses dispositivos, estão instalados a uma distância de 5 km da costa e à profundidade média de 50 m. Grande parte dos fabricantes, utilizam modelos numéricos para validar seus protótipos em tanques de teste. Os fabricantes desses equipamentos não incluem, em seus custos, as despesas de instalação, que pode, em alguns casos, ser até maiores do que o equipamento em si. Esses custos incluem ancoramento e interconexões elétricas.

As empresas que atualmente desenvolvem essa tecnologia dividem-se em 3 grupos. São eles:

- Grupo 1 - Empresas cujos dispositivos já foram completamente testados certificados e aprovados para sua utilização, inclusive seus sistemas de ancoragem e acessórios de instalação e que operam em escala comercial plena (PELAMIS).
- Grupo 2 - Empresas que já possuem seus equipamentos desenvolvidos, mas ainda não concluíram seus trabalhos de sistemas de ancoragem e acessórios de instalação. *Wave Dragon* fabricado por *Wave DragonApS* (Dinamarca).
- Grupo 3 – Companhias que possuem os projetos de maior inovação tecnológica e por isso, ainda existem desafios de integração e finalização que necessitam ser resolvidos. Estão nesse grupo a *AquaEnergy*, *OrecOn*, *INRI*, e a *WaveBob*.

Pode-se descrever o funcionamento de alguns desses equipamentos baseados no aproveitamento da energia das ondas. Observa-se, que, nos anos mais recentes, tem havido um expressivo aumento de interesse no aproveitamento da energia das ondas, especialmente em Portugal, onde diversas empresas estão interessadas ou envolvidas na utilização e, em alguns casos, no desenvolvimento deste tipo de tecnologia.

Os sistemas *offshore*, constituem o tipo genérico mais adequado para a exploração extensiva da energia das ondas. Existem vários conceitos que, objetivando o desenvolvimento de diversos sistemas *offshore*, estão baseados no conceito de corpo flutuante oscilante. Em geral o equipamento considerado é um dispositivo *offshore*, constituído por um corpo flutuante, cujas oscilações acionam um sistema hidráulico de extração/conversão de energia, utilizando fluido: água ou mais provavelmente óleo a alta pressão, com uma turbina hidráulica de alta queda ou mais provavelmente um motor hidráulico de alta pressão, acionando um gerador elétrico. As oscilações de pressão no circuito são amortecidas por um acumulador de gás funcionando como acumulador de energia intercalado no circuito, a montante do motor hidráulico ou da turbina. Esta descrição genérica, aplica-se a vários sistemas em fase de desenvolvimento. Pode-se mostrar alguns exemplos de ambas as aplicações (turbinas ou

motores hidráulicos), alguns que se utilizam de turbinas Pelton como o ilustrado na Figura 1.3.



Figura 1.3 - AQUABUOY sistema de conversão composto por bóia, bomba, turbina Pelton e gerador elétrico. Fonte: PREVISIC, 2004

Também existem equipamentos que se utilizam de motores hidráulicos de deslocamento variável conforme ilustra a Figura 1.4.

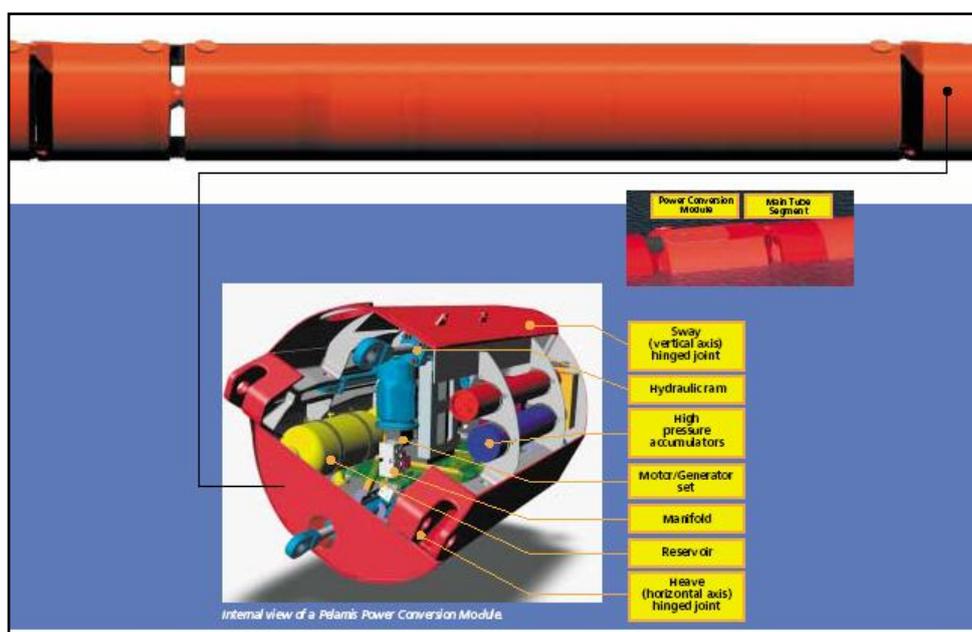


Figura 1.4 - PELAMIS sistema de conversão por extração mecânica que se utiliza de motores hidráulicos de deslocamento variável. Fonte: PREVISIC, 2004

A opção por motores hidráulicos a turbinas de ação do tipo Pelton, deve-se à maior simplicidade de instalação e menor custo, além de atender às características do regime de trabalho. Existe a disponibilidade de elevadas pressões, porém esses valores são limitados pelos acumuladores que irão fornecer a energia hidráulica aos motores. Acoplado nesse motor encontra-se um gerador elétrico com um torque elevado o que, evidentemente, é uma variável importante no dimensionamento desse motor, já que, normalmente, aplica-se esse equipamento onde há necessidade de elevado torque e potência com rotações relativamente baixas. Os motores hidráulicos possuem algumas vantagens em relação aos elétricos. Os motores elétricos de grande torque e potência possuem grandes dimensões e portanto pesos elevados. A relação peso potência de um motor hidráulico é bem menor, ou seja, o tamanho de um motor hidráulico será bem menor que um elétrico de mesma potência. Na prática sabe-se que para cada H.P. de potência do motor elétrico tem-se 13,6 kg e o hidráulico 5,4 kg. Com relação ao rendimento os motores elétricos apresentam vantagem em relação ao hidráulico que é de 90% a 95% os elétricos para 70% a 85% dos hidráulicos. Alguns motores hidráulicos de pistões especiais podem atingir valores um pouco acima de 90% (FIALHO, 2003).

#### 1.4.2 EQUIPAMENTOS DE CAPTAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA

Quanto à capacidade de geração elétrica, as primeiras turbinas eólicas desenvolvidas em escala comercial tinham potências nominais entre 10 kW e 50 kW. No início da década de 1990, a potência das máquinas aumentou para a faixa de 100 kW a 300 kW. Em 1995, a maioria dos fabricantes de grandes turbinas ofereciam modelos de 300 kW a 750 kW. Em 1997, foram introduzidas comercialmente as turbinas eólicas de 1 MW e 1,5 MW, iniciando a geração de máquinas de grande porte. Em 1999 surgiram as primeiras turbinas eólicas de 2 MW e hoje existem protótipos de 3,6 MW e 4,5 MW sendo testados na Espanha e Alemanha.

A capacidade média das turbinas eólicas instaladas na Alemanha, em 2002, foi de 1,4 MW e na Espanha de 850 kW. Atualmente, existem mais de mil turbinas eólicas com potência nominal superior a 1 MW em funcionamento no mundo, sendo os principais fabricantes as empresas BOYLE em 1996, BTM em 2000, WINDPOWER em 2000 e WIND FORCE em 2003. Quanto ao porte, as turbinas eólicas podem ser classificadas da seguinte forma:

- Pequenas – potência nominal menor que 500 kW;
- Médias – potência nominal entre 500 kW e 1000 kW;
- Grandes – potência nominal maior que 1 MW.

Nos últimos anos, as maiores inovações tecnológicas foram a utilização de acionamento direto (sem multiplicador de velocidades), com geradores síncronos e novos sistemas de controle que permitem o funcionamento das turbinas em velocidade variável, com qualquer tipo de gerador. A tecnologia atual oferece uma variedade de máquinas, segundo a aplicação ou local de instalação. Quanto à aplicação, as turbinas podem ser conectadas à rede elétrica ou destinadas ao suprimento de eletricidade para comunidades ou sistemas isolados. Em relação ao local, a instalação pode ser feita em terra firme ou *offshore*. Em 1981, foi fabricada e colocada em funcionamento a turbina *Boeing Mod 2* de 91 metros de diâmetro e 2,5 MW de potência, incorporando os mais recentes progressos tecnológicos conseguidos até à data. No mesmo período, formam-se os primeiros consórcios entre empresas americanas e europeias, nomeadamente suecas e alemãs, em programas de investigação e desenvolvimento de turbinas de grande potência.

Um dos exemplos mais importantes desta cooperação foram as turbinas americano-suecas *WTS3* (3 MW) e *WTS4* (4 MW) instaladas em 1982 (MUSGROVE, 1990).

## 1.5 POTENCIAL ESTIMADO DE ENERGIA *OFFSHORE*

### 1.5.1 POTENCIAL DA ENERGIA DAS ONDAS

As ondas são formadas com a ação dos ventos nos oceanos, e por isso estão sempre alinhadas com o vento e funcionam como acumuladores eólicos, Elas viajam grandes distâncias desde o seu nascimento mesmo depois de cessarem os ventos que as criaram. A figura 1.5 ilustra a forma de propagação e características das ondas.

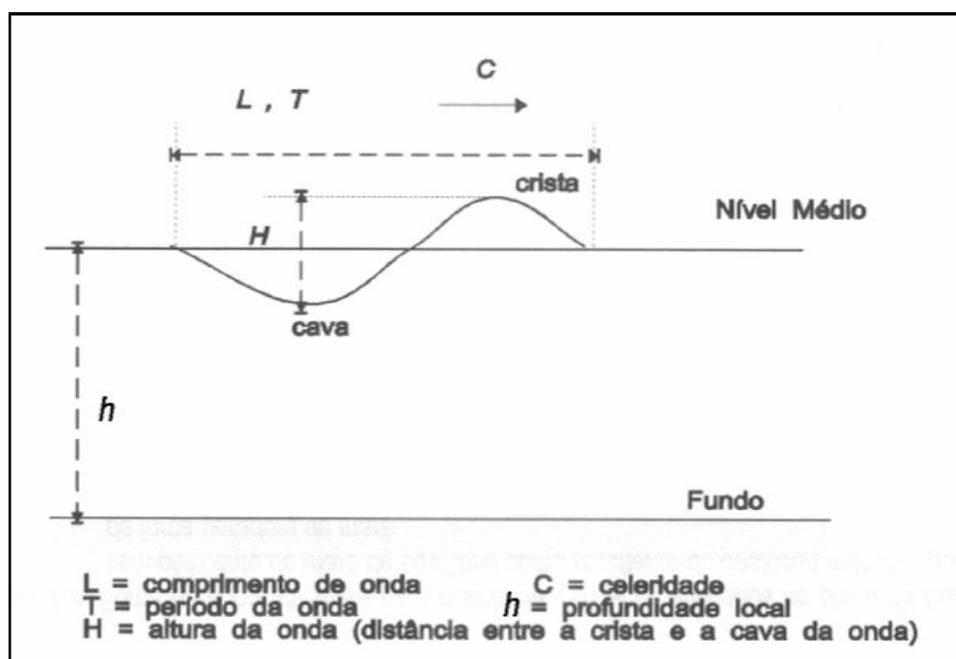


Figura 1.5 – Características e propagação das ondas. Fonte: COOPE, 2004

A energia proveniente das ondas está espalhada pelo mundo inteiro, entretanto seu potencial energético varia de um lugar para o outro e pode ser estimada pela equação 1 (DORRELL, 2005).

$$P = \frac{\rho g^2 H^2}{32\pi \cdot f} = \frac{981,2H^2}{f} \text{ W/m} \quad (1)$$

Onde  $\rho$  é a densidade do fluido considerado, (água do mar nesse caso),  $g$  aceleração da gravidade,  $H$  a altura da onda,  $f$  a frequência de oscilação da onda. A perda de energia ocorre de modo inversamente proporcional à aproximação desta com a praia, ou seja, quanto mais próxima do litoral menos energia a onda transmite. Quando chega à praia toda sua energia foi dissipada na arrebentação. A figura 1.6 mostra a distribuição da energia ao redor do mundo.

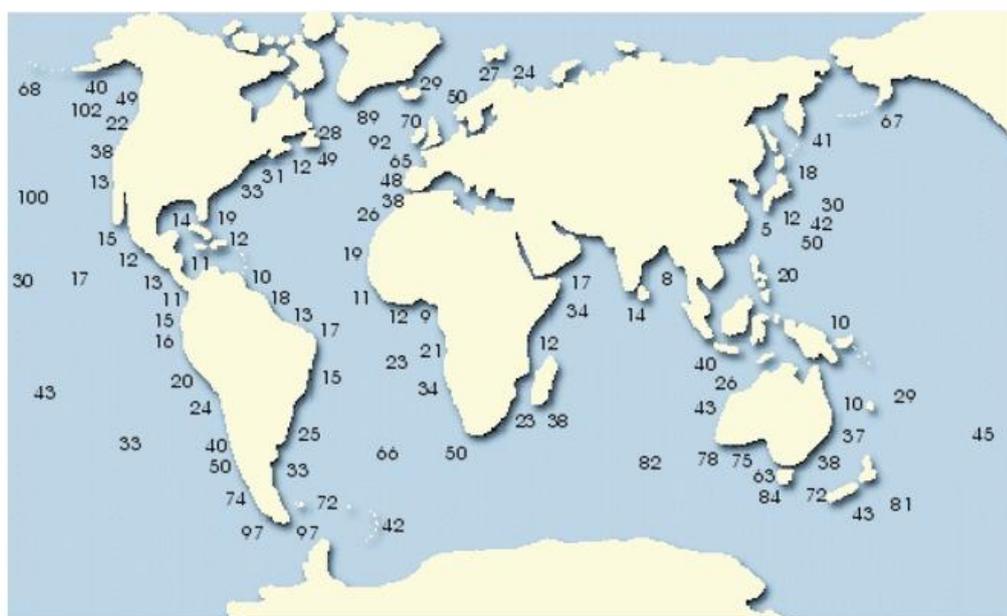


Figura 1.6 - O mapa revela a média anual da potência em Kilowatts por metro para vários lugares ao redor do mundo. Fonte: DORRELL, 2005

Pode-se observar que no Brasil, têm-se uma das menores médias em termos de energia das ondas e os países do norte, os maiores de potência média. Provavelmente este é o motivo de serem eles os maiores entusiastas dessa tecnologia. A quase totalidade das companhias e equipamentos desenvolvidos são de países do hemisfério norte. Se as correntes marinhas forem utilizadas para gerar energia na mesma estrutura em que se instalasse equipamentos para aproveitar a energia dos ventos e das ondas, poder-se-ia viabilizar plataformas oceânicas de geração de energia elétrica, explorando-se a energia das ondas com seus movimentos verticais e a energia das correntes marinhas com seus grandes deslocamentos de massa d'água

e os ventos *offshore* com sua regularidade e força característicos. Nesse sentido faz-se necessário estudar a localização dessas correntes, bem como seu potencial de geração de energia para então desenvolver equipamentos e dispositivos capazes de captar essa energia fornecida pelo oceano.

O mapa na fig.1.7 ilustra as principais correntes entre as quais se destaca a corrente do golfo e a corrente do Brasil.

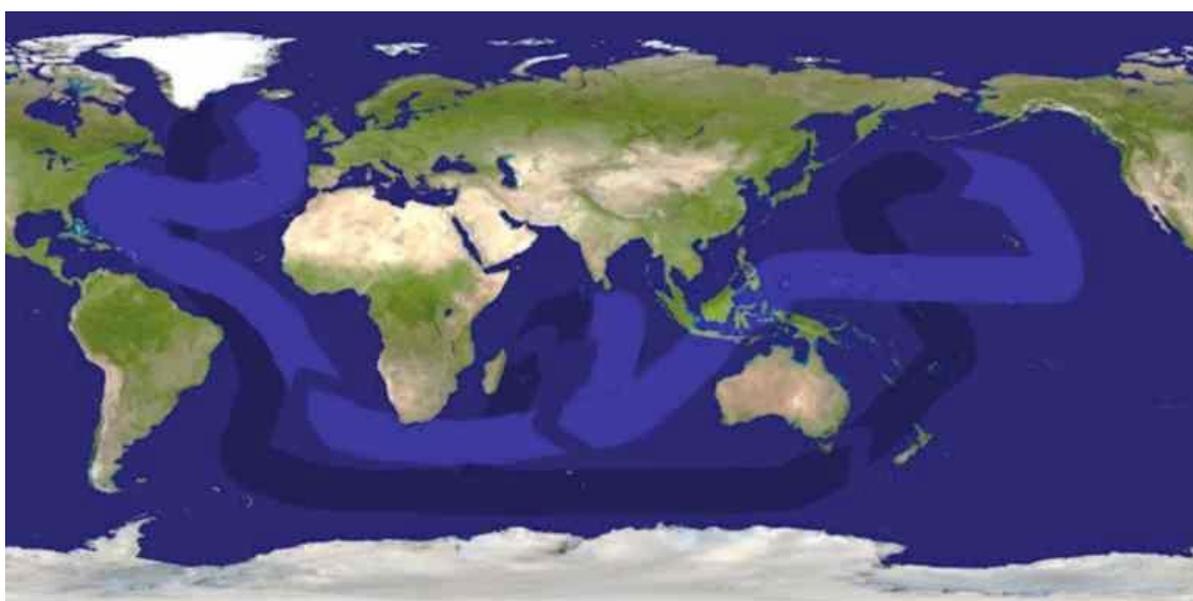


Figura 1.7 - Mapa das principais correntes marinhas. Fonte: WIKIPEDIA, 2007

### 1.5.2 POTENCIAL DA ENERGIA DOS VENTOS

Embora ainda haja divergências entre especialistas e instituições na estimativa do potencial eólico brasileiro, vários estudos indicam valores extremamente consideráveis. Até poucos anos, as estimativas eram da ordem de 20.000 MW. Hoje a maioria dos estudos indicam valores maiores que 60.000 MW. Essas divergências decorrem principalmente da falta de informações dados de superfície e das diferentes metodologias empregadas. De qualquer forma, os diversos levantamentos e estudos realizados e em andamento locais, regionais e nacionais têm dado suporte e motivado a exploração comercial da energia eólica

no País. Os primeiros estudos foram feitos na região Nordeste, principalmente no Ceará e em Pernambuco. Com o apoio da ANEEL e do Ministério de Ciência e Tecnologia – MCT, o Centro Brasileiro de Energia Eólica – CBEE, da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, publicou, em 1998, a primeira versão do “Atlas Eólico da Região Nordeste”. A continuidade desse trabalho resultou no “Panorama do Potencial Eólico no Brasil”, conforme ilustra a figura 1.8. Os recursos apresentados na legenda da figura 1.8, referem-se à velocidade média do vento e energia eólica média a uma altura de 50 m acima da superfície para cinco (5) condições topográficas distintas: Zona costeira – áreas de praia, normalmente com larga faixa de areia, onde o vento incide predominantemente do sentido mar-terra; Campo aberto – áreas planas de pastagens, plantações e/ou vegetação baixa sem muitas árvores altas; Mata – áreas de vegetação nativa com arbustos e árvores altas mas de baixa densidade, tipo de terreno que causa mais obstruções ao fluxo de vento; Morro – áreas de relevo levemente ondulado, relativamente complexo, com pouca vegetação ou pasto; Montanha – áreas de relevo complexo, com altas montanhas. Ainda na legenda, a classe 1 representa regiões de baixo potencial eólico, de pouco ou nenhum interesse para o aproveitamento da energia eólica. A classe 4 corresponde aos melhores locais para aproveitamento dos ventos no Brasil. As classes 2 e 3 podem ou não ser favoráveis, dependendo das condições topográficas. Por exemplo: um local de classe 3 na costa do Nordeste (zona costeira) pode apresentar velocidades médias anuais entre 6,5 e 8 m/s, enquanto que um local de classe 3 no interior do Maranhão (mata) apresentará apenas valores entre 4,5 e 6 m/s. A figura 1.8 mostra ainda a classificação das velocidades de vento e regiões topográficas. Os valores correspondem à velocidade média ( $V_m$ ) em m/s anual do vento a 50 m de altura, e à densidade média de potência ( $P_m$ ) em  $W/m^2$ . Os valores de  $P_m$  foram obtidos para as seguintes condições padrão: altitude igual ao nível do mar, temperatura de 20°C e fator de Weibull de 2,5. A mudança de altitude para 1.000 m acima do nível do mar acarreta uma

diminuição de 9% na densidade média de energia e a diminuição de temperatura para 15°C provoca um aumento de cerca de 2% na densidade de energia média. Outro estudo importante, em âmbito nacional, foi publicado pelo Centro de Referência para Energia Solar e Eólica – CRESESB/CEPEL. Trata-se do *Atlas do Potencial Eólico Brasileiro*. Nesse estudo estimou-se um potencial eólico brasileiro da ordem de 143 GW.

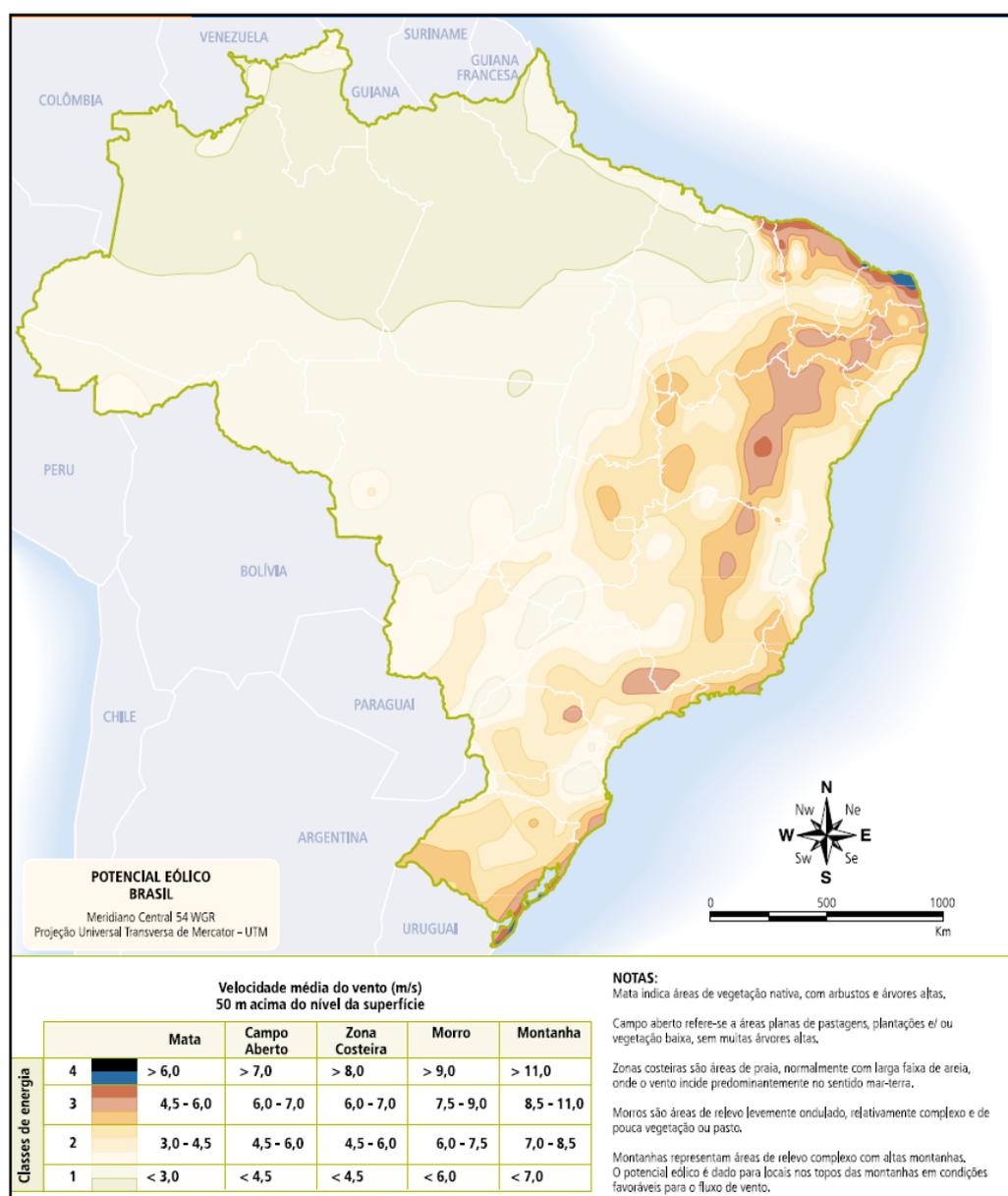


Figura 1.8 - Velocidade média anual dos ventos medidas a 50 m de altura. Fonte: FEITOSA, 2003

## 1.6 PROPOSTAS PARA O USO DE ESTRUTURAS OCEÂNICAS PARA O APROVEITAMENTO DA ENERGIA DAS ONDAS E EÓLICA

Nessa etapa, detalha-se o potencial de geração desse sistema que poderia ser instalado em plataformas fixas e plataformas D.P. (*Dynamic Positioning*).

### 1.6.1 PLATAFORMAS D.P.

São plataformas que ficam instaladas no oceano em regime de trabalho sem a necessidade de sistemas de ancoramento para que a mesma mantenha sua posição. O trabalho de posicionamento desse tipo de unidade é feito por propulsores (*Thrusters*), além de serem utilizados para deslocamento da unidade para outras áreas de exploração. Esse tipo de sonda é mais utilizada em trabalhos de perfuração e completação, pois são itinerantes. Uma vez posicionada e orientada para as coordenadas definidas pela operadora, inicia-se o trabalho propriamente dito que constitui na perfuração, tipicamente o trabalho tem início com o *top hole* para que seja possível assentar no fundo do oceano a cabeça do poço (*well head*), em seguida a descida do BOP (*Blow Out Preventer*) para que a plataforma, enfim, seja conectada ao fundo do mar através de uma coluna de tubos denominada *riser* e junta telescópica (*slip joint*). A figura 1.9 ilustra esse tipo de plataforma.

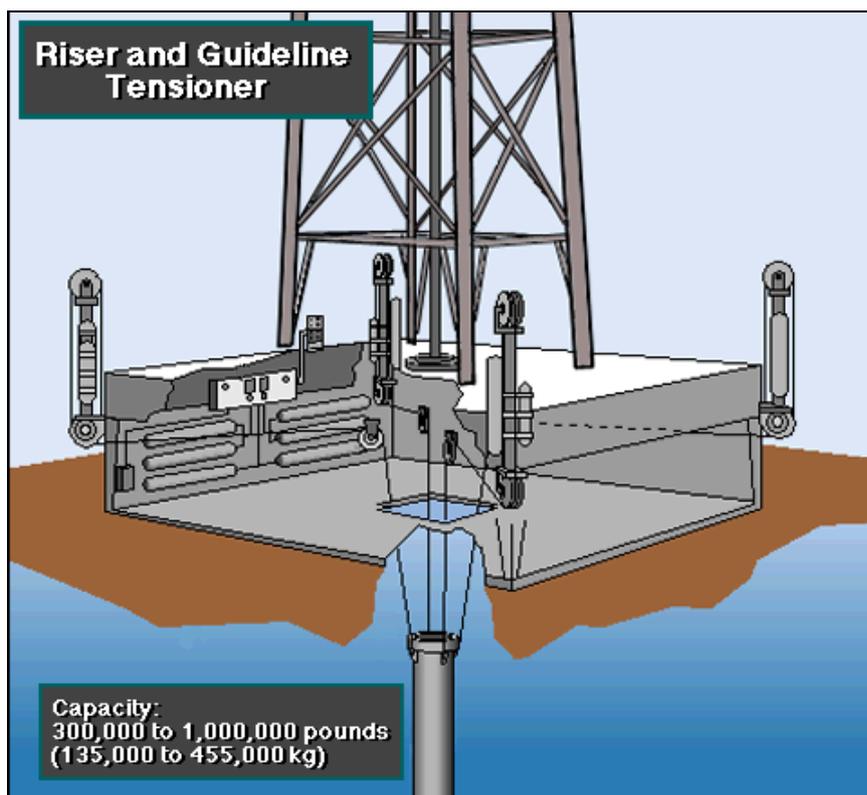


Figura 1.9 – Ilustração de uma plataforma de perfuração e completção DP conectada ao BOP. Fonte: *Transocean Training Center, 2006*

Para esse tipo de sonda, propõe-se que seja instalado um sistema de geração baseado em bombeamento com acúmulo de fluido a alta pressão e acionamento de motores hidráulicos conectados a geradores elétricos. Esta proposta é ilustrada pela figura 1.10. Esse tipo de plataforma é bastante utilizada em sistemas de perfuração e completção ao redor do mundo, os equipamentos utilizados nesse estudo terão como referência os utilizados pela sonda SEDCO 710. Ainda existem muitas sondas com essa filosofia sendo construídas atualmente enquanto, outras mais antigas, estão sendo retiradas de serviço ou reequipadas. Isso significa que existem muitas delas que certamente poderiam ser reaproveitadas. Utilizando-se essa filosofia, uma sobriedade poderia ser dada a esses equipamentos o que diminuiria o custo de um futuro projeto piloto para geração de energia em plataformas oceânicas. A Figura 1.11 mostra um conjunto de tensionadores do tipo dual fora de operação na plataforma SEDCO 710.

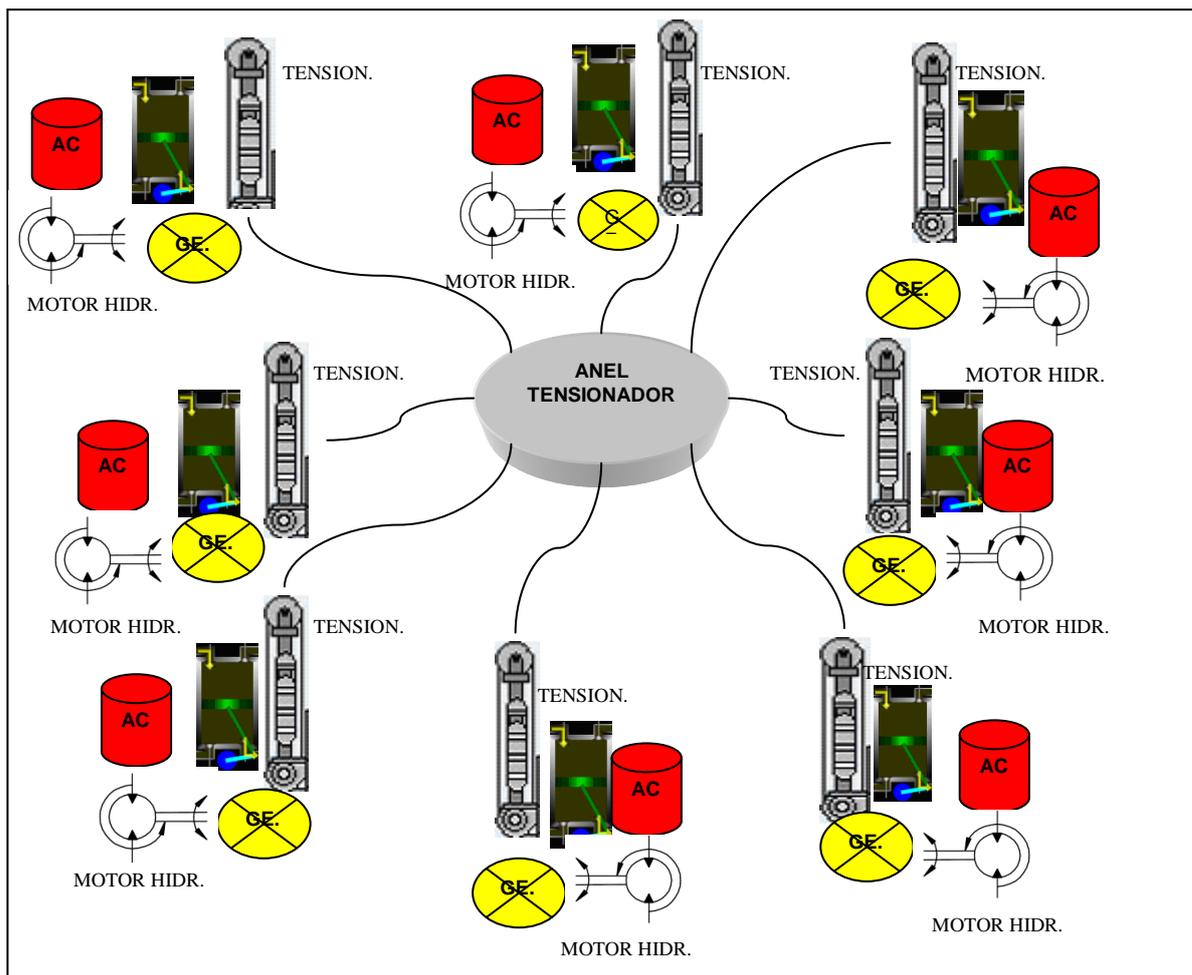


Figura 1.10 - Esquema proposto para geração de energia elétrica em plataformas DP



Figura 1.11 - Tensionadores tipo dual da plataforma SEDCO 710

### 1.6.1.1 Descrição do Sistema

Esse sistema foi concebido para ser instalado numa sonda de perfuração e completação existente, por isso a descrição será, obviamente, feita baseando-se numa situação real que nesse caso é a sonda de perfuração e completação da Transocean SEDCO 710. Existe, em princípio, instalado um anel tensionador e oito *pig tails* que funcionariam como linhas auxiliares conectadas às polias que, por sua vez, irão mover o pistão dos tensionadores e *slip joint* na vertical oscilando na velocidade e altura das ondas quando a plataforma está flutuando. Ao pistão dos tensionadores estará conectado um sistema de captação do fluido que, por sua vez, será direcionado aos acumuladores gerando alta pressão nos mesmos. Nesses acumuladores, válvulas direcionais garantirão o fluxo sob pressão desse fluido nos motores hidráulicos para manter a velocidade nos mesmos tão constante quanto possível. O fluido que sairá do dreno dos motores será redirecionado ao sistema de sucção realimentando e fechando o circuito.

### 1.6.2 PLATAFORMAS FIXAS

As mais antigas unidades de perfuração e completação eram ancoradas, pois trabalhavam em lâminas d'água não superiores a 300 m, assim estruturas desse tipo eram muito comuns com centenas delas espalhadas pelo mundo. O petróleo no Brasil é encontrado em lâminas d'água de 700 a 3000 m o que obrigou o país a construir ou contratar unidades que operassem nessa faixa de profundidade, tornando a exploração mais cara e complexa. Na bacia de Campos, de onde se extrai a maior parte do petróleo produzido no país, a lâmina d'água é de aproximadamente 1000 m o que obrigou a PETROBRAS, novamente, a desenvolver uma tecnologia de ancoramento para suas unidades de produção, já que as mesmas são fixas. Essas modernas unidades de produção, foram desenvolvidas pela

PETROBRAS e operam conectadas em poços distintos, a P-50 por exemplo opera 30 poços simultaneamente com dutos que somam mais de 400 km de extensão. Além disso a P-50 possui ainda a capacidade de operar poços de produção e injeção e abastecer navios Petroleiros simultaneamente. A figura 1.12 ilustra essa unidade de produção.



Figura 1.12 – Plataforma de Produção P-50. Fonte: PETROBRAS, 2006

Para unidades com esse perfil, a filosofia permanece inalterada, entretanto o arranjo dos dispositivos deve mudar radicalmente em plataformas fixas, pois se pode introduzir, as já conhecidas turbinas hidrocínéticas que operam em rios aumentando assim a energia gerada na plataforma. Na parte superior ou no *main deck* haveriam as mesmas configurações com tensionadores e acumuladores de energia para fornecer o fluido hidráulico à alta pressão para então encaminhá-los à turbina ou motores hidráulicos se for o caso. Existem ainda os sistemas de ancoragem dessas unidades que podem ser divididas em sistemas com âncoras ou colunas rígidas sendo que, para o projeto de geração, as plataformas de colunas rígidas seriam as mais indicadas, por proporcionar melhor estabilidade e controle do sistema Para a instalação das turbinas hidrocínéticas, deve-se ainda estudar as correntes marinhas e sua direção, com uma análise detalhada da região de maior potencial de geração para então decidir pela instalação desse sistema em plataforma existente ou a construção de uma unidade de geração específica para produzir energia elétrica de forma estável e confiável.

### 1.6.2.1 Descrição do Sistema

No caso proposto ilustrado pela figura 1.13, a plataforma é ancorada por um sistema fixo. Nele a turbina hidrocínética deverá ser instalada e um gerador de energia acoplado diretamente ao eixo da mesma para evitar perdas diminuindo o número de componentes variáveis no sistema. Essas turbinas deverão ser ancoradas pelo sistema de fixação da plataforma, mas, também, deverão possuir um sistema de controle de direcionamento do conjunto semelhante ao utilizado nos propulsores para otimizar o fluxo de água para os difusores das turbinas. Os sistemas instalados a bordo da plataforma, são semelhantes aos utilizados em sonda DP, já mencionados anteriormente. Certamente, esse sistema possui variáveis muito mais complexas de instalação e operação que não são objetos de análise nesse estudo, apenas apontada como uma possibilidade de grande potencial.

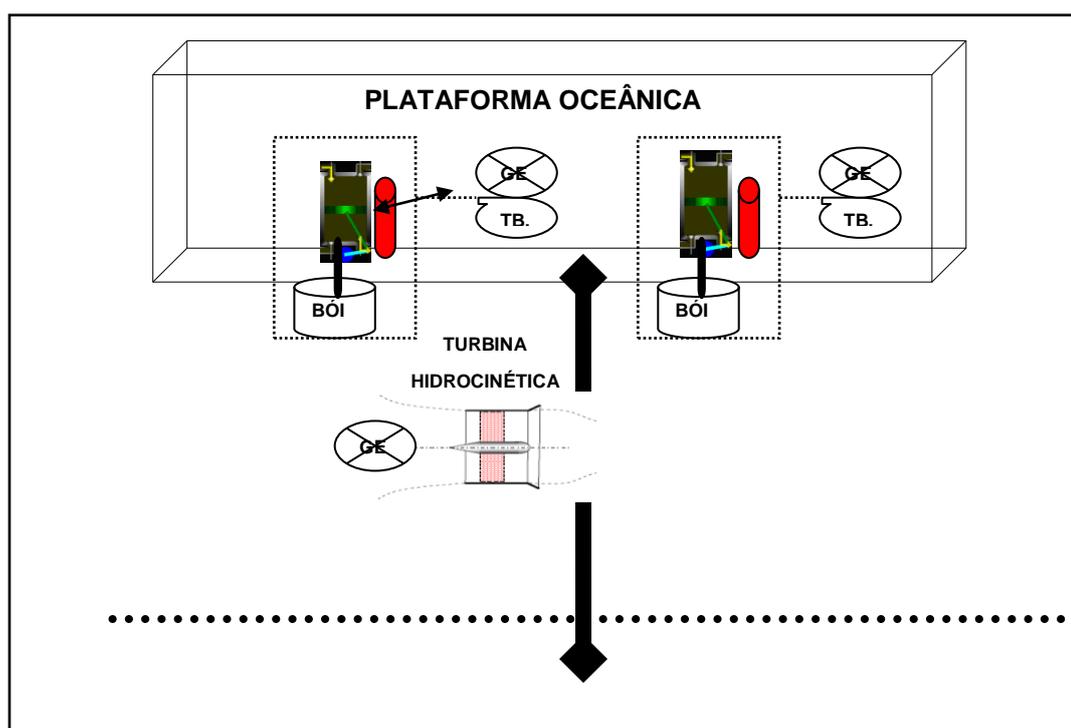


Figura 1.13 – Diagrama esquemático do sistema de geração de energia para plataformas fixas

### 1.6.3 TURBINAS EÓLICAS EM AMBIENTES *OFFSHORE*

As turbinas eólicas, também conhecidas por aerogeradores, têm como função transformar a energia cinética do vento em energia mecânica, e conseqüentemente em energia elétrica. Uma turbina eólica compõe-se dos seguintes elementos:

- Uma torre, que permite elevar a turbina eólica até ventos mais regulares na camada limite atmosférica;
- Uma nave ou *nacelle*, que contém o sistema mecânico;
- Um veio, que permite a rotação das pás e transmite a energia mecânica ao gerador elétrico;
- As pás, que permitem “absorver” a energia cinética do vento.

O vento é definido essencialmente por dois parâmetros: velocidade e direção. A sua intensidade não é regular e a sua disponibilidade depende do local. Como tal, antes de cada instalação, medições dos parâmetros do vento têm que ser efetuadas, assim como um estudo do relevo do local. Quanto menores forem as alterações do relevo, menores serão as barreiras físicas e assim melhor será a regularidade do vento. Esta é a razão pela qual, hoje se estuda parques eólicos em instalações “*offshore*”.

Uma turbina eólica não permite transformar a totalidade da energia do vento em energia útil. A potência recuperável por uma turbina eólica é, evidentemente, função da velocidade do vento. A Figura 1.14 ilustra essa afirmação.



Figura 1.14 - Relação entre a potência e a velocidade do vento. Fonte: EOLE, 2006

Velocidades de vento demasiado elevadas, podem também ser um problema sério para o funcionamento das turbinas eólicas, não só colocando problemas de resistência do material, mas também de segurança e de travagem da maquinaria. Assim, cada turbina eólica é equipada com pelo menos dois dos seguintes sistemas de travagem:

- **Sistema de controle por força centrífuga:** Dois pesos afastam-se do centro por ação da força centrífuga resultante do movimento de rotação e ativam o sistema de travamento aerodinâmicos (por exemplo, este sistema é utilizado nas turbinas eólicas Vergnet);
- **Regulação e travagem por leme articulado:** A turbina eólica desalinha-se automaticamente do vento;
- **Regulação e travagem tombando a eólica para trás:** Quando o vento é muito forte, a turbina eólica pode tombar completamente. Esta solução é apenas possível em pequenas unidades eólicas;
- **Regulação aerodinâmica sobre as pás:** sistemas em que as pás têm a possibilidade de serem colocadas em posições que oferecem menos resistência ao vento ou que ativam um sistema de travamento aerodinâmico;

- **Paragem com travamento de disco automáticos:** Neste caso não é apenas uma travagem, mas antes uma paragem. Quando a velocidade do vento diminui, as travas são liberadas.

A dimensão das turbinas eólicas depende sobretudo da potência desejada. Assim, quanto mais elevada for a potência desejada na turbina eólica, maior esta deverá ser. Atualmente, a potência máxima em torno de 2 MW, mas espera-se chegar até 6MW com as turbinas eólicas em instalações “*offshore*”. Todas estas turbinas produzem normalmente para entregar eletricidade à rede. Existem também turbinas eólicas de alguns watts para utilização doméstica. Nestes casos é possível conservar esta energia utilizando-se baterias. A maioria das turbinas eólicas tem 3 pás, no entanto, ao contrário do que pode parecer intuitivamente, o mais importante não é o número de pás, mas sim a superfície varrida por estas. Assim, uma turbina eólica com apenas 2 pás pode ter a mesma eficiência que uma turbina eólica de 3 pás. Existem também turbinas eólicas com uma só pá. Este modelo está sendo construído por uma empresa italiana (Riva Galzoni), encontrando-se esta tecnologia ainda em fase de desenvolvimento. A figura 1.15 ilustra algumas dessas turbinas.



Figura 1.15 – Diversos tipos de turbinas eólicas, com número de pás variável. Fonte: EOLE, 2006.

Conforme descrito, existem trabalhos que consideram a perspectiva da instalação de parques de geração eólicos *offshore* acrescentando a potência dessas turbinas eólicas à encontrada pela turbina hidráulica.

Classificação das turbinas eólicas quanto ao porte:

- Pequenas turbinas (até 30 kW);
- Grandes turbinas (entre 30 kW e 1 MW);
- Turbinas Multimegawatts (acima 1 MW).

Quanto ao eixo de rotação:

- Eixo Vertical
- Eixo Horizontal

Quanto ao controle de potência:

- Pela aerodinâmica em pá fixa (“*stall control*”);
- Pela aerodinâmica em pá móvel (controle do passo = “*pitch control*”);
- Pelo leme (“*yaw control*”).

Quanto à operação:

- Velocidade constante;
- Velocidade variável.

Para este trabalho será feito um cálculo para o dimensionamento de unidades de pequeno porte distribuídos ao longo da sonda apresentados no capítulo 4, para que a plataforma não tenha problemas de estabilidade.

## CAPÍTULO 2

### METODOLOGIA

Na elaboração deste trabalho, medições das condições ambientais foram de fundamental importância. As grandezas físicas medidas foram: Velocidade dos ventos e amplitude das ondas. Essas medidas foram feitas por equipamentos produzidos pela NAVIA MARITIME, AS Divisão **Kongsberg Seatex**.

#### 2.1 EFEITOS DO MEIO AMBIENTE NA EMBARCAÇÃO MEDIDOS PELO SEATEX

São três os elementos de natureza ambiental que produzem forças capazes de mover embarcações para fora de seus pontos de referência, ancoragem e arproamento. São eles:

- Ventos;
- Ondas;
- Correntes marinha.

Apresenta-se nessa seção os movimentos produzidos na embarcação pela ação das ondas e ventos, objeto desse estudo, e como são medidos.

##### 2.1.1 VENTOS

Os ventos atuam na embarcação produzindo um força que arrasta a mesma para fora de seu ponto de referência; essa força, por sua vez, produz três tipos de movimentos, que são: *Surge*, *sway* e *yaw*.

*Surge*, provoca o movimento da embarcação ao longo do eixo R. É um movimento horizontal, e será positivo quando o deslocamento for ao sentido de proa. *Sway* define o movimento ao longo do eixo P, também um movimento horizontal. Será positivo quando o deslocamento for ao sentido de boreste. *Yaw* é o movimento de rotação da embarcação em torno do eixo vertical (eixo Y) e será positivo quando a embarcação cruza o eixo norte no sentido leste. A figura 2.1 define os três eixos, de referência da embarcação, também chamado *g-frame*.

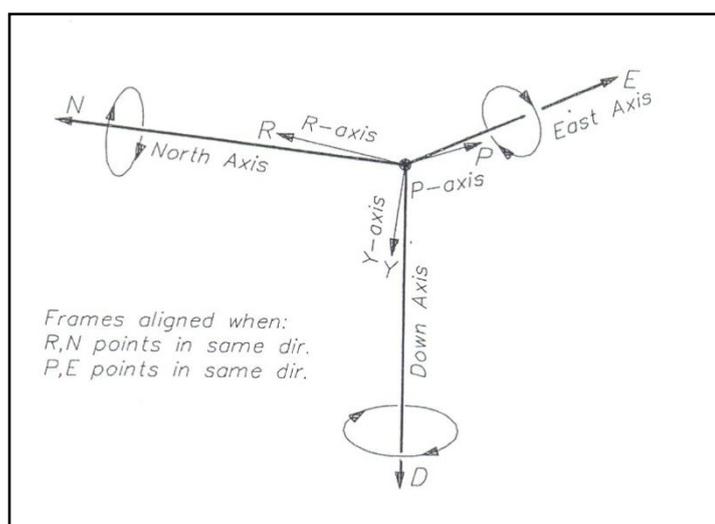


Figura 2.1 - Eixo de referência geográfica e do veículo (*Geographic and body frames*). Fonte: Kongsberg SEATEX Manual, 1999

### 2.1.2 ONDAS

As ondas, por sua vez, produzem outros efeitos, que são: *Pitch*, *roll* e *heave*. *Pitch* pode-se definir de modo simplificado como o ângulo, entre o plano horizontal, e a proa da embarcação quando a mesma inclina-se para cima, ou seja no lado positivo do plano horizontal. *Roll* define o mesmo movimento, mas produzido pelo lado de boreste da embarcação quando a mesma inclina-se para baixo, ou seja no lado negativo do plano

horizontal. *Heave* é o movimento da embarcação no plano vertical. Para que se possa manter a estabilidade da embarcação essas informações são de fundamental importância.

## 2.2 INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO

Para realizar as medidas de velocidade e direção dos ventos foram utilizados os anemômetros e para medidas de *heave* foi utilizado o M.R.U. (*Motion Reference Unit*), Unidade de Referência do Movimento. Esses dois instrumentos serão descritos a seguir bem como os mecanismos de medida e leitura de ambos.

### 2.2.1 ANEMÔMETROS (*SURGE SWAY YAW*)

Todos os sistemas DP possuem anemômetros que informam a direção e velocidade dos ventos, o da plataforma SEDCO 710 consiste num anemômetro de gazoleta. O anemômetro de gazoleta tem um eixo vertical e três gazoletas que capturam o vento. Os números de revoluções por minuto são detectados por dispositivos eletrônicos, convertem em informação digital que, por sua vez, mostra na tela do painel de controle a velocidade (*knots*) instantaneamente. Além da velocidade, os anemômetros estão equipados por um cata-vento (*wind-hawk*) cuja função é detectar a direção do vento; do mesmo modo essas informações detectadas são convertidas em informações digitais para então serem registradas no painel de controle da ponte. Esse sistema possui a função *feed-forward* que consiste num atalho ao modelo matemático que calcula o efeito do vento na embarcação e informa o arpoamento mais adequado ao veículo. O objetivo desse atalho é permitir alternativas caso hajam discrepâncias no resultado do cálculo produzido pelo programa já que o efeito do vento em embarcações é muito mais rápido que o das ondas.

### 2.2.1.1 Localização dos anemômetros

Existem 5 (cinco) anemômetros na SEDCO 710. Um está localizado na torre a 80 m, 2 (dois) na popa da embarcação a 12 m e 2 (dois) na proa a 28 m, todas as altitudes tem como referência o nível do mar. A figura 2.2 ilustra o anemômetro utilizado.



Figura 2.2 - Anemômetro utilizado na SEDCO 710. Fonte: Kongsberg SEATEX *Manual*, 1999

### 2.2.2 M.R.U. (MEDIDORES DE *PITCH*, *ROLL* E *HEAVE*)

Acelerações produzem informações de forças inerciais que atuam diretamente no veículo e conforme mencionado anteriormente estão divididos em:

- Medidas de inércia de orientação;
- Medidas lineares de inércia de translação.

O M.R.U. possui módulos que alojam os sensores além de uma unidade que faz a compensação dos efeitos de variação de temperatura e campo magnético nas unidades de

detecção do movimento, possui ainda unidade de processamento e interface com os sensores e o usuário. A figura 2.3 ilustra um dos três sensores do M.R.U..

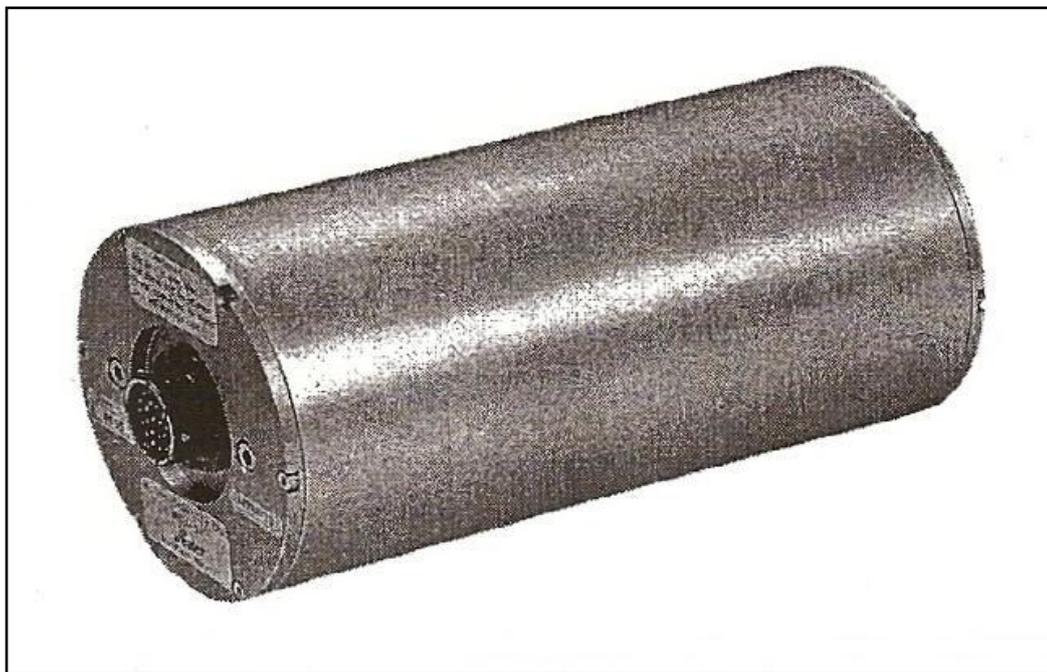


Figura 2.3 - Unidade de Referência do Movimento (M.R.U.). Fonte: Kongsberg SEATEX, *Manual*, 1999

As medidas lineares de inércia de translação são medidas de aceleração linear que integrada fornece a velocidade linear e integrada novamente informa o deslocamento linear. Teoricamente são 18 (dezoito) o número máximo de variáveis disponíveis que um sistema de medida inercial pode fornecer. Existem 6 (seis) acelerações (3 lineares e 3 rotacionais), resultando em forças atuando no veículo. As outras 12 (doze) são 6 (seis) velocidades (3 lineares e 3 rotacionais) e seis deslocamentos (3 lineares e 3 rotacionais). O M.R.U. fornece todas essas informações. Mas existem algumas limitações:

- a. Somente mudanças dinâmicas (*short-term*) em velocidades e posições poderão ser medidas;
- b. Somente mudanças dinâmicas no arreamento (ou rotação em torno do eixo vertical da embarcação) poderão ser medidos;

- c. A aceleração angular é obtida no M.R.U. pela diferenciação numérica da taxa de variação angular que é a grandeza física efetivamente medida pelo sensor.

### 2.2.2.1 Localização dos sensores

Os sensores do M.R.U. estão posicionados no centro de gravidade da embarcação montados em estruturas ortogonais chamadas *frame*. Existem 2 diferentes *frames*, ilustrados pelas figuras 2.4 e 2.5, montados na embarcação, são eles: *b-frame* e *s-frame*:

*b-frame*:

- Eixo-R, posicionado na direção proa popa e assume a condição horizontal quando o ângulo de *pitch* é zero;
- Eixo-P, posicionado na direção de boreste e assume a condição horizontal quando a ângulo de *roll* é zero;
- Eixo-Y, posicionado na direção vertical e assume essa condição quando ambos, *pitch* e *roll* são zero.

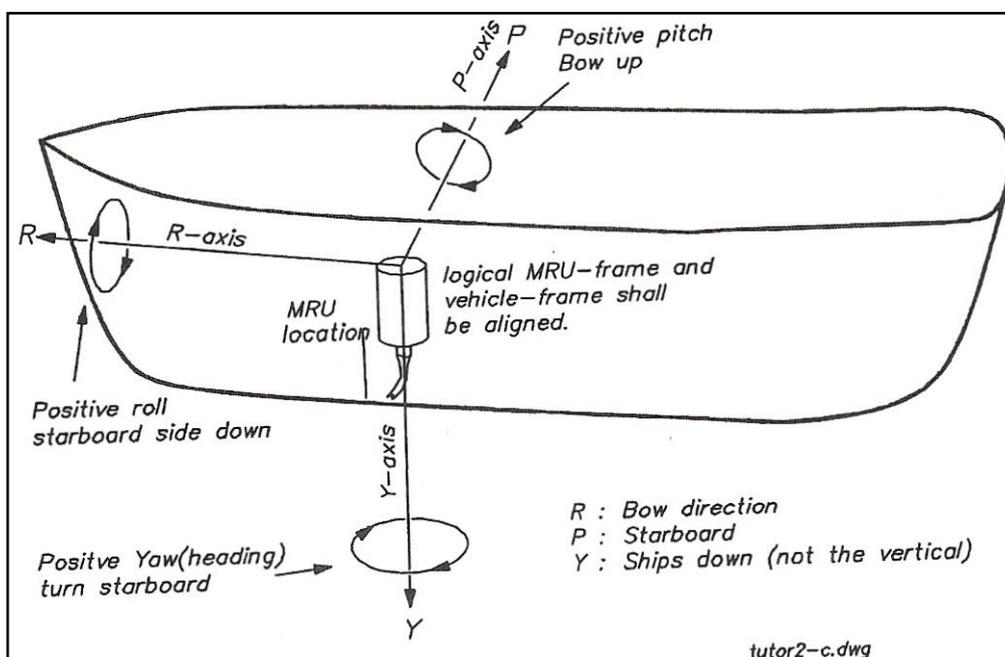


Figura 2.4 - Representação esquemática dos *Frames* nas embarcações. Fonte: Navia Maritime, 1999

*s-frame*:

- Eixo-R' referência da estrutura do sensor na direção e sentido de proa;
- Eixo-P' referência da estrutura do sensor na direção e sentido de boreste;
- Eixo-Y' referência da estrutura do sensor montado no plano vertical inferior.

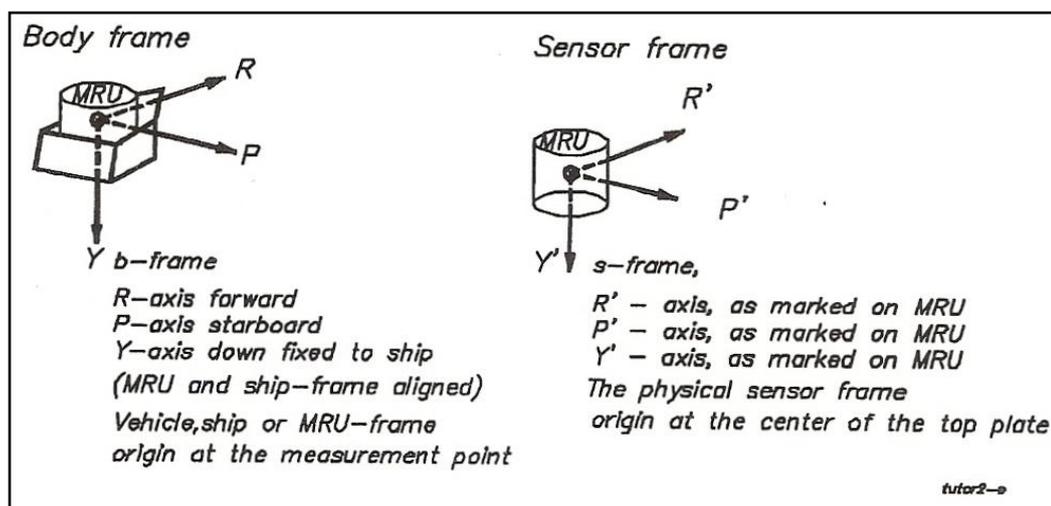


Figura 2.5 – Eixos utilizados na montagem dos sensores. Fonte: Kongsberg SEATEX Manual, 1999

### 2.2.2.2 Descrição do diagrama de blocos do M.R.U. para o processamento dos valores do heave.

O diagrama de blocos apresentado pela figura 2.6, ilustra o funcionamento da uma unidade M.R.U. que se encontra instalado na SEDCO 710. Os deslocamentos linear e angular da embarcação, ou veículo considerado, são registrados e transformados em sinais elétricos pelas unidades *Linear Acceleration Sensor*, e *Angular Rate Sensor*. Esses sinais passam por um circuito eletrônico integrador de dois estágios localizado no módulo *sensor and interface* (Fig. 2.6). Essa informação elétrica é então processada no módulo *computing unit* onde são executadas os modelos matemáticos que resultam nas informações de amplitude das ondas disponibilizadas no módulo *user interface* que possui uma saída digital por meio do conector RS-232, e outra analógica em 4 canais.

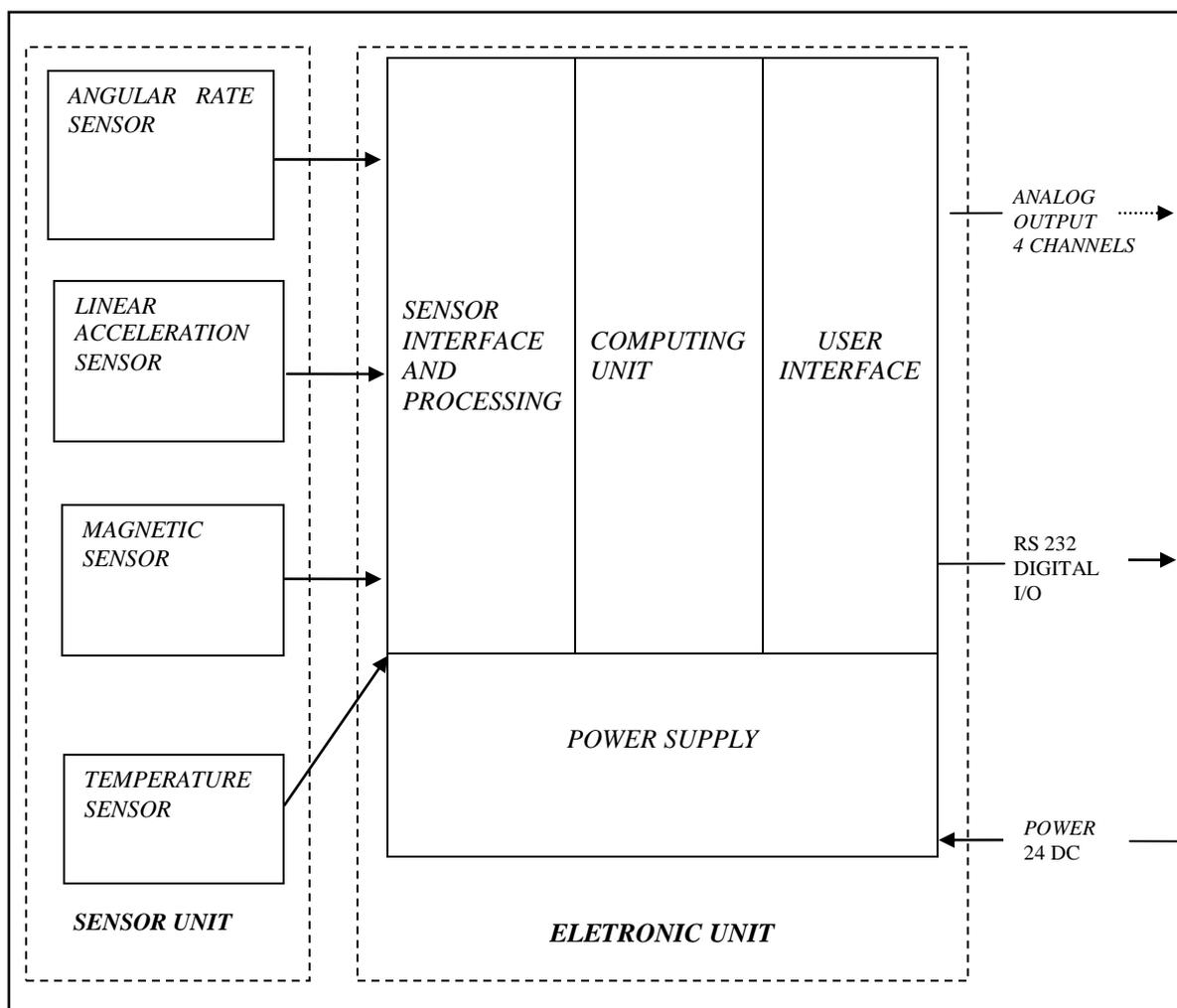


Figura 2.6 – Diagrama de blocos do SEATEX M.R.U. Fonte: Navia Maritime, 1999

Os valores amplitude da onda, são disponibilizadas no painel de controle, localizado na ponte de controle da plataforma.

### 2.2.2.3 Princípio de Funcionamento dos Sensores do M.R.U.

#### *Angular Rate Sensor*

No M.R.U. a informação de aceleração angular é obtida no *módulo angular rate sensor* que mede a taxa de vibração angular baseada no força de Coriolis. Esses sensores utilizam movimento vibratório linear ao invés do movimento rotacional. Esse sensor é,

basicamente um giroscópio de Coriolis baseado na vibração de um cilindro, a figura 2.7 ilustra o referido sensor. Transdutores sísmicos estão montados na carcaça do sensor e defasados de  $45^\circ$  entre si, cada um deles possui uma função específica representada pelos eixos c, d, f, e s. O eixo d é utilizado para excitação, a referência do loop de controle é medida no eixo c. Esta excitação cancela a vibração produzida pelo movimento ao longo do eixo s provocada pela aceleração de Coriolis,  $a_c$  que é o que se mede efetivamente, ou seja, o sinal de controle do eixo c é a saída do sensor. A figura 2.7 ilustra o funcionamento do sensor da variação angular.

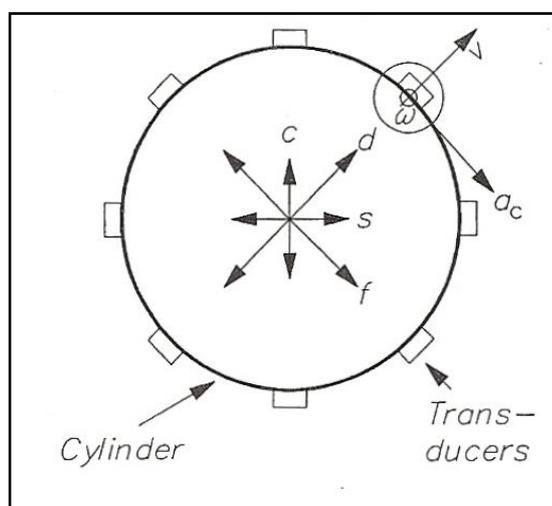


Figura 2.7 – Sensor de variação angular baseada na aceleração de Coriolis. Fonte: Kongsberg SEATEX *Manual*, 1999

### *Linear Acceleration Sensor*

Os acelerômetros que estão no módulo *linear acceleration sensor* são basicamente pêndulos de grande precisão. Um elemento de prova gravado em quartzo é mantido em uma determinada posição por um sistema eletrônico servo alimentado durante o movimento do pêndulo que produz uma aceleração. Essa aceleração é determinada pela medição da corrente necessária para manter esse elemento de prova em sua posição original. A corrente será diretamente proporcional à aceleração linear. A figura 2.8 ilustra o referido sensor.

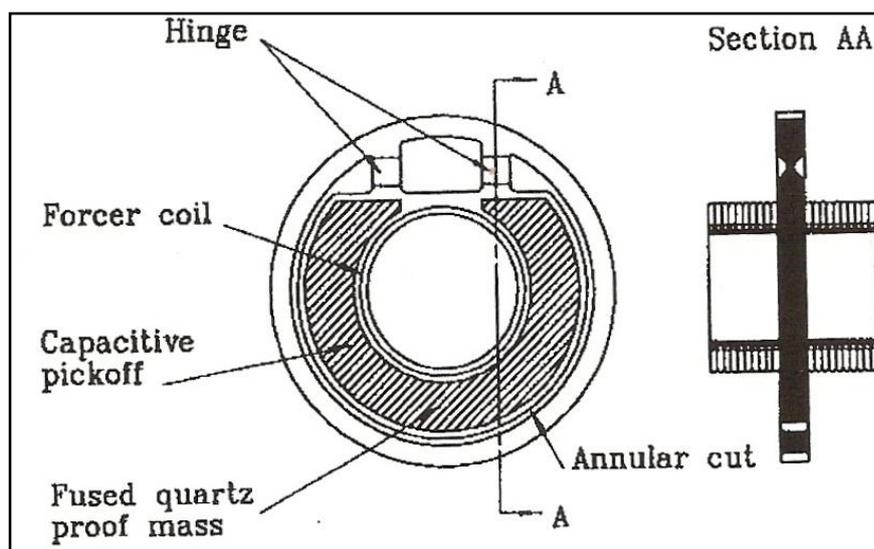


Figura 2.8 – Sensor de aceleração linear. Fonte: Kongsberg SEATEX *Manual*, 1999

### *Magnetic Sensor*

Os sensores magnéticos ou magnetômetros são baseados no princípio do servo fluxgate. Isso consiste em um sistema de bobinas do tipo Helmholtz montada em 3 eixos, que cancela o campo magnético externo. A saída do sensor será, desse modo, constituído por 3 correntes contínuas com 3 campos magnéticos associados. A relação entre a corrente e campo magnético em meio não ferromagnético é linear e dada pela lei de Biot Savart. Um detector de campo zero é colocado dentro deste sistema de bobinas e cria uma referência ao fluxo produzido pelas corrente contínua nas bobinas de Helmholtz. A detecção de valores diferentes de zero é realizada por um fluxgate tradicional baseado em um núcleo metálico ferromagnético não ortogonal.

### *Temperature Sensor*

Este sensor consiste num circuito integrado (C.I.) que envia sinais elétricos a outro C.I. que, por sua vez, informa o valor da temperatura ambiente, por meio de sinais analógicos. Esse dois C.I.'s estão conectados a um conversor analógico/digital que transforma esse sinal analógico em informações binárias que irão alimentar a unidade de processamento do M.R.U..

A função desse sensor é fornecer informação da temperatura para que se possa calibrar os outros sensores em diferentes níveis de temperatura.

#### 2.2.2.4 Processamento dos sinais para obter os valores de *heave*

Se a medida da aceleração fosse infinitamente precisa, bastaria integrar duas vezes a mesma para obter-se a posição real do veículo, mas o problema é basicamente, subtrair o componente da gravidade ( $g$ ) da aceleração medida. Para isso, faz-se necessário, também, conhecer a orientação, da ação da força da gravidade relativo à embarcação, esse trabalho é feito pelo *angular sensor rate*, que produz informações da orientação do vetor- $g$ . A subtração do vetor- $g$  é realizada numa plataforma mecânica estabilizada onde estão montados os acelerômetros (*linear acceleration sensor*). Uma propriedade fundamental do M.R.U. é que é mais fácil remover a influência do vetor- $g$  na componente vertical do que na componente horizontal do vetor aceleração. O pequeno erro na medida de *pitch* e *roll* resulta no seguinte erro na componente horizontal do vetor aceleração (Kongsberg SEATEX *Manual*, 1999).

$$a_{err} = g \cdot \delta \phi, \quad (2)$$

Do mesmo modo erros na medida do *heave* que resultam no cálculo do erro para o componente vertical do vetor aceleração é calculado do seguinte modo (Kongsberg SEATEX *Manual*, 1999):

$$a_{err} = 0,5 \cdot \delta \phi^2, \quad (3)$$

As equações 2 e 3 apresentam os erros de medidas, onde  $a_{err}$  é o erro do vetor aceleração em  $m/s^2$  e  $\delta\phi$  é o ângulo de *pitch* e *roll* e é dado em radianos. Pequenos erros na aceleração serão integrados em longos períodos de tempo, assim torna-se necessário manter esses inevitáveis erros sob controle introduzindo-se um filtro passa-baixas conforme ilustra o circuito na figura 2.9, para que os valores de referência de velocidade e posição sejam mantidos sempre em zero. Isso significa que, se não houver movimento, o sistema reiniciará lentamente com posição e velocidade em zero.

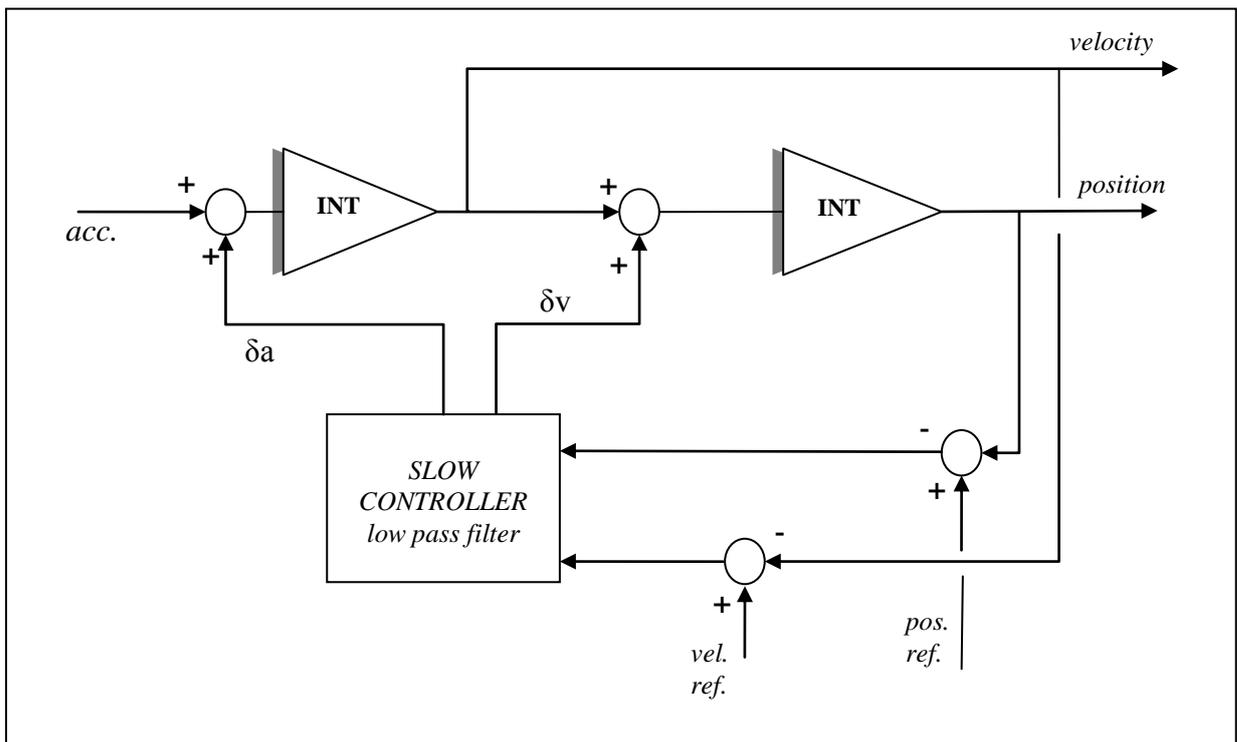


Figura 2.9 – Representação esquemática do circuito integrador fornecendo informações de velocidade e posição do veículo. Fonte: Kongsberg SEATEX *Manual*, 1999.

A tabela 2.1 apresenta os valores de frequência de corte adequada ( $f_c$ ), e fator Damping normalmente ajustados em filtros passa-baixas e sua respectiva aplicação nos veículos mencionados. A plataforma SEDCO 710 enquadra-se no item *Rigs & non cruising-ships*, assinalado.

Tabela 2.1 – Seleção da frequência de corte e fator damping para medidas de *heave*. Fonte: KONGSBERG SEATEX MANUAL, 1999

<i>Application</i>	$f_c$ [Hz]	$\epsilon$
<i>General purpose</i>	0,01	0,6
<i>Rigs &amp; non-cruising ships</i>	0,004	0,45
<i>Large ships, cruising</i>	0,007	0,6
<i>Small ships, cruising</i>	0,01	0,8
<i>ROV's, towfishes &amp; buoys</i>	0,03	1,0
<i>High speed vessels</i>	0,03	0,8
<i>Small survey boat</i>	0,03	0,8
<i>Hydrographic survey</i>	0,01	0,7

A maior dificuldade para medidas de *heave* são movimentos de baixa frequência, períodos acima de 20 segundos ou alta frequência, períodos abaixo de 10 segundos. Desse modo sintoniza-se no modo *under-damping* o filtro, ou seja, para deixar passar frequências um pouco abaixo da frequência de corte ( $f_c$ ). Esse procedimento tem por objetivo melhorar a resposta em fase do filtro. O MRU da SEDCO 710 é sintonizado numa frequência de corte, de 0,1 Hz, embora a tabela indique 0,004 Hz para plataformas, quando os filtros são sintonizados em frequência muito baixas como a indicada na tabela o tempo de resposta do M.R.U. é muito lento, aumentando também o tempo de processamento e resposta ao movimento da embarcação.

A função de transferência (ANEXO 2) de segunda ordem para os filtros é mostrada na equação (4) (Kongsberg SEATEX Manual, 1999), a frequência de corte pode ser sintonizada separadamente para cálculo do *heave*, *sway* e *surge*, a função de transferência informa a amplitude e fase do sinal elétrico que processado irá informar o valor do deslocamento linear, sendo  $H_v(s)$  função de transferência para a velocidade (saída), e  $H_p(s)$  função de transferência para a posição (saída), vertical (*heave*) e horizontal (*surge* e *sway*)

$$H_v(s) = \frac{s}{s^2 + 2 \cdot \omega_c \cdot s + \omega_c^2} \quad (4)$$

Onde  $\omega_c$  é  $2 \cdot \pi \cdot f$ , sendo  $f$  a frequência de corte sintonizada conforme equação 5 (Kongsberg SEATEX *Manual*, 1999).

$$H_p(s) = (H_v(s))^2, \quad (5)$$

Segundo o manual da Kongsberg SEATEX, o melhor desempenho do M.R.U. para medidas de *heave* é para ondas com período menores que 20 s e maiores que 10 s. Esse ajuste de frequência de corte dos filtros pode ser feito manualmente ou automaticamente no M.R.U..

## CAPÍTULO 3

### MEDIDAS DE VELOCIDADE DOS VENTOS, AMPLITUDE DAS ONDAS E ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS MEDIÇÕES

#### 3.1 MEDIÇÕES DAS CONDIÇÕES DE MAR E VENTOS NA BACIA DE CAMPOS, RIO DE JANEIRO

Entre Outubro de 2006 e julho de 2007 foram feitas coletas de dados de uma região localizada na bacia de Campos no entorno das seguintes coordenadas geográficas  $22^{\circ} 21,649'$  S  $40^{\circ} 04,095'$  W, conforme ilustra a figura 3.1.



Figura 3.1 – Localização geográfica da Plataforma de Perfuração SEDCO 710. Fonte: EARTH GOOGLE, 2007

As amostras foram registradas a cada 06 (seis) horas diariamente, quando foram monitoradas a velocidade e direção dos ventos bem como a intensidade das rajadas, velocidade e direção da corrente marinha , “*heave*” “*pitch*” e “*roll*”.

Os dados da tabela 3.1 estão apresentados no mesmo formato em que são disponibilizados no monitor do painel de controle da Kongsbreg SEATEX. As informações que serão efetivamente utilizadas são: Velocidade do vento, rajadas e o movimento vertical da plataforma, *heave*.

Tabela 3.1 – *Heave, pitch, roll, current* coletados pelo sistema de posicionamento dinâmico Kongsberg SEATAX operando na plataforma de perfuração e completação SEDCO 710, no entorno das seguintes coordenadas geográficas, 22° 21,649’ S 40° 04,095’ W

Tempo Data	Ventos ( <i>Knots</i> × <i>From</i> )			Corrente ( <i>Kn.To</i> )		MRU		
	Veloc. ( <i>knots</i> )	Rajadas ( <i>knots</i> )	Direção (°)	Veloc. ( <i>knots</i> )	Direção (°)	<i>Pitch</i> (°)	<i>Roll</i> (°)	Amplit. (m)
Out., 06	14,93	17,53	054	0,32	176	0,56	0,62	0,62
Nov., 06	13,93	17,00	148	1,02	179	0,66	0,78	0,70
Dez., 06	15,36	18,60	97	0,53	140	0,63	0,62	0,71
Jan., 07	18,52	21,84	150	0,92	147	0,67	0,77	0,8
Fev., 07	14,77	16,92	077	1,59	188	0,61	0,86	0,56
Mar., 07	17,00	19,14	054	1,68	162	0,64	0,76	0,59
Abr., 07	16,28	18,68	040	1,22	221	0,52	0,62	0,51
Mai, 07	14,41	16,61	120	0,57	180	0,92	0,98	0,8
Jun., 07	14,35	16,65	141	1,12	194	0,89	0,88	1,02
Jul., 07	16,00	18,23	118	0,93	153	1,04	0,96	1,01

Essas informações foram trabalhadas obedecendo aos fundamentos estatísticos que serão apresentados na seqüência

### 3.2 INTRODUÇÃO A TEORIA ESTATÍSTICA

Tendo como parâmetro essas informações, foram construídos alguns gráficos estatísticos para análise do comportamento dados registrados ao longo do referido período. O método gráfico utilizado para demonstrar esse comportamento foi o histograma.

Segundo SHIMAKURA (2001), é de longe o método mais comum de apresentação de dados numéricos, o **histograma**, relacionado com o gráfico de barras para dados categóricos. As áreas dos retângulos resultantes devem ser proporcionais à frequência. Algumas vezes é conveniente agregar classes de frequência nos extremos da distribuição de forma que os intervalos tenham larguras diferentes. No entanto, deve-se observar que, ao fazer isto, um intervalo que é duas vezes a largura de um outro deve ter altura igual à metade de sua frequência (para preservar a área contida dentro do intervalo). Da mesma forma, um intervalo que é três vezes a largura dos outros deve ter um terço da altura de sua frequência observada.

Conforme ensina BASTOS (2001), o histograma mostra o número de vezes que um determinado valor numa coluna selecionada está incluso dentro de um especificado valor. O Histograma, é um dos métodos gráficos mais utilizados para apresentar informação. Agrupando os dados em células, evidencia-se a frequência das ocorrências e a dispersão entre os valores superiores e inferiores dos dados. Os histogramas são especialmente usados, quando se pretende analisar um grande volume de dados, realçando o impacto visual da informação. É possível obter informações úteis do estado ou comportamento dos dados a partir do estudo da forma do histograma como mostra a Figura 3.2.

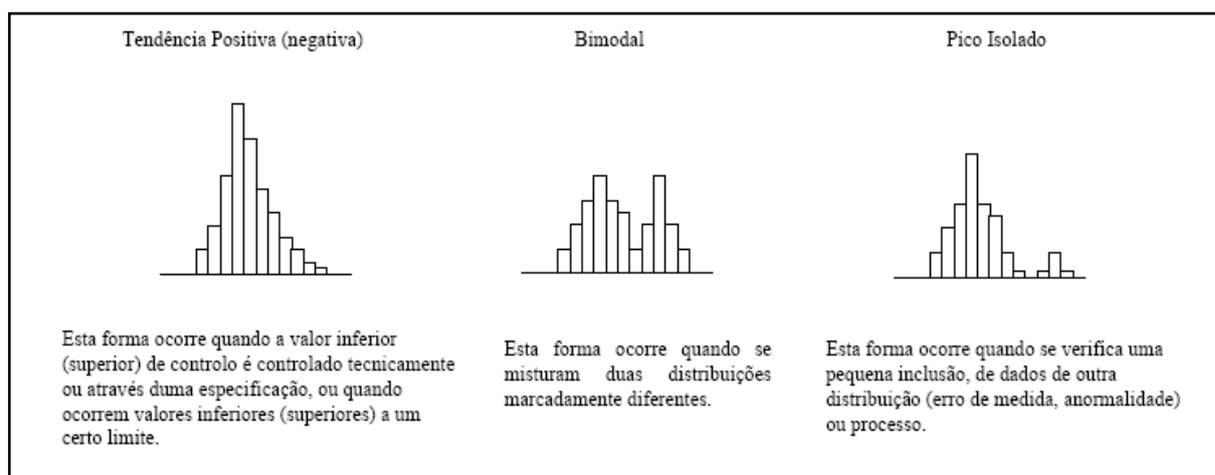


Figura 3.2 – Características do gráficos estatísticos dos histogramas. Fonte: BASTOS, 2001

As formas apresentadas na figura 3.2 são definidas como segue:

- **Tendência Positiva (negativa):** Observa-se quando o valor inferior (superior) de controle é manipulado tecnicamente, através de uma especificação ou quando ocorrem valores inferiores (superiores) a um determinado limite;
- **Bimodal:** Ocorre quando se misturam duas distribuições marcadamente diferentes;
- **Pico Isolado:** É observado quando se verifica uma inclusão de dados de outra distribuição (erro de medida, anormalidade) ou processo.

As formas apresentadas na figura 3.3 são definidas como segue:

- **Tipo Geral:** Apresenta queda abrupta à direita e esquerda. É a forma mais usual de apresentação de histogramas;
- **Tipo Multi Modal:** Ocorre quando o número de unidades varia de classe ou quando se efetuaram arredondamentos com certa tendência.

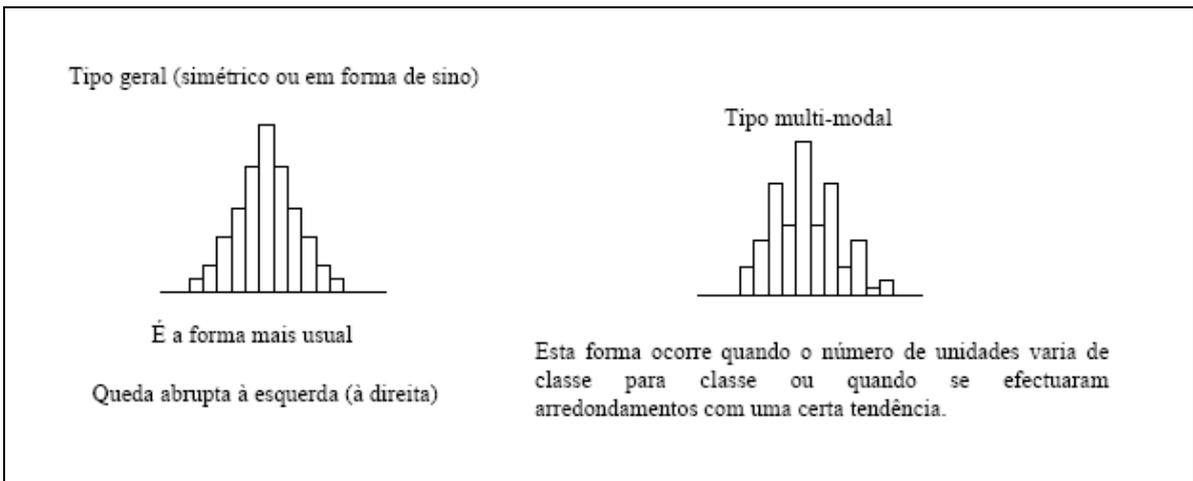


Figura 3.3 – Interpretação da representação gráfica do histograma, representação simétrica e multi modal. Fonte: BASTOS, 2001

A figura 3.4 ilustra um histograma com características de queda abrupta à esquerda e outro do tipo planalto.

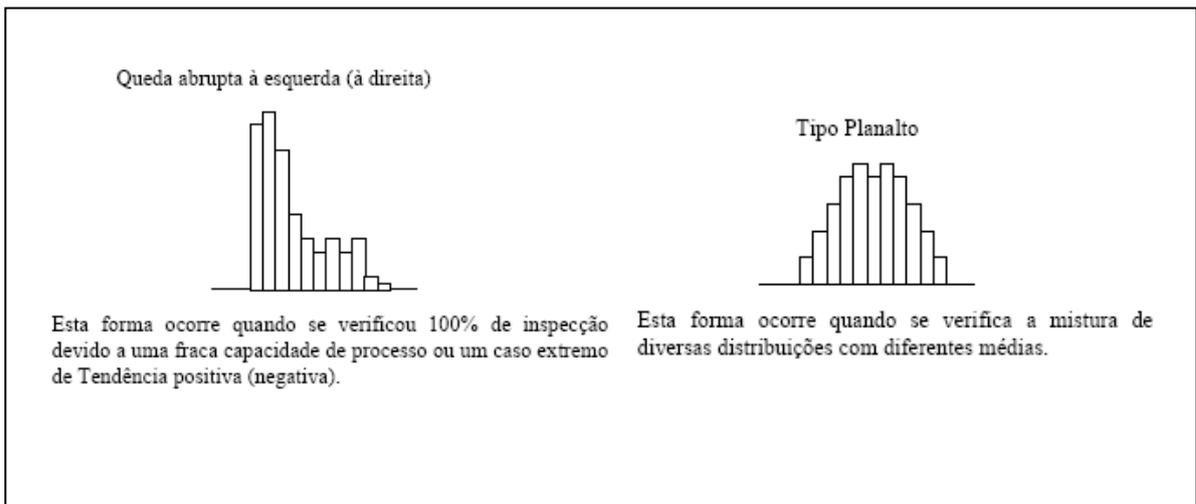


Figura 3.4 – Interpretação da representação gráfica do histograma, representação do histograma tipo planalto e de queda abrupta com tendência negativa. Fonte: BASTOS, 2001

Existem ainda as medidas de tendência central de uma distribuição que é um valor numérico que descreve a posição central dos dados e como estes tendem a distribuir no centro. As três medidas mais utilizadas são: Média aritmética, Mediana e Moda.

### 3.2.1 MÉDIA ARITMÉTICA

É o somatório do valor das amostras pelo número de unidades dessas amostras analisadas e pode ser expressa pela equação 6:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}, \quad (6)$$

Onde  $X_i$  é o valor da amostra,  $n$  é o número de unidades da amostra e  $\bar{X}$  é a média aritmética.

### 3.2.2 MEDIANA

É um valor situado no centro da distribuição de freqüências. A distribuição tem, portanto, como objetivo encontrar um valor que permita conter 50% dos dados acima deste valor e 50% abaixo. A mediana é especialmente útil quando se trata de séries assimétricas, isto é, quando alguns valores são elevados ou baixos em relação aos demais. A mediana não é influenciada pela magnitude de cada uma dessas séries. Para o cálculo da mediana deve-se previamente realizar alguns ajustes aos dados como segue:

Ordenam-se todos os valores, de forma crescente; Determina-se o total de valores ( $n$ ); Localiza-se o valor central mediante a fórmula:  $\frac{n+1}{2}$ , quando o número de observações ( $n$ ) for ímpar e  $\frac{n}{2}$  e  $\frac{n}{2} + 1$  quando o número de observações é par, o que corresponde à média dos valores centrais.

### 3.2.3 MODA

A Moda de um conjunto de números é o valor que ocorre com mais frequência. A moda pode não existir e pode ter mais de um valor. Uma distribuição com uma só moda é chamada unimodal, com duas modas, bimodal e com mais de duas modas, multimodal. Para dados agrupados numa distribuição de frequência, a moda é aproximadamente o valor central da célula com maior frequência.

### 3.2.4 RELAÇÃO ENTRE MÉDIA, MEDIANA E MODA

Quando as distribuições são simétricas os valores da Média, Mediana e Moda são idênticos. Senão evidentemente apresentarão curvas diferentes como ilustra a figura 3.5.

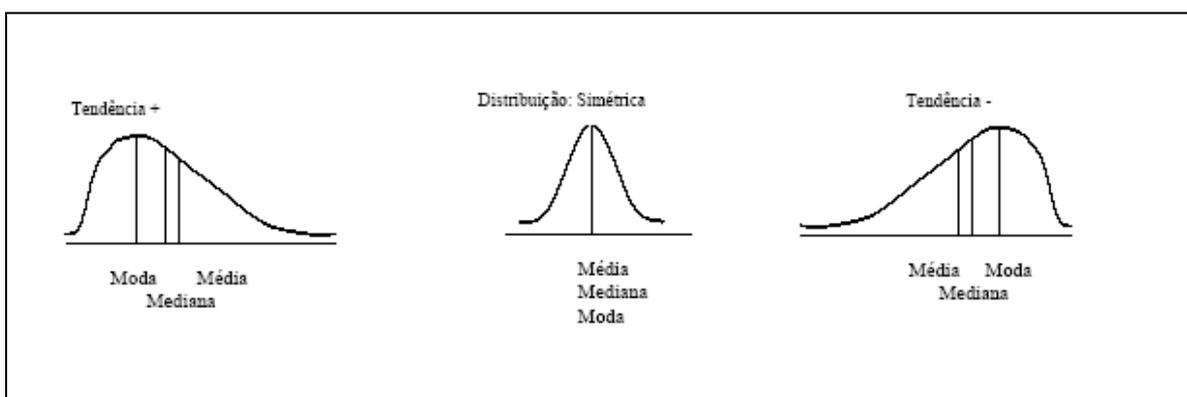


Figura 3.5 – Representação da distribuição gráfica da mediana média e moda. Fonte: BASTOS, 2001

A Média é o valor de tendência central mais utilizado. Por vezes, utiliza-se a Mediana com distribuições, com tendências positivas ou negativas acentuadas, e a Moda quando se pretende uma rápida estimativa da tendência central.

### 3.2.5 DESVIO PADRÃO

Para determinar a dispersão de uma série de medidas poder-se-ia usar a soma de todos os desvios  $d_i = X_i - \bar{X}$  dos valores com relação à média dividido pelo número de valores, assim obtendo uma média dos desvios. Entretanto, como esta soma é nula ( $\sum_i d_i = 0$ ), usa-se a soma dos desvios ao quadrado, pois se elevando ao quadrado, perde-se a informação do sinal. Deste modo, define-se a **variância** de acordo com a equação 7.

$$s = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \quad (7)$$

Além disso, como a variância é uma medida que envolve o quadrado das quantidades, é comum usar a raiz quadrada da variância, chamado de **desvio padrão**, conforme equação 8.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (8)$$

#### 3.2.5.1 Interpretação do desvio padrão

O desvio padrão indica a dispersão dos dados dentro da amostra, isto é, o quanto os dados em geral diferem da média. Quanto menor o desvio padrão, mais parecidos são os valores da série estatística. Numa distribuição normal e simétrica, o desvio padrão calculado informa onde estão localizados os valores da amostra, em torno da média, da seguinte maneira:

- 68% dos valores da série estão até 1 desvio padrão de distância da média, isto é, estão entre  $\bar{X} - s$  e  $\bar{X} + s$ .
- 95% dos valores da série estão até 2 desvios padrão de distância da média, isto é, estão entre  $\bar{X} - 2s$  e  $\bar{X} + 2s$ .
- 99.7% dos valores da série estão até 3 desvios padrão de distância da média, isto é, estão entre  $\bar{X} - 3s$  e  $\bar{X} + 3s$ .

Assim, para simplificar, assumamos uma série estatística relativa a alguma medida de uma população e cujos valores têm média  $\bar{X} = 100$  e desvio padrão  $s = 10$ . De acordo com as afirmações acima, pode-se dizer que 68% da amostra tem valores entre 90 (100-10) e 110 (100+10); da mesma forma, pode-se dizer que 95% da amostra tem valores que se situam entre 80 (100-2\*10) e 120 (100 + 2\*10); finalmente, 99.7% situa-se entre 70 (100-3\*10) e 130 (100+3\*10). A média de uma série estatística frequentemente é especificada mostrando-se o desvio padrão junto, na forma,  $\bar{X} \pm s$  que indica a dispersão da amostra. No caso de uma série de medidas de uma mesma quantidade, o desvio padrão indica a incerteza nas medidas, ou o erro associado. Por isso, pode-se usar o desvio padrão para determinar os algarismos significativos de uma série de medidas. Por exemplo, se para várias medidas de uma mesma quantidade em laboratório obteve-se para valor de média  $\bar{X} = 15,943$  e para desvio padrão o valor  $s = 2$ , um trabalhador descuidado escreveria  $\bar{X} \pm s = 15,943 \pm 2$ , entretanto o significado deste desvio padrão é que não se tem certeza se a média é, na verdade, 13 (15-2) ou 17 (15+2), então como se pode saber sobre as três casas decimais mostradas? Realmente, a parte decimal 0,943 deveria ser desprezada e escrever-se-ia somente  $\bar{X} \pm s = 15 \pm 2$ . No mesmo caso, se o desvio padrão fosse  $s = 0,2$  então poder-se-ia escrever a média até a mesma casa do desvio padrão, isto é,  $\bar{X} \pm s = 15,9 \pm 0,2$ , e assim por diante (FERRARI, 1999).

### 3.2.6 DISTRIBUIÇÃO NORMAL

A curva que resultaria da elaboração de um histograma de uma população (intervalo de classe muito pequeno e elevado Nº de observações) chama-se distribuição. Existem muitos tipos de distribuições, mas a mais típica e freqüente é a Distribuição Normal. Quando a variação de uma característica da qualidade se deve ao somatório de um grande número de fatores independentes, apresenta-se muitas vezes uma Distribuição Normal.

A Distribuição Normal permite prognosticar a distribuição de todo o processo e apresenta forma e características ilustradas pela figura 3.6.

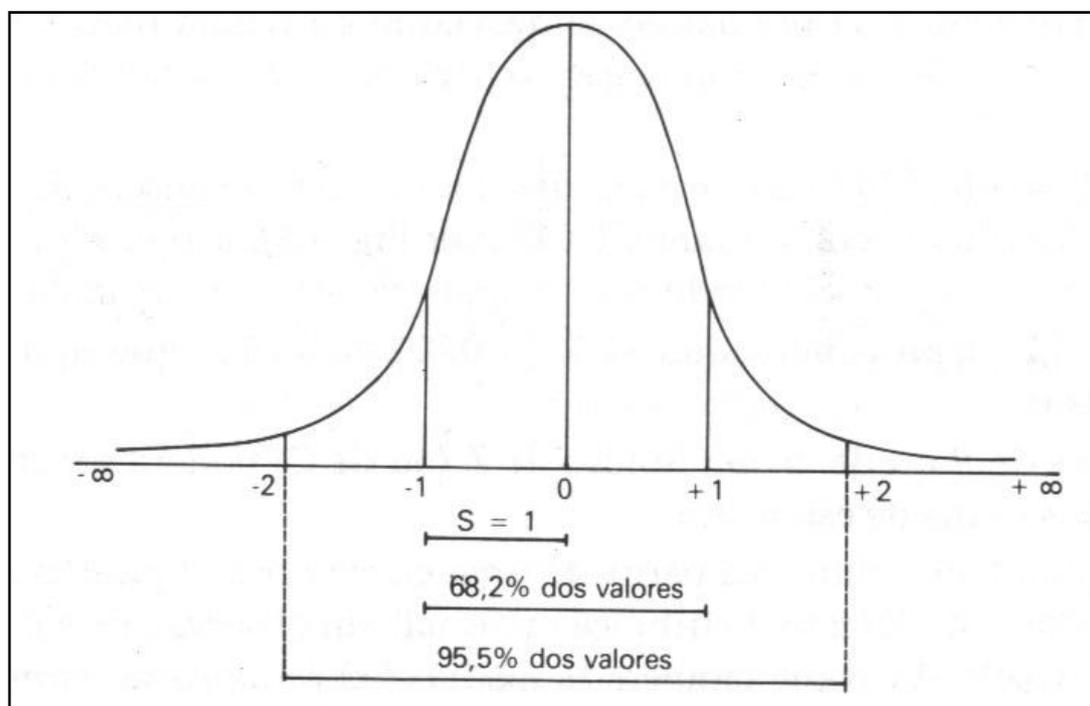


Figura 3.6 - Caracterização da distribuição normal. Fonte: RODRIGUES, 2006

### 3.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA DA VELOCIDADE DOS VENTOS, RAJADAS E AMPLITUDE DAS ONDAS NA PLATAFORMA SEDCO 710

A figura 3.7 ilustra as medidas da amplitude da onda na área considerada.

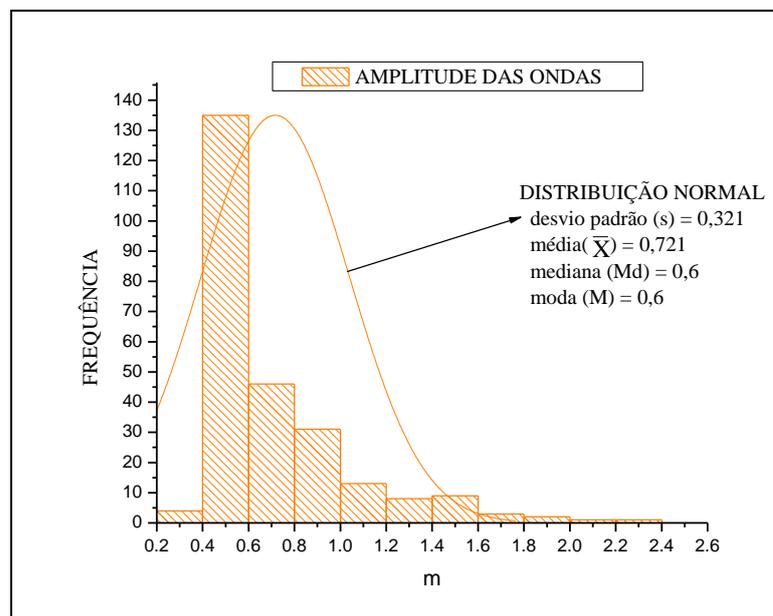


Figura 3.7 - Histograma do *Heave*

Na construção desse histograma foram analisadas amostras, que apresentaram uma queda abrupta à esquerda tendo assim um comportamento de tendência positiva o que sinaliza, conforme a fundamentação estatística, uma análise da mediana que foi calculada conforme a equação 7 e obteve-se 0,6 m. A moda apresenta o mesmo valor da mediana confirmando o valor de maior frequência no processo. A média, porém apresentou valor maior conforme se observa na figura 3.7. No entanto, utilizando-se valores do desvio padrão para análise das maiores ocorrências, observa-se grande oscilação já que se pode obter valores que oscilariam entre  $0,721 \pm 0,321$ , ou seja, 1,042 e 0,4 para 68% dos casos. Assim para calcular a potência para o sistema de bombeamento dos tensionadores valores intermediários entre a média, mediana e moda são os mais próximos dos valores mais frequentes na série

analisada. Desta forma, 0,6605 m será amplitude da onda utilizada no cálculo da potência do conjunto de tensionadores instalados na SEDCO 710.

A figura 3.8 constitui o histograma da velocidade do vento para a área considerada.

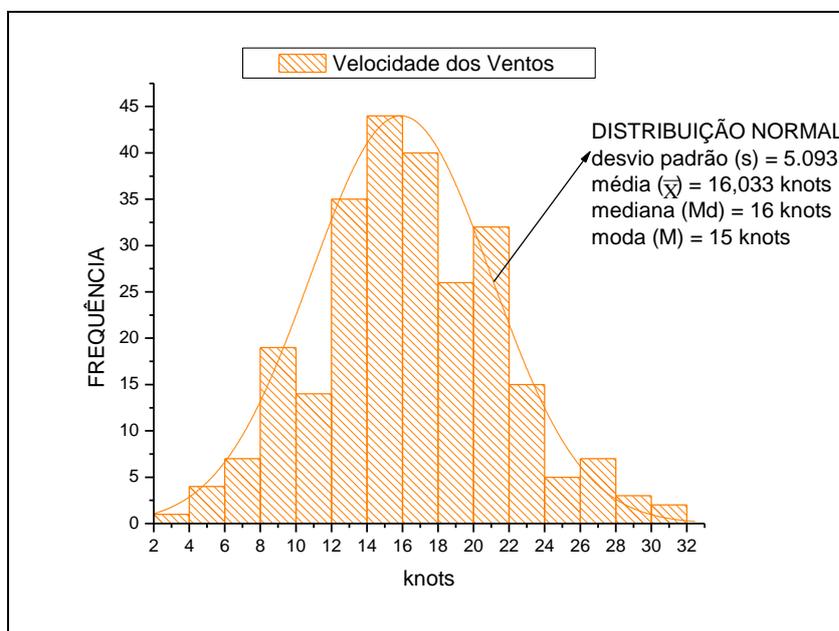


Figura 3.8 - Histograma da velocidade do vento

A mesma análise pode ser feita para o gráfico da velocidade dos ventos, no entanto observa-se, nesse caso, uma visível diferença na característica do histograma apresentado pela figura 3.8, quando comparada a figura 3.7. O histograma da figura 3.8 possui uma distribuição simétrica ou em forma de sino predominante, conseqüentemente apresenta valores de média, mediana e moda próximos, senão idênticos, como se pode observar na figura 3.8. O desvio padrão apresenta valores menores proporcionalmente aos apresentados na figura 3.7, o que diminui a incerteza quanto ao valor médio de velocidade do vento obtida em relação ao valor médio de amplitude de ondas encontrado na figura 3.7. Dessa forma pode-se considerar para efeito de dimensionamento das pás do aerogerador uma velocidade de vento predominante de 8,23 m/s (16 *knots*). Esse será o valor considerado no dimensionamento do comprimento das pás da turbina eólica sugerida para a plataforma SEDCO 710.

A figura 3.9 ilustra a distribuição de frequência das rajadas de vento na área considerada.

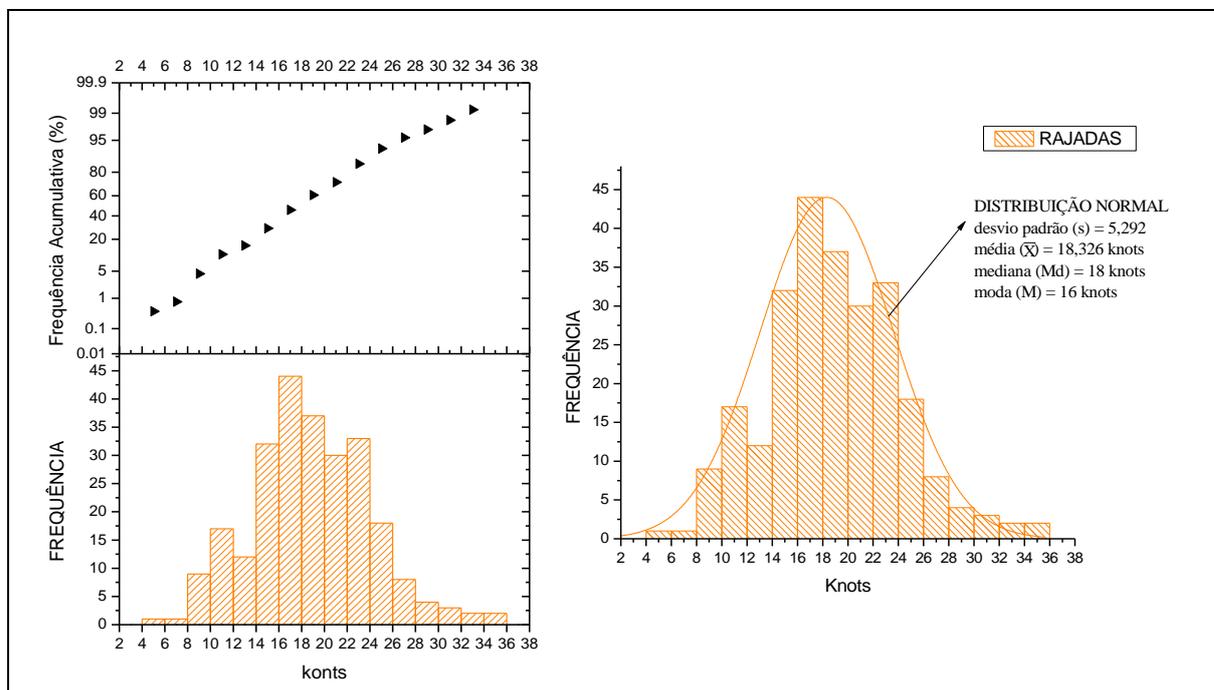


Figura 3.9 – Histograma e distribuição de frequências das rajadas de vento na plataforma SEDCO 710

Uma análise sobre os valores médios predominantes das rajadas é tão importante quanto a verificação da frequência acumulativa dos picos já que nesse caso os aerogeradores sairiam de operação para que não sofram avarias. O gráfico mostra a frequência dos picos críticos podendo-se estimar assim com que frequência o sistema de bloqueio deveria operar, e conseqüentemente, a frequência com que o sistema sairia de operação. É importante, porém conhecer a faixa de operação das pás, pois estas funcionam como um filtro passa-baixas. Isso significa que, quando ocorrem rajadas de vento com velocidades muito acima daquela para a qual elas foram dimensionadas, a máquina para de gerar e ocorre o processo de travagem evitando assim danos à máquina. No capítulo 1 seção 1.5.3 menciona-se alguns dos sistemas de travagem existentes. Fazendo uma análise no gráfico de frequência acumulativa percebe-se que, mesmo as rajadas em ambiente *offshore*, não possuem valores que se distanciam

substancialmente dos valores normais de velocidade registrados pelo gráfico da figura 3.8. Nota-se que, considerando o desvio padrão, atinge-se valores máximos de velocidade de 10,86 m/s (21,126 *knots*) com 68% de frequência e observa-se no gráfico da frequência acumulativa da figura 3.9 que apenas 10% restante de repetições estão acima deste valor.

A figura 3.10 ilustra a distribuição da velocidade dos ventos no referido período.

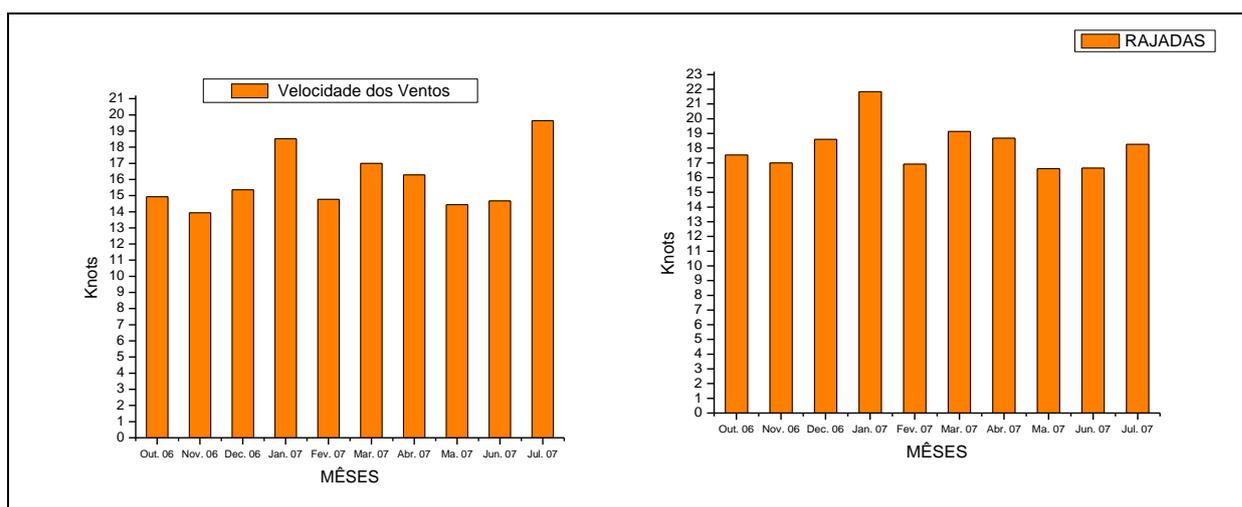


Figura 3.10 – Distribuição da velocidade dos ventos e rajadas de Outubro de 2006 a Julho de 2007 na plataforma SEDCO 710

Os gráficos apresentados na figura 3.10 mostram o comportamento dos ventos e rajadas no referido período. Pode-se assim, fazer projeções de produção, onde os meses de Janeiro, Março e Julho seriam os períodos de maior geração e Novembro, Fevereiro, Maio e Junho os de menor produção. Do mesmo modo pode-se preparar para problemas de manutenção provenientes das rajadas já que se observa maior atividade nos meses de Janeiro, Março e Abril.

A figura 3.11 ilustra a distribuição da amplitude das ondas no referido período.

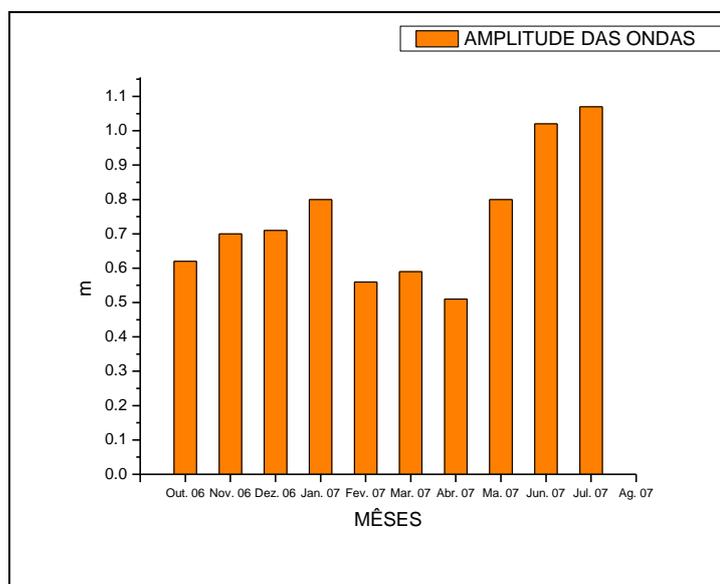


Figura 3.11 - Amplitude média das ondas entre o período de Outubro de 2006 e Julho de 2007, os dados foram obtidos a cada 06 horas

A mesma análise pode ser feita para o gráfico da figura 3.11, onde se observa boa produção entre os meses de Janeiro, Maio, Junho e Julho e baixa produção para os meses de Fevereiro, Março e Abril. Conclui-se assim que, apenas no mês de Fevereiro haveria baixa produção de energia, pois, nos meses restantes, haveria alternância entre os meios de produção eólicos e pela amplitude das ondas, indicando baixa oscilação na produção aumentando a confiabilidade do sistema.

## **CAPÍTULO 4**

### **SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PROPOSTO À PLATAFORMA SEDCO 710**

Na transformação da energia das ondas em energia elétrica foram sugeridas algumas mudanças para o sistema de tensionadores. As turbinas eólicas também serão dimensionadas com o objetivo de converter a energia dos ventos em energia elétrica. Será feita uma breve explanação de um sistema hidráulico padrão já que, basicamente, esses componentes serão utilizados na modificação proposta. Motores hidráulicos e acumuladores também serão mencionados. A análise específica começa na seção dos tensionadores onde será analisado o funcionamento de um tensionador padrão com suas especificações técnicas e funcionamento restrito à plataforma em estudo. Em seguida cálculos simplificados de potência dos motores hidráulicos que poderiam ser utilizados para acionar os geradores elétricos, serão mostrados ainda diagramas com as modificações propostas para os tensionadores em questão. O dimensionamento dos aerogeradores utilizando-se o limite de Betz, também será feito nesse capítulo.

#### **4.1 SISTEMA HIDRÁULICO BÁSICO**

Segundo LINSINGEN (2001), “um sistema hidráulico é um conjunto de elementos físicos convenientemente associados que, utilizando um fluido como meio de transferência de energia, permite a transmissão e controle de forças e movimentos”. As principais funções dos sistemas hidráulicos são as seguintes:

- Conversão de energia de uma forma (elétrica ou térmica) em energia mecânica útil;
- Controle de energia;
- Limitação de energia.

O sistema recebe, como entrada, energia mecânica (na forma de torque, rotação) convertida de energia elétrica ou térmica através de um motor elétrico ou de combustão interna. Em seguida, esta energia mecânica é convertida em energia hidráulica (potência hidráulica) pela unidade de conversão primária (UCP). A energia hidráulica transferida ao fluido hidráulico passa pela unidade de limitação e controle (ULC), onde é condicionada por válvulas, sendo em seguida transmitida à unidade de conversão secundária (UCS). O condicionamento da energia hidráulica na ULC é feito através das informações de limitação e controle, obtidas externamente ou por sinais de realimentação do próprio sistema.

Na UCS, a energia hidráulica devidamente condicionada é convertida em energia mecânica, expressas em termos de força e velocidade (ou deslocamento). Sistema Especialista Protótipo para auxílio na Seleção de Bombas Hidrostáticas ou torque e rotação (ou deslocamento angular). Esta energia é a saída do sistema, e é utilizada em acionamentos mecânicos para diversos fins (LINSINGEN, 2001).

Os principais componentes envolvidos em cada unidade de um sistema hidráulico são os seguintes:

- UCP: bombas de deslocamento positivo;
- UCS: motores e cilindros hidráulicos;
- ULC: válvulas.

A figura 4.1 mostra a estrutura de um sistema hidráulico genérico.

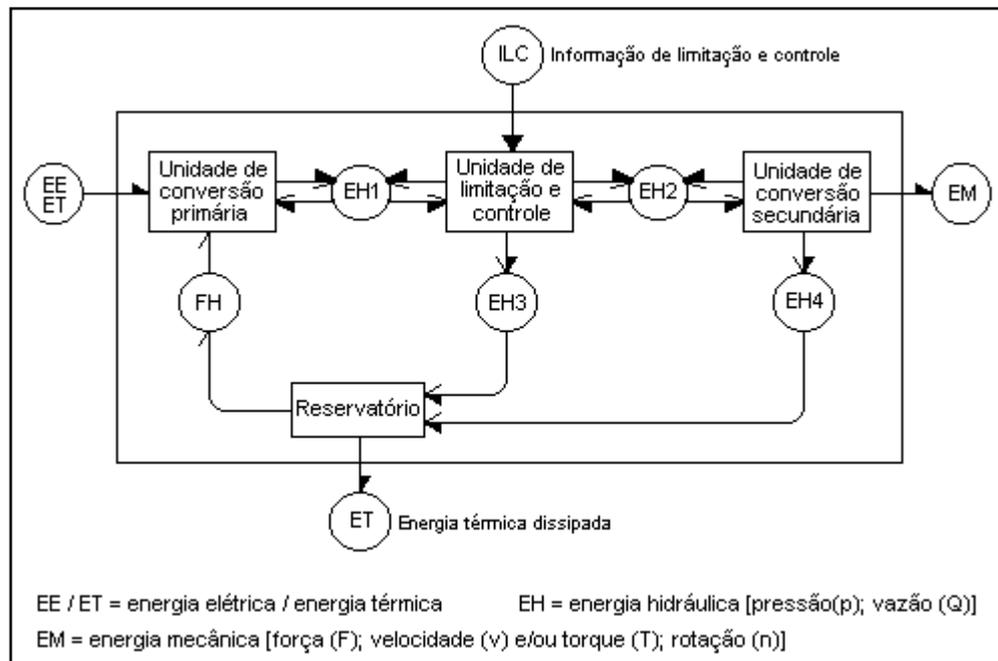


Figura 4.1 - Sistema genérico. Fluxos de energia, matéria e informação. Fonte: LINSINGEN, 2001

Para se escolher determinado sistema hidráulico, deve-se considerar principalmente os seguintes pontos:

- Preço, peso e restrições;
- Pressão de trabalho, faixa de velocidades de rotação;
- Condições de transporte e de instalação;
- Sentido de rotação único ou duplo;
- Faixa de temperaturas de funcionamento;
- Natureza dos fluidos hidráulicos a utilizar;
- Pulsação de deslocamento, ruídos;
- Rendimento do sistema, variações do deslocamento útil.

Um sistema hidráulico padrão deverá ter, pelo menos, os seguintes componentes:

- Reservatório;
- Tubulações;
- Bomba;

- Atuadores;
- Válvulas.

Nesse trabalho será feita a análise da capacidade de bombeio dos tensionadores para, a partir de então, dimensionar o restante do sistema. Assim essa análise seguirá a seguinte seqüência:

- Tubulações e Reservatório;
- Motor Hidráulico;
- Acumuladores;
- Tensionadores Compensadores de Movimento Vertical (*Heave*) da Plataforma;
- Mudanças proposta aos tensionadores da SEDCO 710 para geração de energia elétrica, com Diagrama Esquemático do Circuito Hidráulico Proposto (válvulas);
- Potência hidráulica recuperável pelos tensionadores e fornecida aos geradores elétricos.

## **4.2 RESERVATÓRIO E TUBULAÇÕES**

### **4.2.1 RESERVATÓRIO**

O calor é dissipado pelo contato do fluido com as paredes do reservatório. Quando as bolhas de ar chegam ao interior do líquido do reservatório, através da tubulação de retorno, elas sobem para a superfície devido à presença da pressão atmosférica. As impurezas são aprisionadas pelo *plug* magnético que é montado no fundo do reservatório, bem como pelo filtro montado na tubulação de sucção. A figura 4.2 ilustra um reservatório hidráulico padrão.

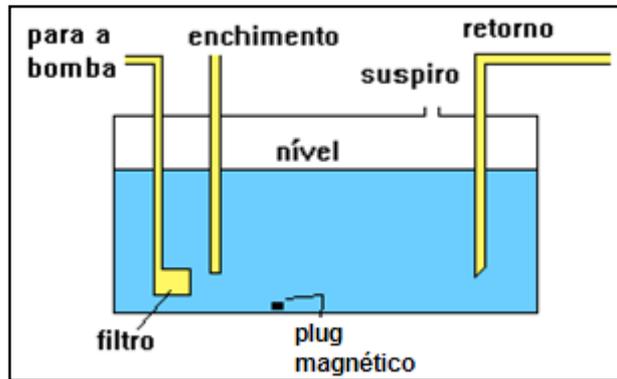


Figura 4.2- Reservatório hidráulico padrão. Fonte: FIALHO, 2006

Componente destinado a armazenar o fluido e que deverá possuir algumas características, tais como:

- I. Dissipar o calor do fluido;
- II. Separar o ar do fluido (desaeração);
- III. Separar as impurezas (descontaminação).

#### 4.2.2 TUBULAÇÕES

São os elementos de ligação entre os componentes de um sistema hidráulico. Servem de vias de circulação para o fluido e podem ser:

- De trabalho
  - i. Pressão: Por onde passa o fluido no estado pressurizado para realizar trabalho, está compreendida entre o cilindro do tensionador ao banco de acumuladores e do banco de acumuladores ao motor hidráulico;
  - ii. Sucção: Caminho pelo fluido a baixa velocidade e pressão compreendido entre os trechos do reservatório à entrada do cilindro do tensionador;
  - iii. Retorno: Trecho percorrido pelo fluido entre a saída do motor hidráulico e o reservatório.

- Secundárias
  - i. Dreno;
  - ii. Piloto.

### 4.3 MOTOR HIDRÁULICO

O motor hidráulico é um atuador rotativo, que tem por função básica converter a energia hidráulica em energia mecânica rotativa. A energia hidráulica fornecida para um motor hidráulico é convertida em mecânica sob a forma de torque e rotação. Construtivamente o motor assemelha-se a uma bomba, excetuando evidentemente, a aplicação que é inversa uma da outra. Existem casos inclusive em que o equipamento pode trabalhar ora como bomba ora como motor hidráulico. As características básicas de um motor hidráulico podem ser representadas, pela figura 4.3.

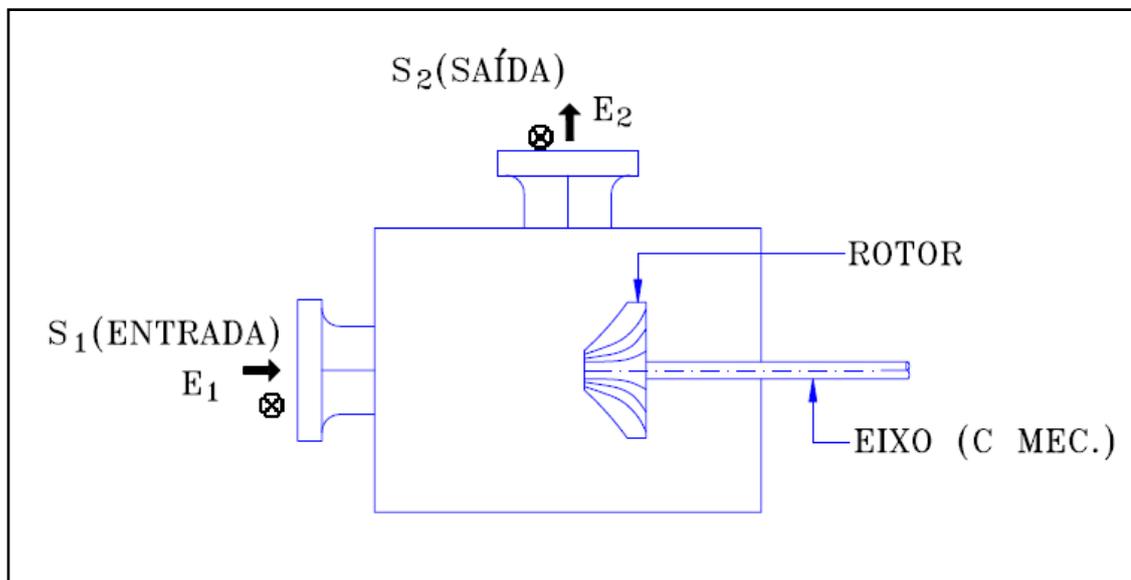


Figura 4.3 - Representação esquemática básica de um motor hidráulico. Fonte: LILIANE, 2007.

#### 4.3.1 TIPOS DE MOTORES HIDRÁULICOS

Assim como as bombas, os motores podem ser unidirecionais (um único sentido de rotação) ou bidirecional (rotações em ambos os sentidos). Podem ser de vazão fixa e variável.

Motores de Vazão Fixa.

- Engrenagens;
- Palhetas;
- Pistões (Axiais e Radiais).

Motores de Vazão Variável.

- Palhetas;
- Pistões (Radiais e Axiais).

No motor tipo engrenagem, ambas as engrenagens são acionadas, mas somente uma é ligada ao eixo de saída. No motor tipo palheta, todas as palhetas são acionadas pela pressão hidráulica, entretanto como não há força centrífuga no início de sua operação, molas ou balancins são freqüentemente usados atrás de cada palheta, para este fim. No motor tipo pistão, o fluido entra na metade dos furos dos pistões, força-os para fora, causando a rotação do bloco de cilindro e do eixo de acionamento. O motor tipo pistão é o mais utilizado de todos pois, possui uma inércia relativamente baixa, sua aceleração é rápida e pode adaptar-se facilmente nas aplicações onde reversões imediatas são desejadas. As figuras 4.4, 4.5 e 4.6 ilustram os tipos de motores hidráulicos mencionados.

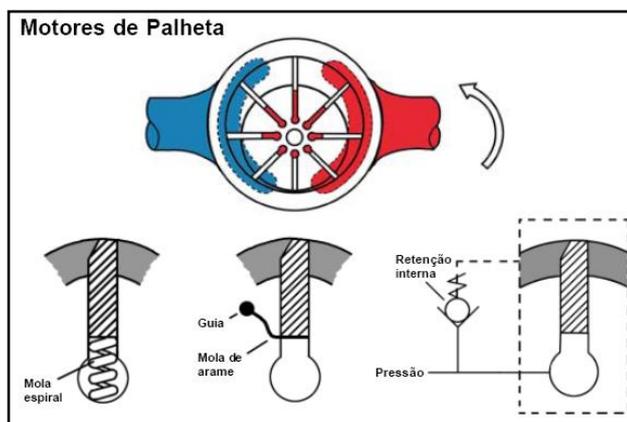


Figura 4.4 - Motor hidráulico do tipo palheta. Fonte: PARKER, 2006

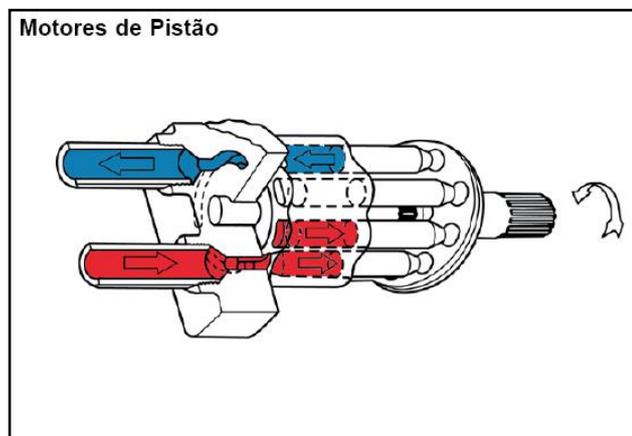


Figura 4.5 - Motor hidráulico do tipo pistão. Fonte: PARKER, 2006

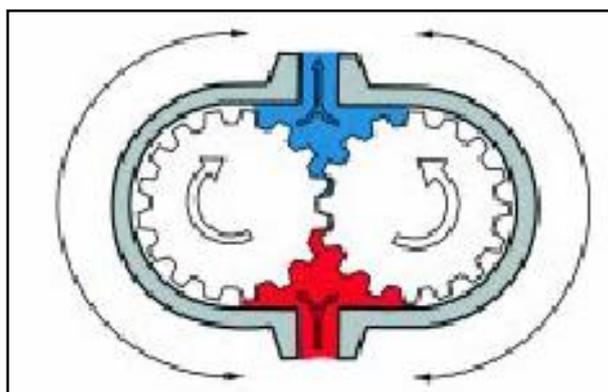


Figura 4.6 - Motor hidráulico do tipo engrenagem. Fonte: De NEGRI, 1998

#### 4.4 ACUMULADORES HIDRÁULICOS

A energia acumulada para realizar trabalho está sempre disponível e tem como características principais, alta vazão e movimentos de segurança em falhas elétricas. Os acumuladores utilizam a compressibilidade do gás nitrogênio, inerte quando em contato com o óleo sob alta pressão, a fim de evitar explosões. Os acumuladores podem ser carregados somente com nitrogênio de alta pureza classe 4.0, N<sub>2</sub> 99,99%. Este gás à alta pressão força o fluido para fora do acumulador quando há a redução de pressão hidráulica no sistema.

O fluido hidráulico, sob pressão, entra em uma câmara do acumulador de três modos distintos: comprimindo uma mola, um gás, ou levantando um peso. Qualquer queda de pressão na abertura de entrada criará uma reação no elemento, que forçará o fluido a sair. São basicamente três os tipos de acumuladores:

- Acumuladores com peso (age pela força da gravidade);
- Acumuladores de mola;
- Acumuladores com gás.

Estes acumuladores serão utilizados como fonte de potência, por isso os mais utilizados para esse objetivo são os acumuladores a gás do tipo bexiga que possuem as seguintes características:

- Garantia de uma perfeita separação entre a câmara correspondente ao gás e a destinada ao fluido;
- O elemento separador (bexiga de borracha) não apresenta praticamente inércia nenhuma;
- Por não existir nenhum deslizamento recíproco entre elementos metálicos, como nos tipos de molas, de peso e de pistão, não é necessário cuidado particular quanto ao mecanismo interno;
- Alta eficiência volumétrica, chegando a 75% do volume do acumulador.

Cada tipo de acumulador possui características específicas de dimensionamento. Como esse trabalho refere-se especificamente ao acumulador a gás do tipo bexiga, têm-se a seguinte relação de pressão e volume que trabalham em três estados distintos, são eles:

- $p_1V_1$ : É o estado de pressão e volume de pré-carga do acumulador;
- $p_2V_2$ : É o estado de pressão e volume em que se encontra o acumulador para condição de máxima pressão acumulada;
- $p_3V_3$ : É o estado de pressão e volume mínima de operação do sistema para a condição em que o volume do fluido hidráulico  $\Delta V$  fora descarregado.

Para a escolha correta de um acumulador do tipo bexiga elástica a ser utilizado como reservatório de energia, é importante observar os valores prescritos pelos fabricantes para as relações  $p_1$ ,  $p_2$ , e  $p_3$  que irão obedecer à necessidade de não submeter a bexiga a dilatações, nem a reduções excessivas de volumes o que seria nocivo à sua vida útil. O critério que estabelece a relação ideal entre as pressões absolutas são os seguintes (FIALHO, 2003):

$$0,30 \cdot p_2 \leq p_1 \leq 0,9 \cdot p_3 \quad (9)$$

$$\frac{p_2}{p_1} \leq 3 \quad (10)$$

Conhecendo-se o volume deslocado a cada período, pode-se dimensionar os acumuladores para que atuem com armazenadores de energia hidráulica. O objetivo nesse trabalho é manter uma pressão média constante aplicada ao motor hidráulico de 13,789 MPa (2000 psi). Para isso deve-se levar em conta a perda de carga no sistema já que os maiores níveis de pressão para acumuladores comerciais utilizados para armazenar energia hidráulica não ultrapassam 34,473 MPa (5000 psi), por isso todo o sistema de distribuição do fluxo

deverá ser dimensionado para uma perda máxima de 20,684 MPa (3000 psi), para esse tipo de acumulador.

O sistema, como será demonstrado na seção 4.7, consome 0,07372 m<sup>3</sup>/s (4.423,2 l/min.) de fluido hidráulico com pressão média de trabalho de 13,789 MPa (2000 psi), o dimensionamento do volume dinâmico do sistema depende, principalmente, que se estabeleça o espaço físico disponível com medições de comprimento de linha e localização precisa dos componentes da planta hidráulica, esse estudo não será feito nesse trabalho.

#### **4.5 TENSIONADORES COMPENSADORES DO MOVIMENTO VERTICAL (HEAVE) DA PLATAFORMA**

Como mencionado anteriormente, esse sistema funcionará pelo princípio de bombeamento, utilizando tensionadores modificados da plataforma de perfuração SEDCO 710. A plataforma tem um sistema de compensação do movimento vertical das ondas, que pode ser utilizado como uma bomba de fluido para os acumuladores. Para adaptar esse sistema de geração, o mesmo anel tensionador com *pig tails* será utilizado, conforme ilustra a Figura 4.7. Um equipamento semelhante, do tipo pistão será utilizado na realização do trabalho proposto, apenas algumas modificações serão feitas para possibilitar o bombeamento. A figura 4.8 ilustra o funcionamento de um sistema de compensação em plataformas e navios de perfuração de poços de petróleo.

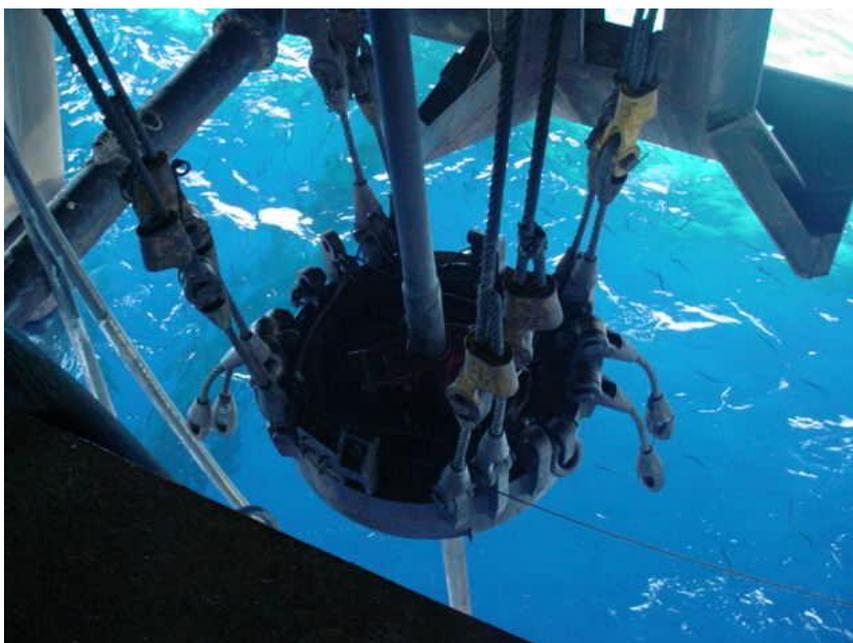


Figura 4.7 - Anel tensionador, interface entre o fundo do mar e a plataforma

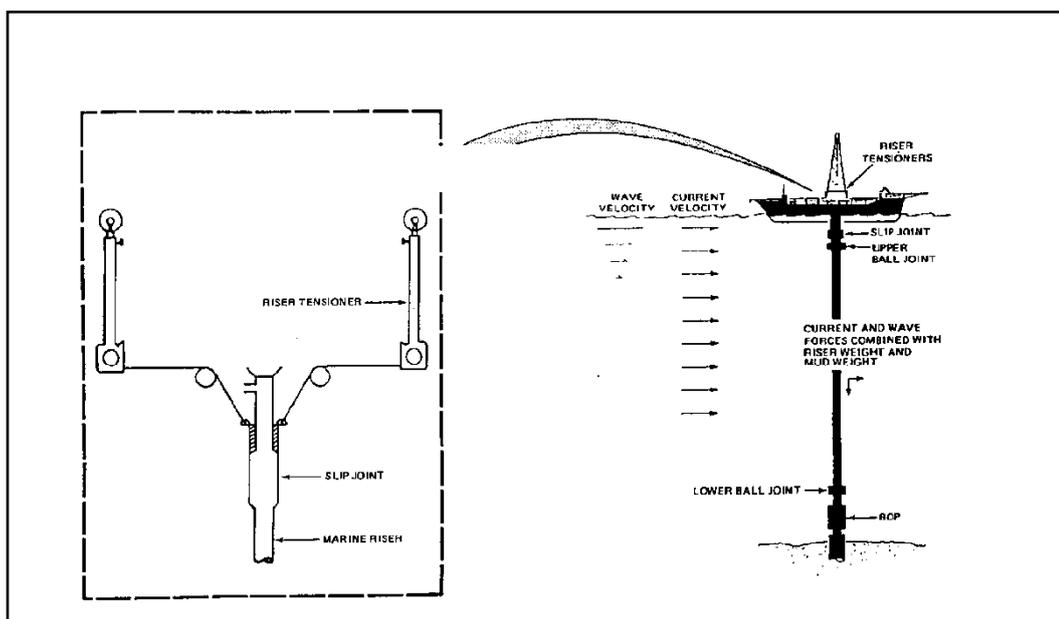


Figura 4.8 - Sistema de compensação do movimento vertical (*Heave*) da plataforma. Fonte: *Control Flow Inc.* 1997

A esses *pig tails* serão conectados os cabos dos tensionadores com polias e cabos ancorados. A plataforma SEDCO 710 possui dezesseis (16), unidades instaladas. Existem vários fabricantes espalhados pelo mundo desse tipo de equipamento, a *Control Flow Inc.*

forneceu, à época da construção da plataforma, os tensionadores que operam na sonda. A tabela 4.1 informa o tipo dos tensionadores que se encontram instalados na sonda SEDCO 710.

Tabela.4.1 – Data de aquisição, tipo e fabricante dos tensionadores da plataforma SEDCO 710. Fonte: CONTROL FLOW INC. 1997

Rig Name - Current & Owner D - Drillship S - Semisubmersible (Year Converted)	Rig Name - Old Year Built (Active) Year Retired (Inactive)	Riser Tensioner System	Guideline Tensioner System	Motion Compensator	OEM
Ocean General/Diamond Offshore Drig -S	A Diamond M General (1976)	80K Single RT	16K GLT		WesTech
Ocean New Era/Diamond Offshore Drig -S	A Diamond M New Era (1974)			Dual MC 400K-20	Vetco
Ocean New Era/Diamond Offshore Drig -S	A Diamond M New Era (1974)	80K Single RT	16K GLT		WesTech
Ocean Star/Diamond Offshore Drig -S	A Sinbad Saxon (1974)			Single HC 400K-20A	WesTech
Peregrine VII/RB Falcon -D	A Sedco 445 (Foresight Driller II) (1971)			Dual MC 400K-20	Vetco
Peregrine VIII/RB Falcon -D	A Sedco 445 (Foresight Driller II) (1971)	80K Double RT and 2 Taut Line Tensioners			WesTech
Santa Fe Rig 135/Santa Fe International -S	A Santa Fe Rig 135 (1983)	80K Dual RT	16K GLT		WesTech
Santa Fe Rig 140/Santa Fe International -S	A Santa Fe Rig 140 (1983)	80K Dual RT	16K GLT		WesTech
Scarabeo 3/Saipem -S	A Scarabeo 3 (1975)			Dual MC 400K-20	Vetco
Scarabeo 4/Saipem -S	A Scarabeo 4 (1975)			Dual MC 400K-20	Vetco
Sedco 700/Sedco Forex -S	A Sedco 700 (1973)			Dual MC 400K-25	Vetco
Sedco 700/Sedco Forex -S	A Sedco 700 (1973)	80K Single RT	16K GLT		WesTech
Sedco 710/Sedco Forex & Petrocan -S	A Sedco 710 (1983)			Dual MC 600K-25	Vetco
Sedco 710/Sedco Forex & Petrocan -S	A Sedco 710 (1983)	80K Single RT	16K GLT		WesTech
Sedco 711/Sedco Forex -S	A Sedco 711 (1982)			Dual MC 600K-25	Vetco
Sedco 711/Sedco Forex -S	A Sedco 711 (1982)	80K Single and Dual RT	16K GLT		WesTech
Sedco 712/Sedco Forex -S	A Sedco 712 (1983)			Dual MC 600K-25	Vetco
Sedco 712/Sedco Forex -S	A Sedco 712 (1983)	80K Single and Dual RT	16K GLT		WesTech
Sedco 714/Sedco Forex & Ranger -S	A Sedco 714 (1983)			Dual MC 600K-25	Vetco
Sedco 714/Sedco Forex & Ranger -S	A Sedco 714 (1983)	80K Single and Dual RT	16K GLT		WesTech
Sedco/BP 471/Sedco Forex & BP -D	A Sedco/BP 471 (1978)			Dual HC 800K-20	WesTech
TOR Viking/KS Right Viking -S	A Pentagone 82 (1973)			Dual MC 400K-15	Vetco
Transocean Amirante/Transocean -S	A Transocean Treasure Swan (1981)	100K Dual RT			CFI
Transocean Marianas/Transocean -S	A Tharos & Polyportia/Sonat Offs. (1996)	100K Dual RT			WesTech
Treasure Legend/Transocean -S	A Penrod Rig 77 (1983)	80K Single RT	16K GLT	Single HC 400K-25	WesTech
Treasure Prospect/Transocean -S	A Penrod Rig 76 (1983)	80K Single and Dual RT	16K GLT	Single HC 400K-25	WesTech
Treasure Saga/Transocean -S	A Sonat GVA 4000 (1983)	100K Single RT (now Shaffer)	16K GLT		WesTech
Zagreb 1/Crosco -S	A Zagreb 1 /INA Naftapljin (1977)	80K Dual RT			CFI
Accident -D	I Petromar V (1963-1981)			Single MC 400K-20	Vetco
Accident -D (Sunk)	I Glomar Java Sea (1975-1983)	80K 50 RT	16K-50 GLT	Single MC 400K-20	Vetco
Retired -Barge	I Mission Viking (1975-1987)	80K 50 Dual RT	16K-50 GLT	Single MC 400K-20	Vetco
Retired -Barge	I Reforma (1966-1988)	80K 50 RT	16K-50 GLT	Dual MC 400K-20	Vetco
Retired -Barge	I Revolucion (1966-1988)	80K 50 RT	16K-50 GLT	Dual MC 400K-20	Vetco
Retired -Barge	I Western Offshore III /Wodeco (1964-83)	80K Single RT	16K GLT		WesTech
Retired -Barge	I Western Offshore IV /Wodeco (1966-83)	80K Single RT	16K GLT		WesTech

O tensionador instalado na SEDCO 710 (assinalado em amarelo) identificado nos registros do fabricante (tabela 4.1) possui as especificações técnicas, mostradas pela tabela 4.2.

Tabela.4.2 - Especificação técnica dos compensadores tensionadores. Fonte: CONTROL FLOW INC. 1997

<b>80K SINGLE OR DUAL</b>	<b>MAXIMUM SYSTEM OPERATIONAL AIR PRESSURE</b>	<b>2,400 PSIG</b>
	<b>RISER TENSIONER</b>	
	<b>SHEAVE SIZE</b>	<b>52 INCH</b>
	<b>WIRE ROPE SIZE</b>	<b>1-3/4 INCH DIAMETER</b>
	<b>MAXIMUM WIRE LINE TRAVEL</b>	<b>50 FEET</b>
	<b>MIDSTROKE LINE TENSION (NOMINAL)</b>	<b>80,000/160,000 POUNDS*</b>
	<b>MAXIMUM LINE SPEED</b>	<b>600 FEET PER MINUTE</b>
	<b>HYDRAULIC FLUID CAPACITY</b>	<b>264/528 GALLONS*</b>
	<b>WEIGHT (WET)</b>	<b>24,900/49,700 POUNDS*</b>
<b>160K</b>	<b>RISER TENSIONER</b>	
	<b>TENSION ELEMENT</b>	<b>CHAIN OR WIRE ROPE</b>
	<b>MAXIMUM CHAIN TRAVEL</b>	<b>50 FEET</b>
	<b>MIDSTROKE CHAIN TENSION (NOM.)</b>	<b>160,000 POUNDS</b>
	<b>HYDRAULIC FLUID CAPACITY</b>	<b>450 GALLONS</b>
	<b>MASS (WET, LESS CHAIN)</b>	<b>42,600 POUNDS</b>

A figura 4.9 informa o detalhamento das partes do tensionador da SEDCO 710.

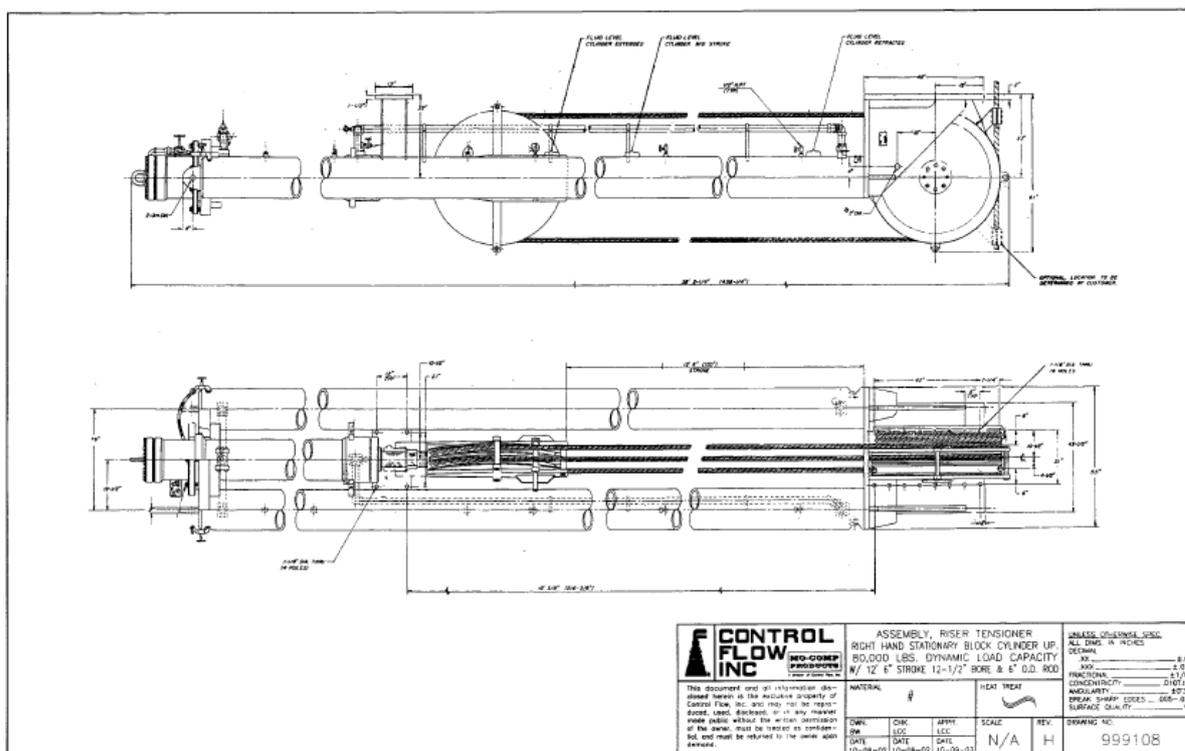


Figura 4.9 - Desenho do tensionador de 80.000 lbs de capacidade, abertura de 150", cilindro de 12 1/2" eixo de 6" de diâmetro externo. Fonte: CONTROL FLOW INC. 1997

A figura 4.10 ilustra o princípio de funcionamento do sistema de compensação do movimento vertical das ondas em navios de perfuração e plataformas de petróleo. Esses equipamentos têm por objetivo compensar o movimento vertical da plataforma (*Heave*), permitindo estabilidade e fazendo a conexão entre a plataforma e o fundo do mar enquanto se está perfurando ou assentando ferramentas. É um equipamento hidropneumático, conforme ilustra a figura 4.10. Ao lado do cilindro do tensionador, existe um tubo com um êmbolo que separa o ar do óleo e uma válvula regulando a velocidade de passagem do fluido. Se o cilindro do tensionador sobe, o êmbolo é deslocado para baixo mantendo a pressão constante no sistema e a válvula permitirá a passagem do fluido do êmbolo para o cilindro, quando a plataforma sobe, a pressão no sistema aumenta e a válvula irá permitir a passagem do fluido do cilindro para o êmbolo novamente, mantendo a pressão no sistema constante e a plataforma estável.

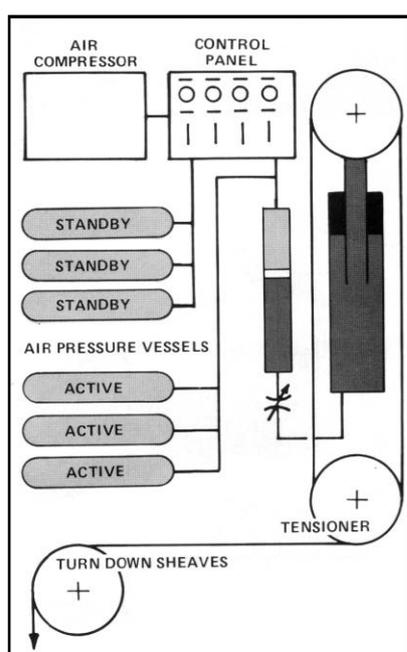


Figura 4.10 - Esquemático do funcionamento de um tensionador comum. Fonte: *Control Flow Inc.* 1997

O ajuste de tensão dos cabos é feito aumentando-se a pressão de ar nos acumuladores, a tensão de trabalho na SEDCO 710 é de 232,142 kN (52 klbs).

#### 4.6 MUDANÇAS PROPOSTA AOS TENSIONADORES DA SEDCO 710 PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Quando fora de operação, os tensionadores que operam com pistão, possuem óleo sob pressão atmosférica na câmara inferior e ar sob pressão atmosférica na câmara superior. Essa situação ocorre quando a plataforma esta navegando. Após a conexão da plataforma com o BOP, inicia-se a transferência do peso da coluna para o conjunto de tensionadores. Essa transferência ocorre aumentando-se a pressão de ar no sistema de controle, ilustrado pela Figura 4.11, que por sua vez desloca o fluido através do êmbolo da garrafa auxiliar para a câmara inferior tensionando o cabo para valores nominais de operação, que para essa plataforma é de 232,142 kN (52 klbs). A partir desse instante, essa tensão é mantida constante nos cabos e a variação de volume, ocasionada pelo movimento da plataforma, é preenchido com o volume de ar contido nos acumuladores de ar do sistema de controle. Em situações de alto *heave*, os acumuladores reserva (*stand by*) entram em operação, para que a tensão nominal seja mantida constante nos cabos.

A mudança propõe um tensionador do tipo pistão e uma abertura na câmara superior cuja finalidade seria manter a comunicação entre o êmbolo auxiliar e o tensionador, e outra abertura na câmara inferior para suprir com fluido hidráulico o sistema de geração que funcionaria do seguinte modo:

Fora de operação, ou seja, com a plataforma navegando, todo o sistema estaria sem pressão alguma, já que os tensionadores estariam fora de operação. Quando conectada ao fundo, no instante da transferência de peso, os cabos são tensionados pressurizando-se o óleo, agora, na parte superior do pistão. Evidentemente, com área menor de atuação do fluido será necessário maior pressão para manter os mesmos 232,142 kN (52 klbs) nominais. Uma vez tensionados os cabos, inicia-se o movimento dos cilindros dos tensionadores, pois são eles

que estão fixos na plataforma. Quando os cilindros sobem, o fluido na câmara inferior é pressurizado para níveis de pressão que irão comprimir a mola posicionada acima da válvula, fazendo com que a mesma suba permitindo a passagem do fluido sob pressão. Quando a plataforma desce, a pressão do fluido cai, a mola empurra a válvula do módulo de descarte bloqueando o fluxo. Quando o nível de pressão na câmara inferior cai para valores próximos a 689,48 kPa (100 psi), a válvula de sucção permite a entrada do óleo, bombeado por uma centrífuga que garantirá o preenchimento da câmara inferior, com o fluido hidráulico utilizado.

#### 4.6.1 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DA MODIFICAÇÃO DO TENSIONADOR

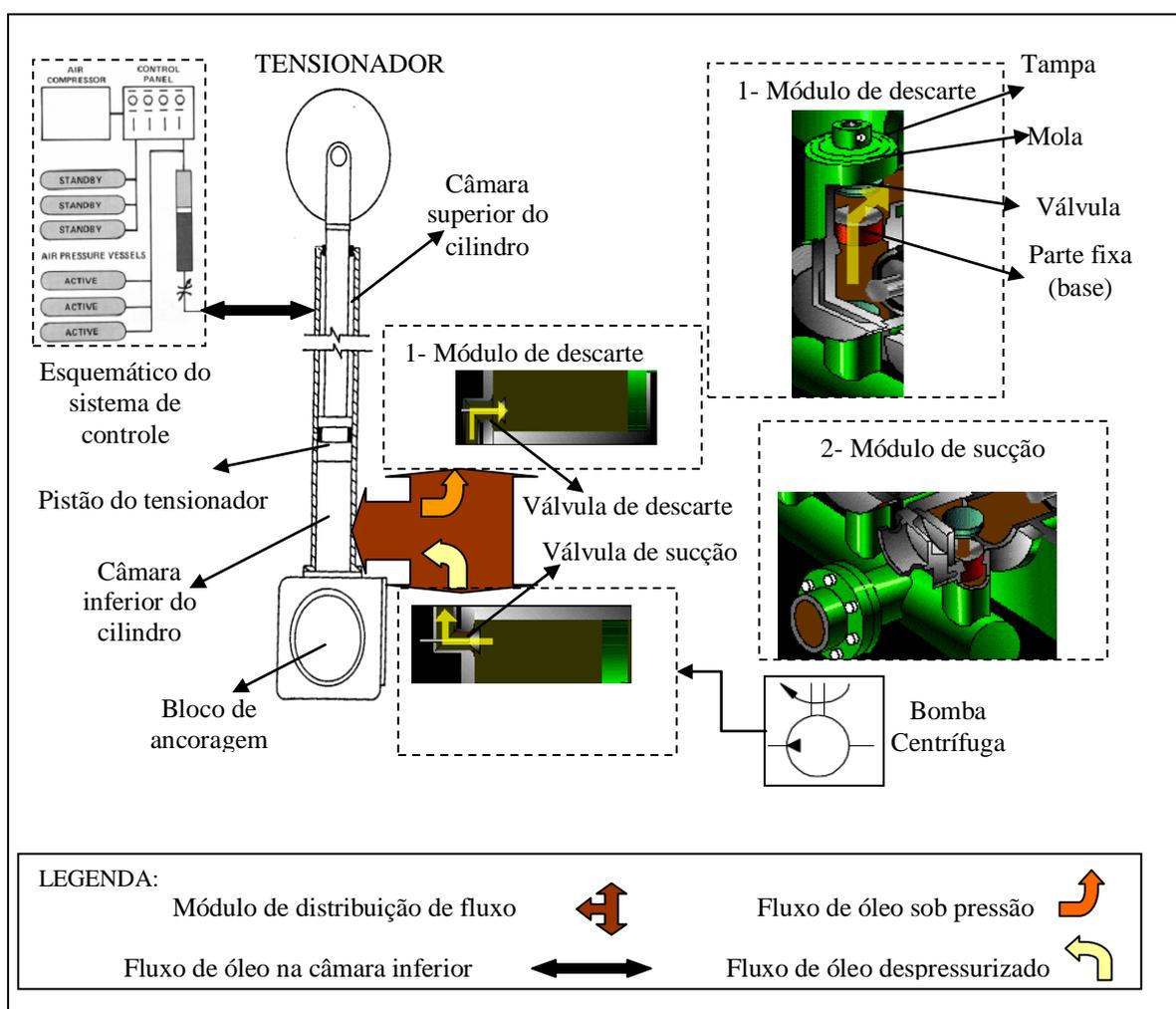


Figura 4.11 – Diagrama esquemático da adaptação dos tensionadores para bombeamento de fluido sob alta pressão

É importante notar que o volume estático da câmara inferior pode ser ajustado aumentando ou diminuindo-se o comprimento dos cabos. Normalmente o pistão fica a meio curso para garantir o livre movimento do mesmo no caso de mar “alto”. Esse ajuste é feito no bloco de ancoramento, conforme ilustra a Figura 4.12.



Figura 4.12 – Bloco de ancoramento do tensionador

#### 4.6.2 SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DOS TENSIONADORES

A mudança apresentada na figura 4.11 é feita no tensionador, como mencionado, para o funcionamento do conjunto é necessário que além da modificação no tensionador algumas adaptações na plataforma sejam feitas para o funcionamento do conjunto já que o motor hidráulico, gerador e acumuladores precisam ser posicionados em locais adequados. A figura 4.13 apresenta um diagrama esquemático do conjunto de geração de energia elétrica em plataformas de petróleo a partir dos tensionadores.

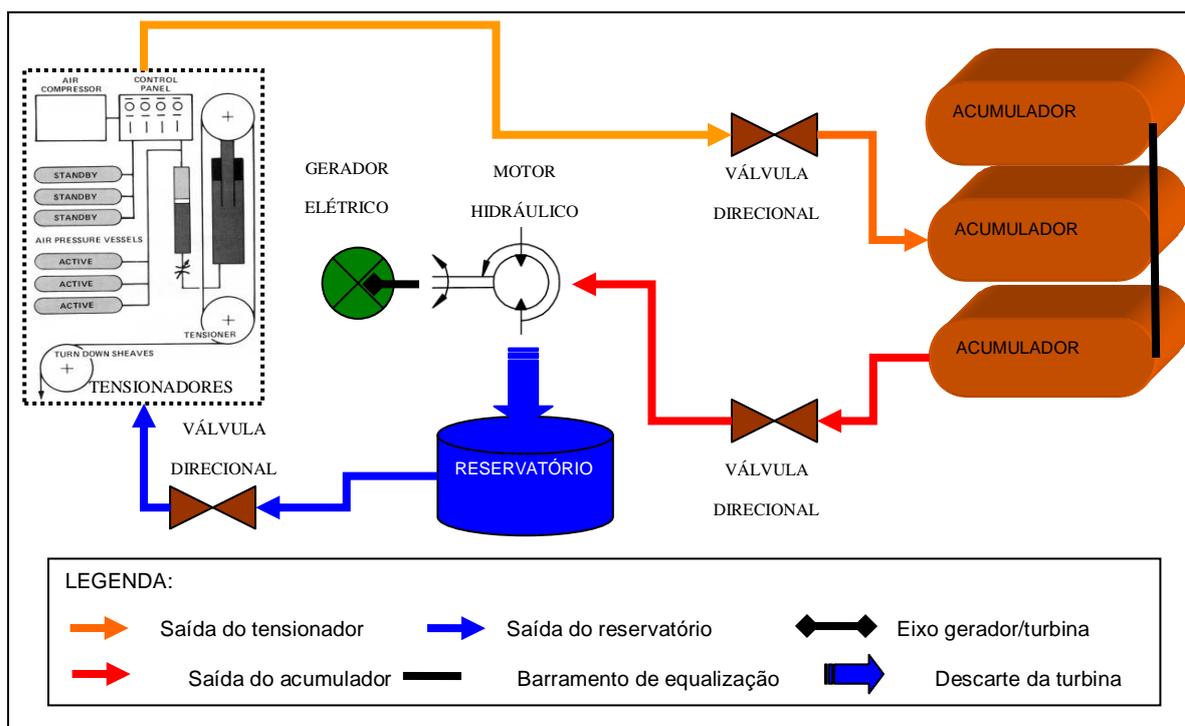


Figura 4.13 – Diagrama esquemático do funcionamento do conjunto de geração de energia elétrica em plataforma de petróleo a partir dos tensionadores

#### 4.7 POTÊNCIA RECUPERÁVEL PELOS TENSIONADORES E FORNECIDA AOS GERADORES ELÉTRICOS

Os tensionadores já possuem dimensões conhecidas. É preciso determinar os valores de vazão e pressão a que serão submetidos os motores hidráulicos. O diâmetro interno do cilindro mede 0,3175 m (12,5” polegadas), e os cabos são tensionados para condição de trabalho na SEDCO 710 para operar com 232,142 kN (52 klbs), embora esses tensionadores possam e estejam dimensionados para operar com tensão nominal de 355,84 kN (80 klbs), conforme mostra a tabela 4.2. A análise estatística aponta uma amplitude vertical das ondas predominantemente de 0,6605 m. Para manter a tensão de trabalho nos cabos constante, uma pressão resultante constante no êmbolo de 2,93 MPa (425 psi) será necessária, pois é com esse nível de pressão que os cabos são mantidos tensionados. Desse modo a pressão na câmara inferior para o tensionador não modificado, não deverá exceder os 2,93 MPa (425 psi) para o máximo permitido de 4,51 MPa (655 psi) (Anexo 1). Para o tensionador modificado a câmara

superior fará o trabalho de manter os cabos tensionados e o trabalho de geração de energia será feito pela câmara inferior do tensionador. Para os cálculos de potência recuperável será utilizada uma pressão de trabalho na câmara inferior de 13,789 MPa (2000 psi ou 137,9 bar), em função dos acumuladores comerciais disponíveis e usuais.

A periodicidade desse movimento varia com as condições do tempo, têm-se períodos de 8 a 10 segundos em condição de mar “alto” e períodos de 12 a 18 segundos em condição de mar calmo. Pode-se considerar, para efeito de cálculo que nos meses de mar agitado, ou seja, de Agosto a Janeiro observam-se períodos de oscilação menores entre 8-10 segundos ao passo que entre Fevereiro e Setembro encontram-se mares mais calmos com período variando de 12-14 segundos. Calculando-se a média e desvio padrão entre os períodos calmos e agitados encontra-se 11 segundos de período médio anual. Será considerado em 97% o rendimento do cilindro do tensionador. Esse valor de rendimento foi medido nas bombas triplex da plataforma e será adotado no cálculo da área equivalente do êmbolo do tensionador modificado (Anexo 1). Desse modo, pode-se obter o deslocamento médio anual de fluido, e a potência instalada.

Esse equipamento possui um cilindro de 0,3175 m 12,5” o que resulta numa área equivalente do êmbolo de 0,076798 m<sup>2</sup> (Anexo 1). A velocidade média de deslocamento do pistão do tensionador é dada pela equação 11 (BRUNETTI, 2005).

$$v_{mp} = \frac{l_m}{t_m}, v_{mp} = \frac{0,6605}{11}, v_{mp} = 0,06 \text{ m/s}, \text{ ou } v_{mp} = 6 \text{ cm/s}, \quad (11)$$

A partir desses valores pode-se obter o volume de fluido pela unidade de tempo que passa pela seção transversal do cilindro do tensionador deslocado pelo êmbolo, ou seja, a vazão. A vazão de bombeio do tensionador,  $Q_t$  é o volume que cada ciclo desloca em cada

cilindro,  $A$  é a área do embolo do cilindro do tensionador conforme equação 12 (BRUNETTI, 2005).

$$Q_t = v_{mp} \cdot A = 0,06 \cdot 0,076798, Q_t = 0,004616 \text{ m}^3/\text{s} \quad (12)$$

Considerando-se que em 11 segundos cada tensionador desloca um volume de  $0,004616 \text{ m}^3/\text{s}$  pode-se determinar o fluxo médio de cada tensionador, e multiplicar o resultado por 16, pois existem 16 tensionadores na referida plataforma, obtendo-se dessa forma o seguinte resultado:

$$Q_{t16} = Q_t \cdot 16 = 0,00461 \cdot 16 = 0,07372 \text{ m}^3/\text{s} \quad (13)$$

Onde  $Q_t$  é a vazão média de um tensionador e  $Q_{t16}$  é o fluxo médio produzido pelas 16 unidades de compensação trabalhando o que representa a condição operacional do sistema de geração.

#### 4.7.1 POTÊNCIA FORNECIDA AOS MOTORES HIDRÁULICOS

Conforme a análise feita na seção anterior pode-se construir um sistema que funcione à pressão média de 2000 psi (13,789 MPa). Para esses parâmetros obtêm-se a seguinte potência hidráulica, conforme a equação 14 (ÓLEOHIDRÁULICA VERION, 2005).

$$N = \frac{Q_{t16}(\text{l/min}) \cdot p_t(\text{bar})}{600} = \frac{4.423,2 \cdot 137,9}{600}, N = 1.016,598 \text{ kW} \quad (14)$$

Onde,  $N$  é a potência hidráulica fornecida ao motor hidráulico,  $p_i$  é a pressão do fluido entregue pelos acumuladores. Essa potência deverá ser convertida em torque que por sua vez, possibilitará o dimensionamento do motor, além da rotação que deverá ser compatível com a velocidade dos geradores elétricos comerciais disponíveis. A tabela 4.4 apresenta alguns geradores síncronos comerciais utilizados para a frequência de 60 Hz.

Considerando-se as informações da tabela 4.3 pode-se calcular o torque do motor hidráulico, uma vez que este estará acoplado ao eixo do gerador elétrico. Com o objetivo de diminuir o torque escolhe-se uma máquina de alta rotação que será, nesse caso um gerador com velocidade de 1800 rpm.

Tabela 4.3- Rotação e número de pólos para geradores síncronos com frequência de geração de 60 Hz. Fonte: ELETROBRÁS, 2002

Nº DE PÓLOS	ROTAÇÃO (rpm)
4	1.800
6	1.200
8	900
10	720
12	600
14	514,3
16	450
18	400
20	360
24	300
28	257,1
30	240
32	225
36	200

Assim, pode-se determinar o torque a partir da equação 15 (ÓLEOHIDRÁULICA VERION, 2006):

$$T = \frac{N_{hp} \cdot 716,2}{n_m} \cdot \eta_m = \frac{1362,732 \cdot 716,2}{1800} \cdot 0,9, T = 542,215 \text{ kgf.m} \quad (15)$$

Onde  $N_{Hhp}$  é a potência hidráulica em HP,  $\eta_m$  é o rendimento do motor hidráulico e  $n_m$  a velocidade desse motor que deverá, evidentemente, coincidir com a velocidade do gerador. A partir do torque transmitido no eixo do motor hidráulico 5.317 kN.m (542,215 kgf.m) determina-se então a potência do gerador elétrico pela equação 16 (ÓLEOHIDRÁULICA VERION, 2006).

$$P_{Ghp} = \frac{T \cdot n_G}{716,2} \cdot \eta_G = \frac{542,215 \cdot 1800 \cdot 0,97}{716,2}, = 1.321,85 \text{ hp, ou } P_G = 986,1 \text{ kW} \quad (16)$$

Onde  $\eta_G$  é o rendimento do gerador elétrico que normalmente, é de 97% (KOSTENKO, 1975),  $n_G$  é a velocidade do eixo do gerador.

## 4.8 DIMENSIONAMENTO DE UNIDADES EÓLICAS DE GERAÇÃO

### 4.8.1 LIMITE DE BETZ

Nem toda potência eólica disponível pode ser extraída pelo aerogerador. Isto se deve ao fato de que a energia extraída é fornecida pela diferença entre a energia cinética do vento à frente do rotor (para uma velocidade de vento não perturbado) com velocidade  $v_1$ , e a energia cinética do vento atrás do rotor, já desacelerado  $v_2$  (PARK, 1981). A figura 4.14 ilustra as velocidades  $v_1$  e  $v_2$  das equações 17 e 18 respectivamente.

$$E_{extraída} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (v_1^2 + v_2^2) \quad (17)$$

Se não há variação da energia cinética, o vento passa livremente ( $v_2 = v_1$ ), ou se o aerogerador intercepta todo o vento ( $v_2 = 0$ ), nenhuma energia será extraída, pois nenhum ar fluiu através do rotor. Assim, a primeira impressão de que para  $V_2 = 0$ , a energia extraída será máxima, é falsa. A figura 4.14 ilustra as velocidades mencionadas.

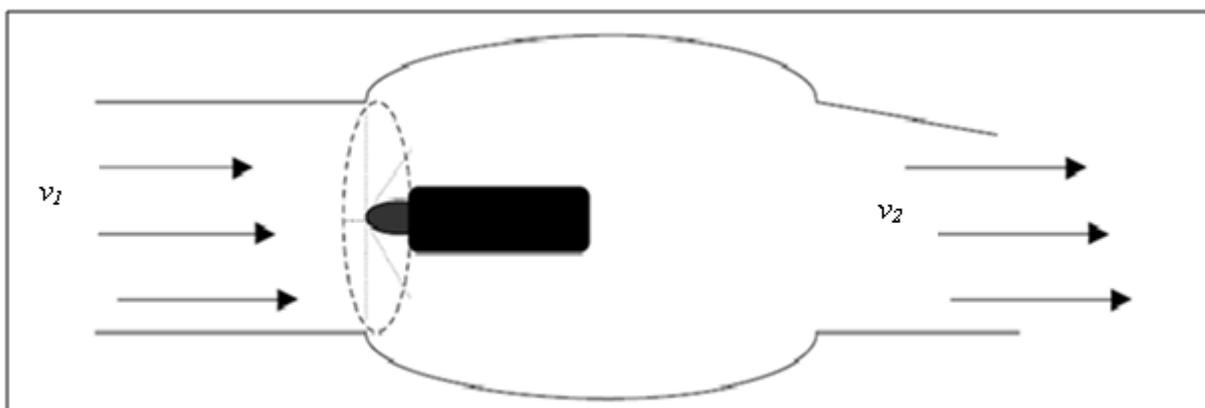


Figura 4.14 - Desaceleração do fluxo de ar ao passar por um rotor eólico. Fonte: JUSTUS, 1978

A taxa de fluxo da massa de ar que passa pelo rotor é dada, considerando-se a média aritmética entre as velocidades em 1 ( $v_1$ ) e em 2 ( $v_2$ ) Assim tem-se (PARK, 1981):

$$\frac{dm}{dt} = \rho \cdot A \cdot \left( \frac{v_1 + v_2}{2} \right) \quad (18)$$

Substituindo-se a taxa do fluxo da massa de ar da equação 17 na da equação 18, encontra-se:

$$P_{extraída} = \frac{1}{2} \cdot \left[ \rho \cdot A \cdot \left( \frac{v_1 + v_2}{2} \right) \right] \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad (19)$$

Betz descobriu que a máxima potência é extraída quando  $v_2 = v_1/3$ . Tem-se então que a máxima potência que pode ser extraída por um rotor é (JUSTUS, 1978).

$$P_{max.eol.} = \frac{16}{27} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{ar} \cdot S \cdot v_v^3, = \frac{16}{27} \cdot P \quad (20)$$

Em outras palavras, a eficiência máxima teórica possível de um aerogerador é de 16/27, ou de 59%. A este valor denomina-se Limite de Betz (JUSTUS 1978).

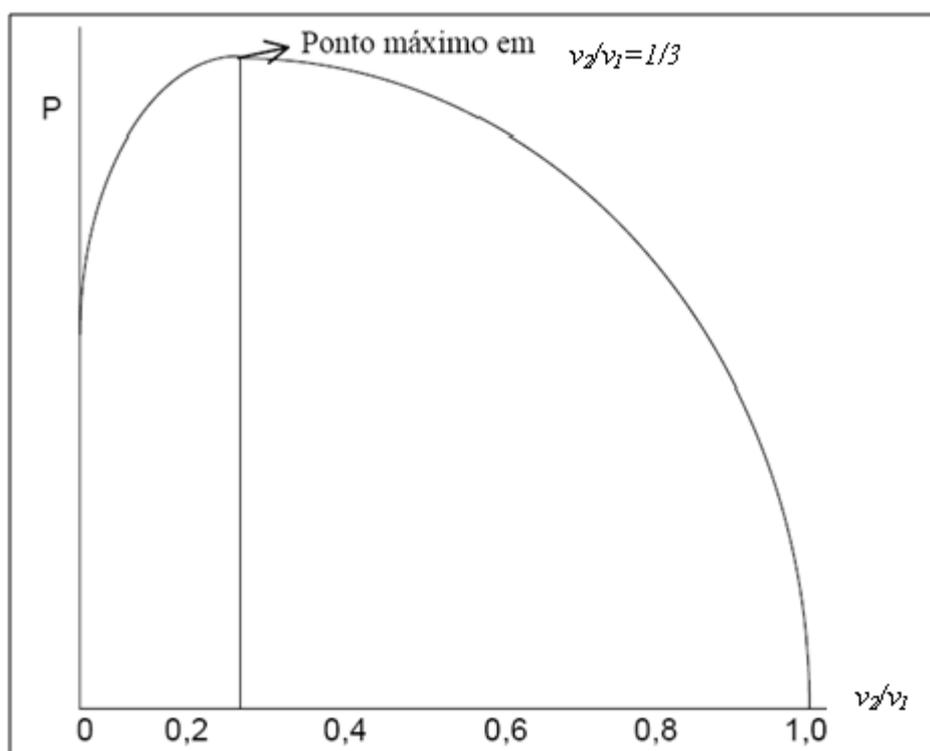


Figura 4.15 - Potência máxima alcançada quando  $v_2/v_1=1/3$ . Fonte: JUSTUS, 1978

Tomando como referência os dados obtidos na tabela 3.1 e analisando a velocidade média dos ventos mostrados pela figura 3.8 pode-se utilizar o limite de Betz determinando-se assim a turbina eólica ou o conjunto de turbinas que poderiam ser instaladas na plataforma. Assim o valor de potência recuperável, possível para a plataforma SEDCO 710 será:

$$P_{max.eol.} = \frac{16}{27} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{ar} \cdot S \cdot v_v^3, P_{max.eol.} = 506,955 \text{ kW} \quad (21)$$

Sendo  $\rho$  a densidade do fluido (ar a 20°C, 1,23 kg/m<sup>3</sup>),  $S$  a área de ação das pás (m<sup>2</sup>) e  $v$  é a velocidade do vento (m/s). Observa-se que essa potência será produzida para um conjunto de 10 turbinas com pás de 8,3 m de raio, pois a instalação de um único conjunto poderia trazer problemas de instabilidade para uma plataforma DP.

## CAPÍTULO 5

### RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 5.1 OS COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS E O EFEITO ESTUFA

Os derivados do petróleo foram os principais combustíveis utilizados nos veículos automotores no decorrer de todo o século XX. No entanto, outros combustíveis e tecnologias vêm sendo estudados, e a tendência é que o petróleo perca, progressivamente, sua prevalência, sendo substituído por outras fontes energéticas existentes ou ainda não viabilizadas. Tudo indica que as próximas décadas marquem o fim da era dos combustíveis fósseis. E, ao contrário das perspectivas do século passado, esse evento não decorrerá da exaustão das reservas, mas da própria dinâmica econômica capitalista e das crescentes limitações ambientais. Há algumas décadas, a indústria vem atuando no sentido de reduzir as emissões de gases pelos veículos, visando atender as crescentes exigências ambientais. E tem sido eficiente nesse propósito. Entretanto, os compromissos assumidos pelos países signatários do Protocolo de Quioto, que entrou em vigor em 2005, vêm estimulando a indústria a rever conceitos primordiais dos veículos, sobretudo no que se refere à utilização de combustíveis alternativos. O Protocolo é resultado direto de três décadas de conscientização ambiental e de uma agenda de negociações internacionais que resultaram em um compromisso formal dos países signatários em reduzir suas emissões dos chamados **gases de efeito estufa**.

O efeito estufa ocorre por causa do acúmulo de gases na atmosfera, sobretudo o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), que retêm a radiação infravermelha do sol e não permite que o calor que incide sobre a Terra seja integralmente refletido de volta ao espaço. Graças ao efeito estufa, a temperatura na superfície da Terra manteve-se estável e propícia à vida por milhões

de anos. Entretanto, nos últimos cem anos, a dinâmica econômica mundial ampliou exponencialmente o lançamento de CO<sub>2</sub> na atmosfera. Apesar de os cientistas não conseguirem comprovar um nexo de causalidade direta entre o aquecimento global e o aumento do efeito estufa, há fortes indícios de que isso advém das ações do homem. O fato de a temperatura estar em elevação, com previsão de aumento de 2°C a 6°C nos próximos 100 anos, obriga as nações a tomar medidas drásticas para reduzir suas emissões de gases. Os impactos causados por um aquecimento dessa magnitude, com derretimento das calotas polares, inundações de cidades litorâneas e furacões, são de proporções incalculáveis (AZEVEDO e GOLDENSTAIN, 2006).

## **5.2 OS MOTOGERADORES E OS IMPACTOS AMBIENTAIS**

Os grupos motogeradores são constituídos por um motor que produz energia mecânica e, geralmente, um gerador (normalmente um alternador), que produz energia elétrica, elementos de transmissão mecânica entre motor e gerador e, eventualmente, elementos de montagem e de suporte. Estes equipamentos podem ser autogeradores, quando são os principais fornecedores de energia elétrica, substituindo a rede de energia da concessionária; podem ser utilizados como cogeneradores; ou ainda podem ser utilizados para garantir a alimentação de cargas essenciais, no caso de falha da rede de distribuição da concessionária, neste caso como geradores de emergência (HAZEL, 2002).

Os equipamentos, a logística e infra-estrutura necessária ao funcionamento dos motogeradores possui um considerável impacto ao meio ambiente, principalmente quando esse equipamento encontra-se em funcionamento em ambiente *offshore*. O deslocamento de barcos de apoio e operações de transferência de combustível constitui fator de risco e não raramente acidentes que culminam em derramamento de óleo diesel no mar são relativamente

freqüentes. Os grupos motogeradores são geradores acionados por motores de combustão interna semelhantes aos utilizados em veículos; desta forma têm emissões de poluentes semelhantes às observadas em ônibus e caminhões. Entretanto o fato desses motores trabalharem em regime praticamente constante, pode, em certas circunstâncias, implicar em vantagens ambientais em relação aos seus similares automotivos, pois as acelerações e desacelerações típicas da operação veicular resultam sempre em fatores médios de emissão de poluentes (SEVÁ, 1999).

Os impactos ambientais diretos causados pelos motogeradores são perturbações acústicas e poluição causados pelas emissões dos gases de escapamento, esta última relacionada a queima do óleo diesel. No entanto pode-se adicionar as emissões indiretas causadas pelas refinarias que produzem o combustível e o alimentarão enquanto esses estiverem funcionando (BARROS, 2007).

Existe ainda, o risco de poluição aguda por descarga de resíduos químicos do tratamento de água. Seriam toneladas anuais de produtos químicos, com sua logística peculiar, trazidos por rebocadores, caminhões nas rodovias e ruas, com manobras de transferência de combustível de tanques e recipientes, de bombeamento de fluidos e misturas. Na outra ponta do processo, os resíduos constantemente gerados, e da inevitável exportação do risco para algum local, próximo ou distante (SANTI e SEVÁ, 1999).

### **5.3 EMISSÕES E CONSUMO DOS MOTOGERADORES**

A combustão ideal geraria calor, água, gás nitrogênio e dióxido de carbono. Mesmo o dióxido de carbono não sendo nocivo aos seres vivos devido sua baixa toxicidade e não causar danos aos materiais, hoje demanda grande preocupação pela sua intensa participação no agravamento do efeito estufa e portanto, das implicações em um dos mais graves problemas

globais responsável pelas mudanças climáticas. Na exaustão do diesel os principais produtos encontrados são: Dióxido de carbono, oxigênio, nitrogênio, vapor de água, monóxido de carbono, material particulado e os compostos orgânicos voláteis, como os hidrocarbonetos, este último de alta toxicidade e, dentre eles, os mais nocivos à saúde humana são o benzeno, tolueno, etilbenzeno, xileno e os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (ABRANTES, 2002).

Com o objetivo de reduzir os níveis de emissões dos motores diesel foi introduzido no mercado de combustível o biodiesel que constitui numa mistura do óleo diesel convencional com uma parcela de óleo vegetal proveniente de diversas fontes inclusive de origem animal como o óleo proveniente do sebo de bovinos. As emissões têm sido estudadas com profundidade por vários pesquisadores com o objetivo de comparar os efeitos produzido pelas diferentes composições propostas. Existe uma redução clara quando se utiliza o biodiesel, mas é importante que se entenda que ainda existe a emissão dos mesmos componentes tóxicos produzidos pelo diesel puro e, em alguns casos, até com aumento em alguns componentes como ilustra a figura 5.1.

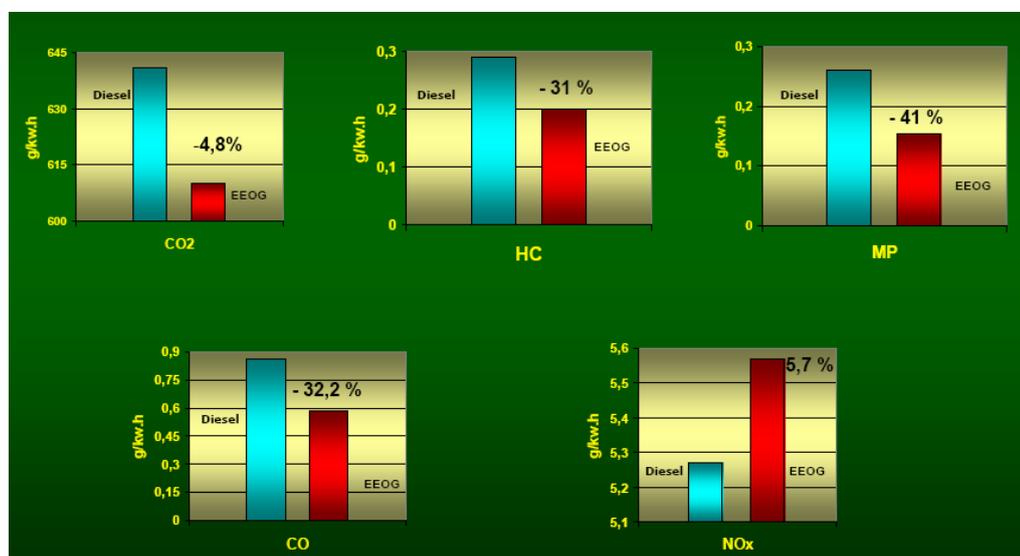


Figura 5.1 – Análise comparativa das emissões dos gases provenientes da queima do diesel puro e biodiesel EEOB. Fonte: MAZIERO, 2006

As máquinas instaladas na SEDCO 710 são grupos motogeradores produzidos no início dos anos 80, visto que a plataforma foi concluída em 1982. Nessa ocasião não existia ainda a preocupação em analisar detalhadamente as emissões, constando apenas nas características do motor os dados de emissão de particulados como ilustra a tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Especificações técnicas do grupo motogerador instalado na plataforma SEDCO 710.  
Fonte: ELECTRO-MOTIVE MANUAL, 1982

Modelo do motogerador		MD16E9B	MD20E9B
Modelo do motor		16-645E9	20-645E9
Rotações	rpm	900	900
Potência contínua	kW	2100	2500
Bomba de combustível	l/min.	17	17
Fluxo de água do motor	l/min.	3217	4088
Fluxo de água no trocador de calor	l/min.	2271	3785
Entrada de ar @ 10,3 kg/cm <sup>2</sup> e 32°C	m <sup>3</sup> /min.	267,3	303
Temperatura de Exaustão	°C	396	391
Volume de Exaustão @ temperatura de Exaustão	m <sup>3</sup> /min.	577,7	651,4
Máxima pressão de retorno permitida na exaustão	mmH <sub>2</sub> O	127	127
Óleo lubrificante (consumo)	l/h	3,14	3,71

Um levantamento do consumo médio desses motores foi feito em dois regimes distintos de trabalho encontrando-se os seguintes resultados:

- Para um regime de funcionamento com 100% de carga nos motores 20E9B o consumo de diesel medido foi de 16,7 tons/dia.
- Para um regime de funcionamento com 70% de carga nos motores 20E9B foi registrado um consumo diário de 11,679 toneladas de óleo diesel.

Observa-se na tabela 5.1 nos espaços em amarelo que tanto a temperatura dos gases quanto o volume de material particulado lançados ao meio ambiente são consideráveis. Pode-se afirmar que esses são os impactos ambientais diretos causados pelo grupo motogerador.

#### 5.4 IMPACTOS AMBIENTAIS DO SISTEMA PROPOSTO

Existem vantagens claras, do ponto de vista ambiental, fazendo-se a comparação entre o projeto de geração proposto e o convencional existente. Embora não exista ainda uma plataforma que tenha um sistema de geração igual ao proposto para que se tenha dados reais de comparação, pode-se supor que o impacto ambiental desse sistema de geração sugerido seria um eventual derramamento do fluido utilizado no sistema de geração e um fatal aquecimento da água em torno dos cabos do sistema de transmissão. Esses seriam, a princípio, os impactos ambientais diretos vislumbrados. Para o sistema eólico instalado em terra existem estudos de impactos ambientais que poderiam ser minimizados se o sistema fosse instalado em ambiente *offshore*.

Entre os principais impactos socioambientais negativos das usinas eólicas destacam-se os sonoros e os visuais. Os impactos sonoros são devidos ao ruído dos rotores e variam de acordo com as especificações dos equipamentos (ARAÚJO, 2000). Segundo o autor, as turbinas de múltiplas pás são menos eficientes e mais barulhentas que os aerogeradores de hélices de alta velocidade.

Outro impacto negativo das centrais eólicas é a possibilidade de interferências eletromagnéticas, que podem causar perturbações nos sistemas de comunicação e transmissão de dados (rádio, televisão etc.) (TAYLOR, 1996). De acordo com este autor, essas interferências variam muito, com o local de instalação da usina e suas especificações técnicas, particularmente o material utilizado na fabricação das pás. Também a possível interferência nas rotas de aves deve ser devidamente considerada nos estudos e relatórios de impactos ambientais (EIA/RIMA).

Esses efeitos no meio ambiente seriam sensivelmente reduzidos já que em alto-mar a presença de aves é praticamente nula, a população submetida aos efeitos sonoros seriam

apenas os tripulantes que precisariam utilizar o E.P.I. adequado que para esse caso é o protetor auricular. Os meios de transmissão atingidos seriam os da plataforma que poderiam ser facilmente adaptados.

## 5.5 POTÊNCIA INSTALADA, REDUÇÃO NO CONSUMO DE DIESEL E NAS EMISSÕES DE CO<sub>2</sub>

A potência elétrica total obtida pelo sistema proposto será a soma entre a potência produzida pelo bombeamento hidráulico  $P_G$ , mais a potência produzida pelas turbinas eólicas  $P_{max.eol}$  que resulta no seguinte número.

$$P_e = P_{max.eol} + P_G = 506,955 + 986,1, P_e = 1.493,055 \text{ kW} \quad (22)$$

A energia elétrica gerada ( $E_G$ ) anualmente por esse sistema, seria.

$$E_G = P_i(\text{kW}) \times 24 \left( \frac{h}{dia} \right) \times 365 \left( \frac{dias}{ano} \right) \quad (23)$$

$$E_G = 1.493,055 \text{ kW} \times \frac{24h}{dia} \times \frac{300dias}{ano}$$

$$E_G = 10.749.996 \text{ kWh/ano}$$

De acordo com o gráfico da figura 5.1 um motor MWM 4 cilindros funcionando em regime alternado emite 640 g/kW.h o que permite fazer a comparação com o que deixaria de ser emitido de CO<sub>2</sub> caso esse sistema estivesse em funcionamento.

$$E_{CO_2} = E_G(\text{kW.h/ano}) \times 640(\text{g/kW.h}) \quad (24)$$

$$E_{CO_2} = 10.749.996 \times 640$$

$$E_{CO_2}=6.879.997.440 \text{ g/ano}$$

Como demonstra a equação 24, 6.800 toneladas de CO<sub>2</sub> deixariam de ser emitidas além de outros componentes que compõem a figura 5.1. Evidentemente que motogeradores emitem menos que motores operando em regime alternado. Além disso as máquinas são de potência maior o que significa um maior rendimento dos motogeradores instalados, embora tenham sido fabricados em 1982. De qualquer modo essa é a ordem de grandeza da quantidade de dióxido de carbono que é lançado diariamente pela SEDCO 710 à atmosfera e que é um dos principais contribuintes para o aquecimento do planeta.

Pode-se ainda fazer uma análise comparativa de quanto de óleo diesel poderia deixar de ser queimado nessa unidade. Sabendo-se que o melhor rendimento da máquina ocorre quando operando em 70% de sua capacidade calcula-se a quantidade de energia produzida diariamente para esse regime de trabalho da seguinte forma.

$$E_{70\%}=P_{70\%}(kW)\times 24\left(\frac{h}{dia}\right)=1.750\times 24=42 \text{ MW.h} \quad (25)$$

O que significa que para cada MW.h gerado diariamente por essa máquina, são consumidos 0,278 toneladas de óleo diesel. O sistema proposto tem um potencial de geração diário de 35,833 MW.h o que evitaria um consumo diário de 9,961 toneladas desse combustível diariamente, representando uma economia expressiva, para a unidade.

Considerando os pontos expostos e analisados no trabalho, é importante que se faça uma avaliação sob o maior número de aspectos possíveis das vantagens e desvantagens do sistema que se pretende implementar ou modificar. Tendo esse parâmetro como referência foram feitas algumas pontuações sobre os aspectos negativos e positivos do projeto proposto.

- VANTAGENS
  - Recurso abundante, pois 2/3 da terra é coberto pelo mar;
  - Economia de combustível (óleo diesel);
  - Extenso litoral Brasileiro: O Brasil possui mais de 8,5 mil km de costa;
  - Potencial Energético de 40 GW, só no litoral Sul e Sudeste;
  - Energia verdadeiramente renovável;
  - Redução no impacto ambiental.
  
- DESVANTAGENS
  - Alto custo de instalação;
  - Ambientes de trabalho e instalação agressivos;
  - Sistema de ancoramento complexos e dispendiosos;
  - Sistema de transmissão caros e de difícil instalação;
  - Baixa confiabilidade;
  - Falta de política de investimento na área.

Esses são os principais aspectos negativos e positivos vislumbrados nesse trabalho para a implantação desse projeto de geração de energia elétrica em plataforma de petróleo a partir da energia das onda e com o aproveitamento dos ventos *offshore*.

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSÃO

Neste trabalho fêz-se uma análise qualitativa dos potenciais meios de geração de energia elétrica que podem ser viabilizados no oceano, utilizando-se como meio disponível uma plataforma de petróleo existente e operando na Bacia de Campos, Rio de Janeiro, e uma análise quantitativa da energia elétrica que se poderia produzir aproveitando-se a estrutura local e condições de mar e vento. Sabe-se que a demanda por energia limpa deve continuar aumentando a taxas elevadas. O sistema proposto contribui de maneira significativa para suprir essa demanda, pois não existe queima de nenhum combustível fóssil no processo, apenas captação da energia mecânica fornecida pela mar e, nesse aspecto, a contribuição para a preservação do meio ambiente é incontestável como mencionado na análise das vantagens. Entretanto, uma análise mais detalhada é fundamental para que se possa determinar condições específicas aplicadas à instalação desse sistema nas duas condições propostas, ondas e ventos. O projeto não propõe nenhuma concepção de equipamento específico para a geração de energia, apenas mudar para tensionadores tipo pistão fabricados comercialmente, e alterá-los como descrito nesse trabalho. Mesmo no caso de plataformas exclusivas para esse tipo de geração não seria necessária nenhuma nova concepção de estrutura, apenas aumentar o número de tensionadores e reestruturar o sistema de ancoragem mantendo a mesma configuração das milhares existentes. O mercado do petróleo encontra-se aquecido devido ao crescimento da economia mundial, por isso todas as plataformas disponíveis no mercado estão sendo de alguma forma aproveitadas na exploração desse combustível, mas essa tendência não deverá se manter por muito mais tempo. Assim é preciso estar preparado para aproveitar essas estruturas que estarão disponíveis para gerar energia elétrica limpa.

## 6.1 SUGESTÃO PARA FUTUROS PROJETOS

Para uma complementação adequada faz-se necessário a continuação desse trabalho com o objetivo de detalhar e aumentar a precisão das informações de potência gerada e disponível para o uso e, por isso alguns tópicos foram escolhidos para se estudar em profundidade, são eles:

- LEVANTAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS RELATIVOS AOS ANOS DE 2003, 2004, 2005 E 2006. (BACIAS DE SANTOS E CAMPOS)
- LEVANTAMENTO EM CAMPO DO PERÍODO DAS ONDAS NA ÁREA CONSIDERADA.
- CONSTRUÇÃO DE UM PROTÓTIPO SIMULANDO AS CONDIÇÕES DE MAR.

Essa será a segunda fase desse projeto que, quando finalizado, estará contribuindo certamente com o aumento da produção de energia para o país sem poluir ou contaminar o meio ambiente.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRANTES, R. de **Caracterização Preliminar das Emissões de Hidrocarbonetos Pilocíclicos Aromáticos e Aldeídos de Veículos do Ciclo Diesel**, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Energia Eólica. Atlas de Energia Elétrica do Brasil**, 1<sup>o</sup>ed., capítulo 6, Brasília, Brasil, 2002.

ARAÚJO, M. S. M. **Relatório de Análise do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo - MDL - Estudos de Caso**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 1996.

AZEVEDO, L. S. de; GOLDENSTEIN M. **Combustíveis Alternativos e Inovações no Setor Automotivo: Será o Fim da “Era do Petróleo”?** BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 23, p. 235-266, março, 2006.

BARROS, M. A. T. M. **Emissões Atmosféricas de Grupos Motogeradores na Região Metropolitana de São Paulo**, Dissertação de Mestrado – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

BASTOS, J. **Estatística Industrial**, Regras práticas na elaboração de um Histograma; Departamento de Engenharia Mecânica; Instituto Superior de Engenharia do Porto. Porto, 2001.

BRUNETTI, F. **Mecânica dos Flúido**, Pearson/ Prentice Hall, São Paulo, 2005.

CARCAS, M.; YEMM, R. *Order Signed to Build World's First Wave Farm In Portugal*, Ocean Power Delivery (OPD), Lisboa, Portugal, 2005

CONTROL FLOW INC. **Petroleum products catalog, Tensioner Riser & Guideline**, Houston, Texas, 1997.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO (CRESESB), **Energia Eólica: Princípios e Aplicações**, CEPTEL (2003), Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br>. Acessado em: 25 janeiro de 2006.

COPPE. **Energia das Ondas do Mar**, Laboratório de Tecnologia Submarina, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

DAVEY, R. A. *CFD Simulations of the Wells Turbine*, *CFX Users Conference, EPCC, University of Edinburgh*, UK, 1999

DE NEGRI, J. V. **Automação e Controle Experimental em Hidráulica e Pneumática**, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 1998.

DORRELL, D. *The Sustainable Development of Renewable Energy*, *Dept. of Electronics and Electrical Engineer, University of Glasgow, Scotland*, 2005.

EIA, (*Energy Information Administration*), **International Energy Annual 2001**, DOE/EIA. WASHINGTON, (D.C.). Disponível em < <http://www.eia.doe.gov/iea/>>. Acesso em 25 de novembro de 2005.

ELECTRO-MOTIVE (California). G.M.C. - *ELMO Division*. Marine Drilling Unit. Engine Data *Manual*, San Francisco, 1982.

ELETROBRÁS (Centrais Elétricas Brasileiras S/A). **Diretrizes para projetos de PCH**, Equipamentos Eletromecânicos, Turbinas, Manual para elaboração de projetos de PCH, Brasília, 2002

EOLE. **Micro-turbinas Eólicas**. Tecnologias de Micro-geração e Sistemas Periféricos. Disponível em <<http://www.oele.com>>. Acesso em 04 de Agosto de 2006.

EARTH GOOGLE. **Map link/Tele Atlas**. Disponível em <http://earth.google.com/intl/en/>. Acesso em 14 de Agosto de 2007.

FEITOSA, E. A. N. et. al. **Panorama do Potencial Eólico no Brasil**, Brasília: Dupligráfica, 2003.

FERRARI, F. **Estatística Básica**, Editora Saraiva, São Paulo, 1999.

FIALHO, A. B. **Automação Hidráulica: Projetos, Dimensionamento e Análise de Circuitos**, 3ª edição, Editora Érica, São Paulo, 2003.

GATO, L.M.C.; FALCÃO, A.F. De O. '*Aerodynamics of the Wells Turbine*', Int. J. Mech. Sci. 30, pp. 383-395, 1988.

GEROMEL, J. C.; PALHARES, A. G. B. **Análise Linear de Sistemas Dinâmicos: Teoria ensaios práticos e exercícios**, Editora Edgard Blücher, São Paulo, 2004.

GRUBB, M. J; MEYER, N. I. *Wind energy: resources, systems and regional strategies*. In: JO-HANSSON, T. B. et. al. *Renewable energy: sources for fuels and electricity*. Washington, D.C.: Island Press, 1993.

HATAMI, H. **Coletânea de Fórmulas Hidráulica**, Centro de Aplicação Metalurgia, Bosh Group Rexroth, 2007.

HAZEL, T. **Geração Integrada em Áreas Industriais e Edifícios Comerciais e Residenciais**, Revista Eletricidade Moderna, São Paulo, n. 335, pag. 103, Fev. 2002.

HEATH, T. *Realities of Wave Technology*, M. I. Mech. E, C. Eng. – Wavegen, 2005. Disponível em: <<http://www.oceanpd.com>>. Acesso em: 10 de Outubro de 2006.

JOUANNE, V. A.; WALLACE, A. *Motor Systems Resource Facility (MSRF), Electrical Engineering and Computer Science (EECS) Oregon State University*, 2005.

JUSTUS, C. G. *Wins and System Performance*. Philadelphia: the Franklin Institute press, 1978. Disponível em < <http://www.bartington.com/media/8011cc86/AN0002V6.pdf>>. Acesso em 11 de Setembro de 2007.

KONGSBERG SEATEX MANUAL. **M.R.U. User's Manual**; rev. 2ª; KONGSBERG SEATEX AS; Norway, 1999.

KOSTENKO, M. P.; PIOTROVSKI, M. L. **Máquinas Elétricas**, Editorial MIR, Moscou, 1975.

- LILIANE, M. F. L. **Introdução às Máquinas Hidráulicas**. Apostila de graduação, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, 2007.
- LINSINGEN, Irlan von **Fundamentos de Sistemas Hidráulicos**, Florianópolis: ED. da UFSC, 2001.
- MAZIERO, J. V. G. et al. **Uso do Óleo Vegetal não Modificado como Substituto do Diesel**, Revisão de Literatura, Instituto Agrônômico (IAC) /CEA, São Paulo, 2006.
- MOLLINSON, D. *Wave Climate and the Wave Power Resource. Hydrodynamics of Ocean Wave-Energy Utilization*, Proc. IUTAM Symposium Lisboa, Portugal 1985.
- MUSGROVE, P. J. “**Introduction**”, **Capítulo 1 do livro “Wind Energy Conversion Systems”** editado por L.L. Freris, Prentice Hall International (UK), 1990.
- NAVIA MARITIME. **M.R.U. User’s Manual**; rev. 2ª, Norway, 1999.
- ÓLEOHIDRÁULICA VERION. **Tabela de Conversão e Fórmulas**. Disponível em: <<http://www.verion.com.br>>. Acesso em 03 de Setembro de 2006.
- PARK, J. *The Wind Power Book*. Palo Alto: Cheshire Books, 1981. 253 p.
- PARKER. **Tecnologia Hidráulica Industrial**; Parker training, Janeiro 2003.
- PETROBRAS. **Plataformas de Produção**. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br>>. Acesso em 25 de Julho de 2006.
- PIZER, D. J. et al. *PELAMIS WEC - Recent Advances in the Numerical and Experimental Modeling Programmed* Ocean Power Delivery, Edinburgh, Scotland, UK, 2006.
- PREVISIC, M. *Offshore Wave Energy Converters Devices*, E21 EPRI Assessment Report, 2004.
- RETZLER, C. et al. *Advances in the Numerical and Experimental Modeling Programmed*, Ocean Power Delivery (OPD), Edinburgh. Scotland, U.K., 2003.
- RODRIGUES, W. C. **Estatística Ambiental**, Monografia (Especialização) Planejamento e Gestão Ambiental, Universidade Severino Sombra, Rio de Janeiro, 2006.

SANTI, A. M. M.; SEVÁ, FILHO. A. O. **Resíduos renováveis e perigosos como combustíveis industriais. Estudo sobre a difícil sustentação ambiental da fabricação de cimento no Brasil, anos 1990.** VIII Congresso Brasileiro de Energia. Rio de Janeiro. p: 212-224. 1999.

SEVÁ, F. A. O. **Informe sobre a geopolítica da coalizão petróleo/gás/eletricidade, e sobre as dimensões dos projetos anunciados de centrais termelétricas no Brasil globalizado do final da década de 1990.** Apres. Ciclo de Debates – Situação atual do sistema elétrico e os projetos de termelétricas na região de Campinas. NIPE/ UNICAMP, nov. 1999.

SILVA, B. B. da et al. **Potencial eólico na direção predominante do vento no Nordeste brasileiro,** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, UFCG v.6, n.3, p.431-439, 2002.

SIMÕES, T.; ESTANQUEIRO, A. **A Energia Eólica em Portugal, Situação Actual e Perspectivas para o Futuro.** Departamento de Energias Renováveis Unidade de Energia Eólica e dos Oceanos. Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação (INETI), Portugal, 2006.

SHIMAKURA S.E. et al., **Distribuição espacial do risco: modelagem da mortalidade infantil em Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.** Cad Saúde Pública 2001; 17:1251-61.

TAYLOR, D. *Wind Energy.* In: BOYLE, G. *Renewable Energy: Power for a Sustainable Future.* New York: Oxford University Press, 1996.

TRANSOCEAN INC. Disponível em: <<http://www.deepwater.com>>. Acesso em 23 de janeiro de 2006.

WIKIPEDIA. **Corrente Mar.** Disponível em: <[http://pt.wikipedia.org/wiki/Filtro\\_linear](http://pt.wikipedia.org/wiki/Filtro_linear)>. Acesso em 08 de Agosto de 2007.

## ANEXO 1

Tabela A.1 – Conversão de unidades de pressão. Fonte: HATAMI, 2007

1 atm	1,0333 kgf/cm <sup>2</sup>
1 atm	1,0134 bar
1 atm	14,697 psi (lbf/pol <sup>2</sup> )
1 atm	760 mmHg
1 atm	101.325 Pa
1 kgf/cm <sup>2</sup>	0,9677 atm
1 kgf/cm <sup>2</sup>	0,9807 bar
1 kgf/cm <sup>2</sup>	14,223 psi (lbf/pol <sup>2</sup> )
1 kgf/cm <sup>2</sup>	736 mmHg
1 kgf/cm <sup>2</sup>	9,810×10 <sup>4</sup> Pa
1 bar	0,9867 atm
1 bar	1,0196 kgf/cm <sup>2</sup>
1 bar	14,503 psi (lbf/pol <sup>2</sup> )
1 bar	759 mmHg
1 bar	10 <sup>5</sup> Pa
1 psi	0,0680 atm
1 psi	0,0703 kgf/cm <sup>2</sup>
1 psi	0,0689 bar
1 psi	51,719 mmHg
1 psi	6,894757×10 <sup>3</sup> Pa
1 Torr	133,322 Pa
1 mmHg	1 Torr

Tabela A.2 – Conversão força e peso. Fonte: ÓLEOHIDRÁULICA VERION, 2006

newt	daN	kg (kp)	lbs
1	.1	.1020	.224
10	1	1.020	2.24
9.807	.9807	1	2.20
4.4482	.4448	.4536	1

Pode-se determinar a pressão nominal para os tensionadores, considerando a força ( $F$ ) aplicada no êmbolo igual a tensão nominal especificada de 80 klbs ou 355,84 kN, encontra-se na equação A.1 (BRUNETTI, 2005).

$$F = p \cdot A \quad (\text{A.1})$$

Considerando-se o rendimento ( $\eta$ ) do cilindro pode-se calcular a pressão no êmbolo do tensionador na seguinte forma.

$$p_t = \frac{F}{A} \cdot \eta \quad (\text{A.2})$$

A área do êmbolo é:  $A = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$ , onde  $d$  é o diâmetro do êmbolo. Substituindo na equação A.2 obtêm-se o seguinte resultado:

$$p = \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot d^2} \cdot \eta = \frac{357.142,857}{0,07913} = 4,51 \text{ MPa, ou } 655 \text{ psi} \quad (\text{A.3})$$

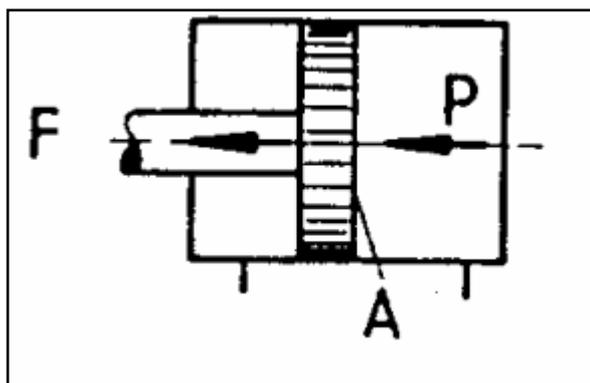


Figura A.1 – Representação Esquemática do cilindro e pistão. Fonte: HATAMI, 2007

Considerando-se o êmbolo com 12,5" já que o sistema possui rendimento de 97% obtêm-se a seguinte área equivalente:

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \eta = 767,978 \text{ cm}^2 = 0,076798 \text{ m}^2 \quad (\text{A.4})$$

## ANEXO 2

### FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA

Uma das aplicações da função de transferência é no estudo de uma resposta em frequência de um determinado circuito eletrônico, nesse caso a curva de Bode é a ferramenta visual mais utilizada normalmente, ela pode ser obtida do seguinte modo.

- Experimentalmente: Medindo-se ponto a ponto o ganho de um sistema (um amplificador, por exemplo).
- Teoricamente: A partir da função de transferência (fórmula do ganho) teórica do sistema, pode-se facilmente desenhar um diagrama de Bode correspondente.

Embora existam casos específicos em que uma rede opera somente em uma dada frequência (por exemplo numa rede de transmissão de potência), em geral determina-se o comportamento de uma dada rede em função de um espectro de frequências (uma soma infinita de senóides de diversas frequências) que pode se representada por uma série de Fourier.

Como o sistema considerado possui comportamento típico de senóides e outros pulsos variantes no tempo, a função de transferência de uma análise senoidal de frequência é uma relação de fasores, ou seja, um vetor girante, e portanto é um número complexo que possui magnitude ou amplitude e fase. Nesses casos, deve-se representar a resposta em frequência do sistema por duas curvas de bode: uma representando a magnitude e outra representando a fase.

Resposta em frequência é, basicamente, a análise do comportamento de um sistema (geralmente eletro/eletrônico) quanto ao seu ganho numa certa faixa de frequência (ou em alguns casos, velocidade angular).

O gráfico, ilustrado na figura A.2, onde é analisada a resposta em frequência de uma rede é geralmente uma curva de Bode. A curva de Bode consiste de um diagrama com uma escala linear de ganho na ordenada (em decibéis (dB) ou em Volt por Volt (V/V), a unidade mais utilizada é dB) e uma escala logarítmica na abcissa de frequência (em Hertz (Hz) ou em velocidade angular (rad/s)). Quando verifica-se a resposta em frequência pode-se obter amplitude e ângulo de resposta na saída do filtro.

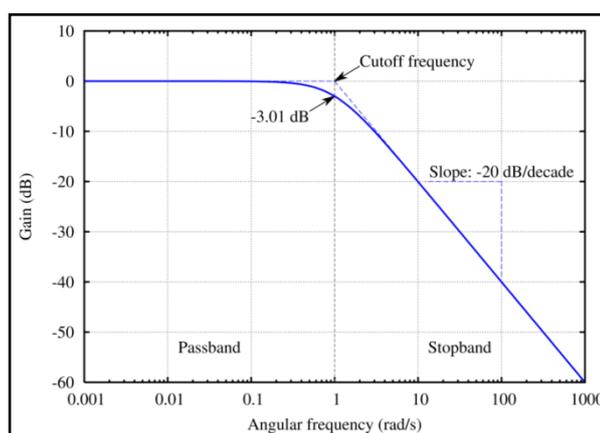


Figura A.2 - Resposta em frequência de um filtro passa-baixas em um diagrama de Bode. Fonte: WIKIPEDIA, 2007

Teoricamente através da função de transferência é estabelecida uma representação matemática da relação entre a saída e a entrada de um sistema (não necessariamente eletrônico). Uma função de transferência é mais facilmente representada usando-se a transformada de Laplace, e por isso, a transformada é uma ferramenta matemática muito usada no estudo da resposta em frequência de um sistema. Sabe-se que modelos matemáticos de sistemas físicos podem ser descritos por equações diferenciais de diversos tipos. Tomando-se como exemplo a seguinte equação diferencial ordinária, linear com coeficientes constantes dado por:

$$D[y(t)] = E[g(t)] \quad \text{A.5}$$

Aplicando-se a transformada de Laplace e manipulando-se algebricamente seus resultados obtêm-se polinômios característicos que são funções racionais  $H(s)$ :

$$H_0(s) = \frac{\Theta_0(s)}{\Delta_D(s)}, \quad H(s) = \frac{\Delta_E(s)}{\Delta_D(s)},$$

Também escrita na seguinte forma:

$$\hat{y}(s) = H_0(s) + H(s)\hat{g}(s) \quad (\text{A.6})$$

Onde,  $\Delta_D(s)$  é o polinômio característico do operador  $D[\cdot]$ ,  $\Delta_E(s)$  é o polinômio característico do operador  $E[\cdot]$  e  $\Theta_0(s)$  é um polinômio de ordem no máximo  $n-1$  que depende exclusivamente das condições iniciais. Aplica-se então a transformada inversa:

$$h(t) = L^{-1}(H(s)) \quad (\text{A.7})$$

A transformada de Laplace inversa  $h(t)$  é chamada resposta ao impulso unitário (entrada). Assumindo todas as condições iniciais nulas e sendo a entrada um impulso unitário então, com  $\hat{g}(s) = 1$  a relação (A.6) fornece imediatamente,  $\hat{y}(s) = H(s)$ , ou seja, a solução geral da equação diferencial em estudo é dada por  $y(t) = h(t)$ . A resposta ao impulso unitário é uma característica inerente e própria da equação diferencial (A.5). Tendo em mãos a função  $h(t)$ , uma de suas soluções particulares pode ser imediatamente obtida pela simples convolução de  $h(t)$  com a função de entrada considerada  $g(t)$ .

A figura A.2 representa a solução geral da equação A.5.

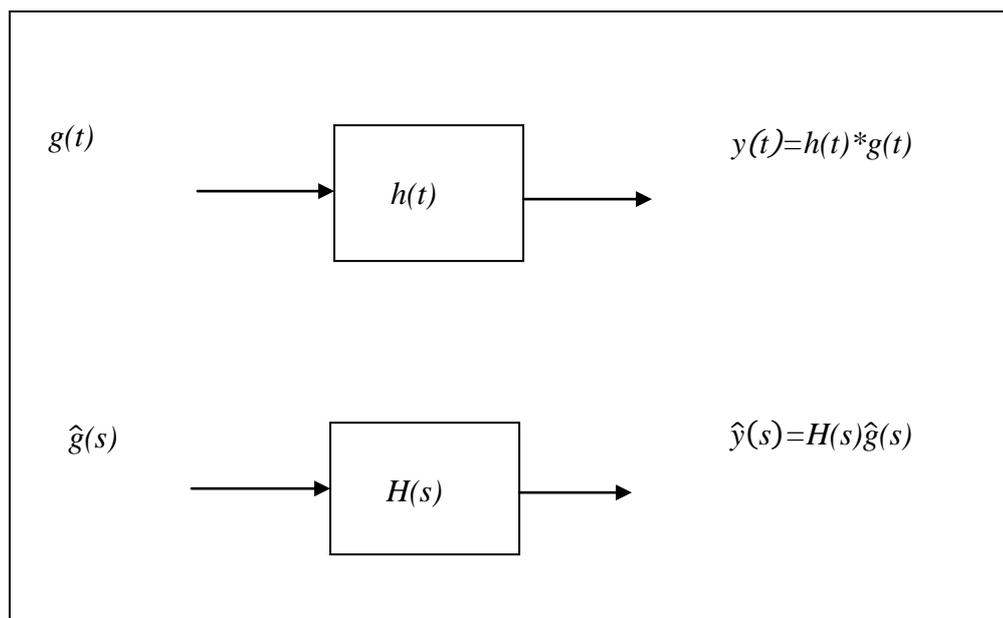


Figura A.3 - Representação gráfica em diagrama de blocos da solução geral da equação A.5. Fonte: GEROMEL e PALHARES, 2004

O diagrama de blocos expresso em  $t$  tem como saída a convolução da entrada com a resposta ao impulso, enquanto que o diagrama de blocos expresso em  $s$  tem como saída o produto da função de transferência pela transformada de Laplace da entrada (GEROMEL e PALHARES, 2004).

A equação diferencial A.5 tem uma solução composta por duas partes. Uma delas depende das condições iniciais e a outra depende da função de entrada. Sob certas condições a componente que depende das condições iniciais torna-se nula no decorrer do tempo e portanto  $t > 0$ , suficientemente grande, sua resposta tende para uma função que depende exclusivamente da função de entrada e não mais das condições iniciais. Esta solução denomina-se solução de regime permanente. Deste modo, como as contribuições devidas às condições iniciais desaparecem na solução de regime permanente pode-se, sem perda de generalidade, considerá-las nulas, fazendo com que a equação diferencial em estudo seja completamente definida por meio de sua função de transferência  $H(s)$ , que fornece:

$$\hat{y}=H(s)\hat{g}(s) \quad (\text{A.8})$$

Uma função de transferência  $H(s)$  é dita assintoticamente estável se ela for analítica em todos os pontos  $s \in \mathbb{C}$  tais que  $Re(s) \geq 0$ . Esta definição implica que para uma função de transferência ser estável é imperativo que todos os pólos onde ela deixa de ser analítica, estejam localizados no semiplano aberto esquerdo complexo, ou seja, se  $s = p \in \mathbb{C}$ , é qualquer um de seus pólos então  $Re(p) < 0$ . Em decorrência desta definição pode-se também afirmar que se  $H(s)$  for assintoticamente estável, então o eixo imaginário pertence inteiramente ao seu domínio, isto é:

$$s = j\omega \in D(H), \quad \forall \omega \in \mathbb{R} \quad (\text{A.9})$$

A resposta em frequência de uma diferencial ou da função de transferência que a representa é obtida quando a função de entrada é do tipo senóide ou cossenóide ou, de forma genérica:

$$g(t) = e^{j\omega t}, \quad t \geq 0, \quad \omega \in \mathbb{R} \quad (\text{A.10})$$

Obtendo-se a transformada de Laplace de  $g(t)$ , e substituindo o resultado em A.8 e decompondo em frações parciais encontra-se:

$$\hat{y}(s) = H(s) \frac{1}{s - j\omega} = R(s) + c/(s - j\omega) \quad (\text{A.11})$$

onde  $R(s)$  é uma função que contém todos os demais termos da decomposição e portanto seus pólos são exatamente aqueles de  $H(s)$ . Pode-se então determinar a constante  $c \in \mathbb{C}$  satisfazendo (A.11), fazendo  $s = j\omega$  em:

$$c = H(s) - R(s)(s - j\omega) \quad (\text{A.12})$$

que fornece  $c=H(j\omega)$  tendo em vista que nenhum pólo de  $R(s)$  tem parte real nula. Determina-se então:

$$\hat{y}=R(s)+\frac{H(j\omega)}{(s-j\omega)} \quad (\text{A.13})$$

para a qual devemos calcular a transformada de Laplace inversa. Neste sentido note que sendo  $R(s)$  uma função com os mesmos pólos de  $H(s)$  e, sendo esta a última, uma função assintoticamente estável então  $\mathcal{D}(R) = \mathcal{D}(H)$  e  $s = 0 \in \mathcal{D}(sR)$ , conseqüentemente:

$$\lim_{s \rightarrow 0} sR(s) = 0 \quad (\text{A.14})$$

indica que  $r(t) = \mathcal{L}^{-1}(R(s))$  tende para zero quando  $t > 0$  tende para infinito. Portanto, sendo  $t > 0$  suficientemente grande a transformada inversa de Laplace de A.12 satisfaz:

$$y(t) \approx H(j\omega)e^{j\omega t} = y_{perm}(t) \quad (\text{A.15})$$

indicando que para este tipo de entrada a saída em regime permanente é inteiramente definida por  $H(j\omega)$  onde  $\omega \in \mathbb{R}$  é a frequência da função de entrada, também denominada frequência de excitação. Escrevendo  $H(j\omega)$  na forma polar:

$$H(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)}, A(\omega) = |H(j\omega)|, \varphi(\omega) = \text{tg}^{-1} \left\{ \frac{\text{Im}(H(j\omega))}{\text{Re}(H(j\omega))} \right\}$$

substituindo em A.14:

$$y_{perm}(t) = A(\omega)e^{j(\omega t + \phi(\omega))} \quad (\text{A.16})$$

a qual permite interpretar que se a função de entrada for  $g(t) = \text{sen}(\omega t)$ , então a saída em regime permanente será:

$$y_{perm}(t) = A(\omega)\text{sen}(\omega t + \phi(\omega)) \quad (\text{A.17})$$

que é uma senóide com frequência, amplitude  $A(\omega)$  e defasagem  $\phi(\omega)$ . Determinando-se de modo teórico a resposta em frequência do sistema.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)