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

GEISA MOURA COSTA

SIMULAÇÃO DA GERAÇÃO ELÉTRICA A PARTIR DE ONDAS DO MAR NO SOFTWARE ATP/ATPDRAW

VITÓRIA – ES
FEVEREIRO/2015

GEISA MOURA COSTA

SIMULAÇÃO DA GERAÇÃO ELÉTRICA A PARTIR DE ONDAS DO MAR NO SOFTWARE ATP/ATPDRAW

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Geisa Moura Costa**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: **Prof. Dr. Domingos Sávio Lyrio Simonetti**

VITÓRIA – ES
FEVEREIRO/2015

GEISA MOURA COSTA

SIMULAÇÃO DA GERAÇÃO ELÉTRICA A PARTIR DE ONDAS DO MAR NO SOFTWERE ATP/ATPDARAW

Parte manuscrita do Projeto de Graduação da aluna Geisa Moura apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovada em 25, de fevereiro de 2015.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Domingos Sávio Lyrio Simonetti
Universidade federal do Espírito Santo
Orientador

Profa. Msc. Tiara Rodrigues Smarssaro de Freitas
Universidade federal do Espírito Santo
Examinador

Eng. Willye Bonfá de Lima
ArcelorMittal Tubarão
Examinador

Aos Meus pais, Jandira Moura Costa e Leordino Ferreira Costa,eles que sempre acreditaram em mim e juntos realizamos um só sonho.

Primeiramente agradeço a Deus, pois acredito que a ciência e o divino não se separam. Agradeço porque foi ele que me sustentou até aqui, dando-me força e sabedoria para seguir.

Em especial agradeço meus pais. Eles que sempre estiveram ao meu lado me ajudando em tudo ao que estava em seu alcance, dando-me carinho, amor e coragem. Amo de forma imensurável vocês!

Agradeço ao meu orientador, Professor Domingos, por compartilhar seu conhecimento e sempre me incentivar com a pesquisa. Obrigada por tantas vezes depositar confiança em mim.Você foi além de um professor foi um grande amigo.

Agradeço também aqueles que tornaram essa trajetória mais leve e alegre, aos colegas do Laboratório de Eletrônica de Potência e Acionamento Elétrico –LEPAC, aos colegas de turma ,os quais muitos se tornaram amigos, e aos amigos que mesmo de fora da engenharia estiveram na torcida por mim.

RESUMO

A energia contida no oceano sob a forma de ondas tem vindo a ser considerado um recurso aproveitável no quadro da produção elétrica de origem renovável em muitos países. No Brasil esse tipo de energia vem despertando interesse devido seu potencial e a necessidade de aumentar a matriz energética brasileira. No porto de Pecém-CE está instalado a primeira usina de ondas da América Latina, projetada e construída pela COPPE /UFRJ com financiamento da Tractebel Engenharia, por meio do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), e apoio do governo do Ceará. O princípio de funcionamento da usina se dá pelo armazenamento de energia feito pelo conversor hiperbário, que tem como função filtrar as oscilações de potência absorvida das ondas do mar. Este trabalho apresenta a modelagem matemática de todas as etapas de conversão (desde as ondas à geração elétrica) e simulação no software ATP/EMTP (Alternative Transients Program/Electromagnetic Transients Program) a fim de avaliar o desempenho do sistema utilizando um gerador síncrono de imãs permanentes (GSIP) alimentando uma carga local.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1– Distribuição Mundial da densidade energética das ondas 20
Figura 2.2 – Intensidade energética das ondas na região do Espírito Santo 23
Figura 2.3 – Ilustração do modelo completo da usina de ondas no porto de Pecém-CE..... 24
Figura 2.4 – Ilustração do modelo da usina de ondas no Rio de Janeiro..... 24
Figura 3.1 – Coluna de Água Oscilante (Oscillating Water Column) 26
Figura 3.2 - Dispositivos de Galgamento (Overtopping Device) 27
Figura 3.3 - Conversor flutuante (Atenuador) 28
Figura 3.4 - Sistema Oscilante de Sistema Axial (Point Absorber) 29
Figura 3.5 - Conversores Oscilantes de Translação das Ondas (Oscillating Wave Surge Converters) 30
Figura 3.6 - Dispositivos Submersos de Diferença de Pressão (Submerged Pressure Differential) 31
Figura 4.1 – Componentes da planta piloto 32
Figura 4.2- Sistema de geração de energia elétrica a partir das ondas do mar 34
Figura 4.3 - Etapas de conversão da energia das ondas em energia elétrica 35
Figura 5.1 - Definições básicas de uma onda regular e monocromática 38
Figura 5.2 - Unidade de conversão primária do conversor de energia das ondas – (a) Modelo completo, (b) Modelo simplificado e (c) Modelo equivalente 41
Figura 5.3 - Topologia do acumulador hidropneumático e variáveis envolvidas na modelagem..... 44
Figura 5.4 - Câmara hiperbárica 44
Figura 5.5 - Topologia da turbina hidráulica e variáveis envolvidas na modelagem. 47
Figura 5.6 - Potência mecânica da turbina (kW) em função da velocidade mecânica 48
Figura 5.7 - Desenho em corte da Válvula Reguladora de Vazão 49
Figura 6.1 – Circuito trifásico equivalente do Gerador síncrono (Estator) 52
Figura 6.2 - Circuito monofásico equivalente do Gerador síncrono 53
Figura 6.3 - Gerador síncrono acionado por uma turbina 54
Figura 7.1 – Diagrama de blocos do modelo de conversão primária e controle do sistema hidráulico 57
Figura 7.2 – Diagrama de blocos do modelo da turbina hidráulica e conversão secundária.. 59

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 7.1– Força de excitação do mar (F_e, verde) e Fluxo de potência (P_w, vermelha) 62
Gráfico 7.2–Força de Excitação (F_e, azul), Força do Pistão (F_p, rosa), velocidade (V, verde) e Posição (Y, vermelha) do flutuador 62
Gráfico 7.3– Vazão de entrada (Q_{in}, verde) e vazão de saída (Q_{out}, vermelha) 62
Gráfico 7.4– Vazão de entrada (Q_{in}, verde) e Posição do flutuador (Y, vermelha) 62
Gráfico 7.5– Posição do pistão do acumulador hidropneumático $\boldsymbol{\delta}$ (vermelho) e a posição de referência $\boldsymbol{\delta}_{ref}$ (verde) 63
Gráfico 7.6– Erro da posição do pistão ($\Delta\boldsymbol{\delta}_{erro}$) 63
Gráfico 7.7– Saída do Filtro do sistema hidráulico, $\boldsymbol{\delta}_{erro_filtrado}$ 63
Gráfico 7.8– Área do jato d'água, A_2 63
Gráfico 7.9– Velocidade do jato d'água (V_2) 64
Gráfico 7.10– Pressão hidráulica (P_1) 64
Gráfico 7.11– Vazão de entrada, Q_{in} 65
Gráfico 7.12– Vazão de saída, Q_{out} 65
Gráfico 7.13– Vazão de entrada(Q_{in},Vermelha) e Vazão de saída(Q_{out},azul) 65
Gráfico 7.14 – Tensão V_a (fase a) 66
Gráfico 7.15 – Corrente Ia (fase a) 66
Gráfico 7.16 – Tensão V_a (fase a) amplificada 66
Gráfico 7.17 – Flutuação da Tensão Va para $\boldsymbol{\delta}_{ref}$ = 0m 67
Gráfico 7.18 – Flutuação da I_a Va para $\boldsymbol{\delta}_{ref}$ = +0.25m 67
Gráfico 7.19 – Torque Mecânico 68
Gráfico 7.20 – Potência elétrica 68
Gráfico 7.21 –Frequência 68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Consumo de eletricidade na rede por classe. 15
Tabela 2 – Distribuição de ocorrência de período médio Tmed e Hs..... 37
Tabela 3 – Parâmetros utilizados na modelagem..... 60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Aneel	Agência Nacional de Energia Elétrica
ATP/EMTP	Alternative Transients Program/Electromagnetic Transients Program
Coppe	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GSIP	Gerador síncrono de imãs permanentes
MSIP	Máquina síncrona de imãs permanentes
Proinfa	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
PCHs	Pequenas Centrais Hidrelétricas
PI	Proporcional Integral
TACS	Transient Analysis of Control Systems
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
UFRJ	Universidade federal do Rio de Janeiro

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Amplitude de onda
$A1$	Área da seção transversal da bomba hidráulica
$A2$	Área da seção transversal do jato d'água de saída do acumulador
Ao	Área da seção transversal do embolo do acumulador hidropneumático
B	Atrito viscoso
$Erro\delta$	Erro de posição do pistão do acumulador hidropneumático
$Erro\delta\ Filtrado$	Erro de posição filtrado (pistão do acumulador hidropneumático)
E_a	Valor eficaz da tensão induzida da máquina síncrona
E_w	Densidade de energia na superfície do mar
e_a	Tensão induzida no estator da máquina síncrona
F_e	Força de excitação da onda
F_{e_max}	Valor de pico da Força de excitação da onda
Fp	Força de reação do pistão sobre o flutuador
f	Frequência elétrica máquina de síncrona
f_n	Frequência nominal máquina de síncrona
g	Aceleração da gravidade
H	Altura de onda
Hs	Altura significativa de onda
h	Profundidade do oceano
h_1 e h_1	Níveis de altura do líquido – Equação de Bernoulli
Ia	Correntes de armadura
J	Momento de inércia do rotor
K_f	Ganho proporcional do filtro
Ke	Coeficiente de elasticidade do flutuador
Ki	Ganho integral –Controlador PI
Kp	Ganho proporcional – Controlador PI
k	Número de onda
La	Indutância de armadura
M	Massa do flutuador
Mr	Coeficiente de massa adicional do flutuador
Ni	Número de espiras por fase do rotor da máquina síncrona
n	Número de moles

p	Número de pares de polos da máquina de síncrona
$P1$	Pressão hidráulica instantânea
$P2$	Pressão atmosférica
Ph	Potência hidráulica
Pm	Potência mecânica no eixo da turbina hidráulica
Po	Pressão hidráulica inicial
Pw	Potência por metro de crista de onda
Qin	Vazão de entrada do sistema hidráulico
$Qout$	Vazão de saída do sistema hidráulico
Ra	Resistência de armadura
Rr	Coeficiente de irradiação do flutuador
Rt	Raio da turbina
Sn	Potência nominal
T	Período de onda
T_E	Torque elétrico
T_f	Constante de tempo do filtro
T_M	Torque mecânico
$Tmed$	Período médio de onda
T_v	Torque de atrito viscoso
V_1	Velocidade da água na entrada do acumulador hidropneumático
V_2	Velocidade do jato d'água na saída do acumulador hidropneumático.
V_{L1}	Volume de ar (acumulador e câmara hiperbárica) instantâneo
V_{Lo}	Volume inicial de ar (acumulador e câmara hiperbárica)
V_n	Tensão nominal
v_w	Velocidade de propagação da onda
X_s	Reatância síncrona da máquina síncrona
y	Posição do flutuador
$\dot{y}$	Velocidade do flutuador
δ	Posição instantânea do êmbolo do acumulador hidropneumático
δmax e δmin	Posições maxima e minima do êmbolo do acumulador hidropneumático
δmed	Posição média do pistão do acumulador hidropneumático
δo	Posição inicial do pistão do acumulador hidropneumático
δref	Posição de referência do pistão do acumulador hidropneumático

$\Delta\boldsymbol{\delta}$	Oscilação do pistão do acumulador em torno do seu valor médio
Θ	Ângulo de escape do jato d'água após se chocar com a concha da Turbina
λ	Comprimento de onda
ρ	Massa específica da água
Φf	Campo magnético do rotor
ω	Frequência natural da onda
ω_e	Frequência elétrica em radianos elétricos por segundo
ω_m	Velocidade angular de eixo em radianos elétricos por segundo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 15
1.1 Motivação 17
1.2 Objetivos 18
1.2.1 Objetivo Geral 18
1.2.2 Objetivos específicos 18
1.3 Software de Simulação ATP/EMTP 18
2 POTENCIAL ENERGÉTICO DAS ONDAS DO MAR NO BRASIL E NO MUNDO 19
3 ENERGIAS OCEÂNICAS 24
3.1 Energia de marés 24
3.2 Energia das Correntes Marítimas 25
3.3 Energia de Ondas 25
3.3.1 Coluna de Água Oscilante (Oscillating Water Column) 26
3.3.2 Dispositivos de Galgamento (*Overtopping Device*) 27
3.3.3 Atenuadores 27
3.3.4 Sistema Oscilante de Simetria Axial (Point Absorber) 28
3.3.5 Conversores Oscilantes de Translação das Ondas (Oscillating Wave Surge Converters) 29
3.3.6 Dispositivos Submersos de Diferença de Pressão (Submerged Pressure Differential) 30
3.4 Comentários e encaminhamentos 31
4 CONVERSOR DESENVOLVIDO PELA COPPE/UFRJ E APRESENTAÇAO DO PROBLEMA 31
4.1 Descrição de funcionamento 33
5 MODELAGEM DA UNIDADE DE CONVERSÃO PRIMÁRIA 36
5.1 Conceitos Básicos em Energia das Ondas 38
5.2 Flutuador e Bomba Hidráulica 40
5.3 Acumulador Hidropneumático e Câmara Hiperbárica 43
5.4 Turbina Hidráulica 46
6 MODELAGEM DA UNIDADE DE CONVERSÃO SECUNDÁRIA 49
6.1 Máquina Síncrona de Ímãs Permanentes (MSIP) 50
6.2 Dinâmica do rotor 53

7 ESTRATÉGIA DE CONTROLE DO SISTEMA HIDRÁULICO 55
7.1 Simulações e resultados..... 59
8 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS..... 69
9 BIBLIOGRAFIA 71

1 INTRODUÇÃO

Segundo dados de pesquisas da Empresa de Pesquisa Energética, a demanda de energia elétrica no Brasil crescerá em 4,0% entre o ano de 2013 e 2023, saltando de um patamar de 481.385 GWh em 2014 para 688.990 GWh em 2023, (EPE, 2014). A informação, estratificada por classes de consumidores, está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Consumo de eletricidade na rede por classe.

Ano	Residencial	Industrial	Comercial	Outros	Total
			GWh		
2014	129.983	191.333	87.378	72.691	481.385
2018	154.879	222.148	108.359	83.271	568.657
2023	189.934	257.714	142.660	98.682	688.990
Período			**Variação (% a.a.)**		
2013-2018	4,4	3,8	5,3	3,4	4,2
2018-2023	4,2	3,0	5,7	3,5	3,9
2013-2023	4,3	3,4	5,5	3,4	4,0

fonte: EPE, (2014).

O replanejamento das matrizes energéticas para atender o consumo da população é e será um grande desafio não só do Brasil, mas do mundo todo. Atender a demanda de energia não é a única preocupação, existe também um esforço para a minimização do impacto ambiental causado pela geração de energia elétrica, como a emissão de gases poluentes na atmosfera, principalmente o CO_2. Com isso, o estudo por fontes renováveis de energia vem crescendo em todo o mundo.

O Sistema elétrico brasileiro possui como principal fonte de energia a hidroeletricidade, uma fonte mais limpa, renovável e barata quando comparada a outras fontes de energia. Porém a busca por fontes de energia com menor impacto ambiental tem levado vários países a investirem na transformação e complementação dos seus parques energéticos.

Objetivando diversificar a matriz energética do Brasil com fontes alternativas de energia um importante programa foi criado pelo governo federal, o Proinfa (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica) instituído pela Lei nº 10.438/2002 que implantou, até 31 de dezembro de 2011, um total de 119 empreendimentos, constituído por 41 eólicas, 59

pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) e 19 térmicas a biomassa. Através deste programa foi possível diversificar a matriz energética do Brasil. Os novos empreendimentos totalizam uma capacidade instalada de 963,99 MW. Além disso, estima-se que com este programa foi possível reduzir as emissões de gases dos efeitos estufas em aproximadamente em 2,5 milhões de toneladas de CO2eq/ano (ELETROBRAS, 2014).

Exemplos de fontes renováveis para a produção de energia elétrica são: energia eólica, energia solar, energia hídrica, a biomassa, energia geotérmica e a energia oriunda do mar. Esta última manifesta diferentes formas de fluxos energéticos, o que levou a diferentes formas de aproveitamento dessa energia.

Algumas energias marítimas mais relevantes são a energia das marés (produto da interação dos campos gravitacionais da lua e do sol); a energia das correntes marítimas; energia do gradiente salino; a energia térmica dos oceanos, consequência da radiação solar incidente; e a energia das ondas. Essas diversas formas de energia podem ser exploradas a fim de gerar eletricidade eficiente e limpa.

O oceano cobre cerca de 75% da superfície terrestre, fazendo deste o maior coletor solar e ainda um ambiente propício à instalação de dispositivos de fontes renováveis de energia, impulsionando desta forma o desenvolvimento de tecnologias para a conversão de energia oceânica em energia elétrica, acreditando que o oceano pode tornar-se a principal fonte de energia do futuro (ESTEFEN, 2003).

Esse tipo de tecnologia é recente e ainda não apresenta a confiabilidade e percepção pública que o mercado precisa (EPE, 2006). Existem alguns fatores que contribuem para a não competitividade frente a outras tecnologias, como a falta de investimentos, infraestrutura, logística, aspectos regulatórios e impactos ambientais, dentre outros. Daí a importância do governo e empresas continuarem a investir nesse tipo de tecnologia a fim de se desenvolver em escala comercial.

A energia oriunda do mar apresenta-se assim como grande atrativo para países com grandes faixas costeiras. Dependendo da localização relativa à costa oceânica, as tecnologias

de geração em desenvolvimento podem ser classificadas em três grupos (detalhados mais adiante) *onshore, nearshore e offshore.*

Atualmente países do norte europeu como Irlanda, Escócia, Inglaterra, Holanda, Dinamarca, Noruega e Suécia, além do Japão, têm investido em tecnologias alternativas de geração. Além disso, Portugal vem se tornando centro de experimentação das tecnologias marinhas. De fato, em águas portuguesas, nos Açores e próximas a Póvoa do Varzim, estão instalados diversos projetos piloto, para teste e aprimoramento das tecnologias (EPE, 2006).

1.1 Motivação

Diversificar a matriz energética brasileira com fontes alternativas renováveis não é só importante por uma questão ambiental, mas também por uma questão econômica. É importante que o Brasil seja competitivo entre os países que buscam tecnologias de aproveitamento da energia das ondas para gerar eletricidade em grande escala, para que no futuro não tenha que importar tecnologias para esse tipo de geração.

Também as crises repetitivas com escassez de recursos naturais renováveis como água dos rios, como a seca deste ano na região Sudeste e Centro-Oeste do Brasil onde o nível dos alguns reservatórios de água das hidrelétricas reduziu em 18% da capacidade (JORNAL HOJE, 2014), é fator que contribui para a necessidade de investimento em estudos de novas fontes de energia elétrica.

Alem desses fatores importantes, a geração de energia elétrica oriundas das ondas marinhas vem despertando interesse por ter pequeno impacto ambiental, grande previsibilidade, alta densidade energética e amplas perspectivas de evolução técnica a custos competitivos com outras fontes. Além da criação de postos de trabalho com sua implantação, a operação e manutenção dos equipamentos contribuem para o desenvolvimento socioeconômico permitindo acesso à energia elétrica de comunidades isoladas do sistema elétrico interligado (EPE, 2006).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Modelar e simular a dinâmica completa do conversor hiperbárico de energia das ondas, desde a entrada de energia primária até a saída do gerador elétrico com o software ATP/EMTP analisando a qualidade no suprimento de uma carga local. Deste modo, é possível avaliar e estimar a potência elétrica gerada de acordo com o estado de mar de certo local.

1.2.2 Objetivos específicos

Avaliar a importância da exploração e o potencial energético das energias das ondas no Brasil e no Espírito Santo.

Desenvolver um modelo com equações mecânicas capaz de reproduzir de forma aceitável o comportamento da geração de energia elétrica a partir das ondas do mar.

Simular o sistema de geração de energia utilizando o gerador síncrono de imãs permanentes alimentando uma carga local.

1.3 Software de Simulação ATP/EMTP .

O ATP/EMTP (*Alternative Transients Program/Electromagnetic Transients Program)* é um programa computacional que permite simular fenômenos transitórios de natureza eletromagnética, eletromecânica e sistemas de controle associados a sistemas elétricos polifásicos. O ATP/ATPDraw é um processador gráfico que trabalha na plataforma MS-Windows , criado para facilitar a modelagem de circuitos elétricos no ATP .

O ATP/EMTP é uma ferramenta gratuita e amplamente difundida nas empresas do setor elétrico no Brasil e no mundo. Possuí a capacidade de representar sistema elétricos de grande porte e de forma simples. Além disso, a versão gráfica do ATP/ATPDraw apresenta uma interface amigável com usuário, dispõe em sua biblioteca a maioria dos componentes utilizados nos sistemas elétricos e os que não estão presentes podem ser criados em duas ferramentas específicas do programa, os TACS e MODELS.

A rotina TACS (Transient Analysis of Control Systems) permite a utilização de diversos dispositivos de processamento lógico e algébrico para representação de um sistema elétrico. Ela simula interações dinâmicas entre a rede elétrica e os sistemas de controle de um determinado equipamento, assemelhando-se ao MATLAB® (AMON, 1996).

A rotina MODELS (linguagem de simulação) é uma versão moderna da TACS. Apresenta vantagens na representação de sistemas de controle complexas e se constitui em ferramenta muito poderosa para a simulação de algoritmos de sistemas de controle (AMON, 1996).

Visando a difundir um software gratuito no meio acadêmico que ao mesmo tempo fosse utilizado no setor elétrico escolheu-se a utilização do ATP/ATPDraw.

2 POTENCIAL ENERGÉTICO DAS ONDAS DO MAR NO BRASIL E NO MUNDO.

As ondas do mar estão entre as fontes renováveis de maior densidade energética. Geradas pelo atrito dos ventos com a superfície do mar e restritas aos 50 metros mais próximos à superfície, tem potencial energético estimado entre 2 e 3 milhões de MW (mundial). No atual estágio tecnológico de transformação em energia elétrica, admite-se que poderiam suprir cerca de 16% da demanda anual mundial de energia elétrica (EPE, 2006).

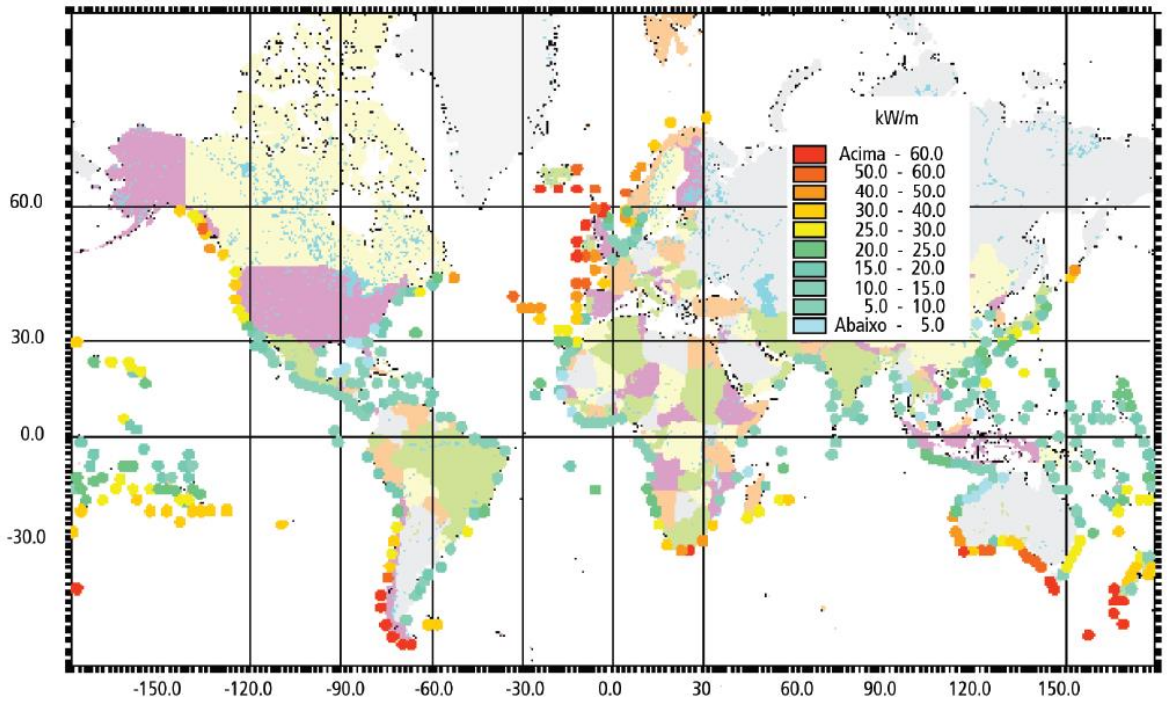
O primeiro *boom* mundial na pesquisa energética de energia das marés remonta à crise dos anos 70, como nos informa Clemente (2013):

> As pesquisas sobre energia das ondas começaram de forma efetiva nos anos 1970, quando a crise do petróleo promoveu um aumento do interesse sobre as energias renováveis. Uma grande variedade de dispositivos de energia das ondas foram propostas e desenvolvidas, mas o sucesso foi, nesse momento, muito abaixo das expectativas. Em muitos casos, as forças destrutivas das ondas do mar foram subestimadas, e prematuros dispositivos de conversão de energia

> mostraram resultados insatisfatórios. Como consequência, quando a crise de energia chegou ao fim, o interesse na energia das ondas diminuiu, e no início dos anos 1980 viram-se muitos dos testes chegarem ao fim.

No início dos anos 2000 surgiu um novo desenvolvimento voltado para a energia das ondas, como uma consequência da busca europeia do aumento substancial do nível de oferta de energias renováveis (ESTEFEN, 2003).

Figura 2.1– Distribuição Mundial da densidade energética das ondas



Fonte: World Wave Atlas (citado por EPE, 2006)

De acordo com o mapa da Figura 2.1 é ao sul da América do Sul, Austrália, Nova Zelândia e países da Europa banhados pelo Atlântico Norte, particularmente o Reino Unido que se concentram as ondas de maior potencial energético com valores acima de 25 kW/m.

Na Nova Zelândia há indicações de dados médios de potencial de 100 kW/m podendo chegar a 1.000 kW/m, (EPE, 2006). Já na América Central, costa sudeste dos Estados Unidos e América do Sul, oeste da África, sudeste asiático e Japão, se concentram as ondas com o potencial energéticos relativamente pobres, entre 10 e 20 kW/m.

Pode ser observado no mapa que o Brasil, apesar da extensa costa marítima, apresenta baixo potencial de aproveitamento energético quando comparado com outros países citados anteriormente, entretanto isso não anula o interesse nesse tipo de energia.

Embora as alturas de onda típicas do litoral brasileiro não apresentem valores energéticos dos mais elevados, ele possuiu uma grande vantagem: sua estabilidade e a pouca ocorrência de fenômenos ambientais com capacidade de destruição dos equipamentos de conversão indicam a possibilidade de um aproveitamento economicamente viável, dependendo da tecnologia empregada. Portanto, com investimentos em pesquisas e desenvolvimento, essa fonte de energia pode representar uma grande contribuição no mercado de eletricidade e no mercado nacional de tecnologia mantendo-o competitivo para que no futuro o Brasil não tenha a necessidade de importar tais tecnologias.

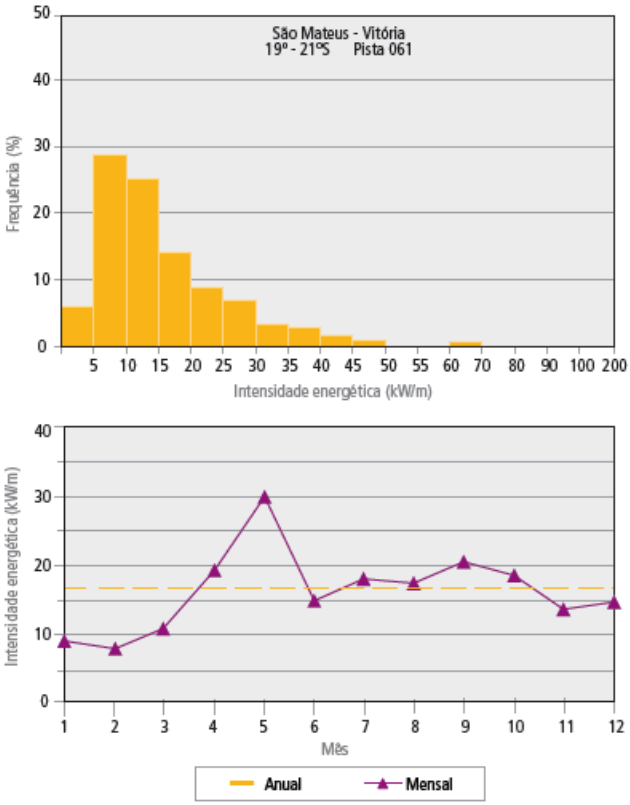
Em Carvalho (2010) há estudos comparando o potencial teórico da extensão da costa brasileira, onde são utilizados dados de campo de ventos entre os anos de 1997 e 2009. Nele é dividido o litoral em 10 áreas, das quais 8 inclui apenas o território brasileiro. As seguintes médias anuais da Intensidade energética são encontradas:

- A área 2 compreende os litorais do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina, onde a média anual da área é de 15,14kW/m.
- A área 3 se estende da costa de Santa Catarina ao Rio de Janeiro, onde a média anual é 12,73 kW/m.
- A área 4 abrange apenas o litoral do Rio de Janeiro, onde a média anual é igual a 13,9 kW/m.
- A área 5 compreende o norte do litoral fluminense e a região centro-sul do litoral do Espírito Santo e apresentou resultados semelhantes à área 4, a média anual é igual a 13,1 kW/m.

- A área 6 abrange a região centro-norte do Espírito Santo, o litoral da Bahia, e a região sul de Sergipe, onde a média anual é de 9,8 kW/m.
- A área 7 se estende do Sergipe ao Rio Grande do Norte (passando por Alagoas, Pernambuco e Paraíba), onde média anual é de 12,2 kW/m.
- A área 8 engloba os litorais do Rio Grande do Norte, Ceará e Piauí. Esta área a média anual é igual a 7,5 kW/m.
- A área 9 compreende o litoral do Maranhão e parte do paraense, a média anual é igual a 8,3 kW/m.
- A área 10 compreende o litoral do Pará e do Amapá, além de Guiana Francesa e parte do Suriname. Esta região possui a média anual é de 11,1 kW/m.

Mais especificadamente, estudos realizados pela Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia (COPPE), na região de Vitória, Espírito Santo, a permanência de ondas com potencial igual ou acima de 10 kW/m é superior a 65% do tempo e o potencial médio mensal é de 14,5 kW/m. As ondas de maior potencial são geradas entre o início de abril e meados de maio como mostrado a Figura 2.2 (ESTEFEN, 2003).

Figura 2.2 – Intensidade energética das ondas na região do Espírito Santo



Fonte: EPE, (2006).

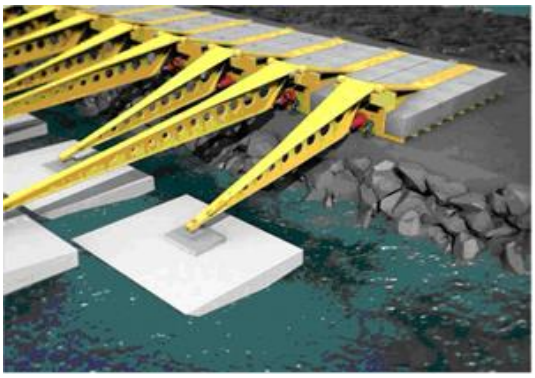
Os dados apresentados na Figura 2.2, mostram que o Espírito Santo apresenta bons índices de aproveitamento das energias das ondas quando comparados ao restante do país.

No início de 2004 foi assinado um Termo de Cooperação entre Coppe, Eletrobras e Governo do Estado do Ceará, visando a instalação do primeiro protótipo na costa do Ceará, Figura 2.3. O local escolhido foi o Porto do Pecém, situado a 60 km ao norte de Fortaleza. Hoje se encontra em fase final de testes (PLANETA COPPE, 2006).

Ao fim do ano de 2013, a Coppe/UFRJ, em parceria com Furnas e a empresa Seahorse Wave Energy, iniciou os estudos para geração de energia elétrica a partir da movimentação das ondas do mar na cidade do Rio de Janeiro, Figura 2.4. O projeto prevê a instalação de uma usina, denominada conversor offshore (quando a geração é instalada longe da costa), a cerca

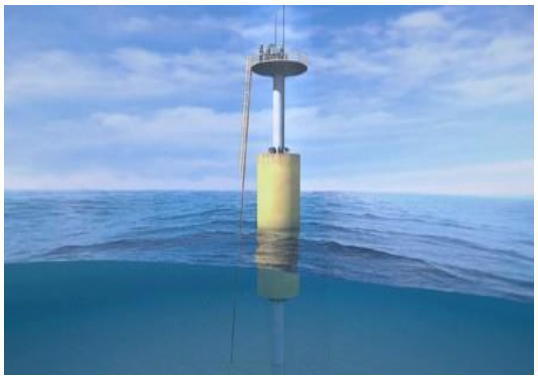
de 14 quilômetros da praia de Copacabana, próximo da Ilha Rasa, com capacidade instalada de 100 kW. A usina ficará a uma profundidade de 20 metros e, em sua capacidade máxima, a eletricidade gerada pode abastecer o equivalente a 200 casas residenciais (PLANETA COPPE, 2013).

Figura 2.3 – Ilustração do modelo completo da usina de ondas no porto de Pecém-CE.



Fonte: PLANETA COPPE, (2013).

Figura 2.4 – Ilustração do modelo da usina de ondas no Rio de Janeiro.



Fonte: PLANETA COPPE, (2013).

Verificou-se neste capítulo, a viabilidade de aproveitamento da energia das ondas no litoral brasileiro. No próximo capítulo serão apresentados os tipos de fontes de energia ocorrentes no oceano.

3 ENERGIAS OCEÂNICAS

Neste capítulo serão apresentados os principais tipos de fontes de energia do mar para geração de energia elétrica.

3.1 Energia de marés

A energia proveniente do movimento das marés é resultado do movimento natural das massas de água marítima que são influenciadas pelos campos gravitacionais da terra, da lua e do sol. Devido à posição da terra em relação à lua e o sol, existe uma alternância entre maré

baixa e maré alta. Este ciclo é conhecido pelo homem, o que torna totalmente previsível quando esta fonte estará disponível para geração de energia.

Os dispositivos de conversão de energia das marés baseiam-se no aproveitamento da energia cinética das correntes produzidas pelas marés. O fato de estarem submergidos, devido à densidade da água, permite que estas possam ter pás mais curtas com um movimento mais lento (EPE, 2006).

3.2 Energia das Correntes Marítimas

Outra possibilidade de bem menos impacto é a utilização da energia das correntes marítimas presentes em todos os oceanos do planeta para geração de energia elétrica como nos informa (SILVA, 2012):

> As correntes marítimas são deslocamentos de grandes massas de água e possuem direções e periodicidades bem definidas. A origem desses deslocamentos se deve a ação dos ventos na superfície e do movimento de rotação da Terra. Essas correntes de água possuem grande quantidade de energia cinética, apesar de menor do que a dos ventos. Porém, como a densidade da água é aproximadamente 800 vezes maior a energia gerada pelas correntes marítimas é bem maior do que a gerada por parques eólicos. Além do fato das correntes serem bem mais previsíveis do que os ventos, característica muito valiosa para a implantação de fontes de energia.

3.3 Energia de Ondas

As ondas são, em última análise, uma forma alternativa da energia solar. O aquecimento da terra provoca os ventos, que, por sua vez, formam os movimentos oscilatórios das águas próximas à superfície do mar. Os sistemas produtores de energia elétrica de energia das ondas dividem-se em três grupos (EPE, 2006).:

- Dispositivos fixos ou embutidos na linha costeira, sujeitos à rebentação (onshore);

- Dispositivos instalados perto da costa (até 500m), em águas pouco profundas (20-25m) (nearshore);
- Dispositivos instalados ao largo (a partir dos 25m de profundidade) (offshore).

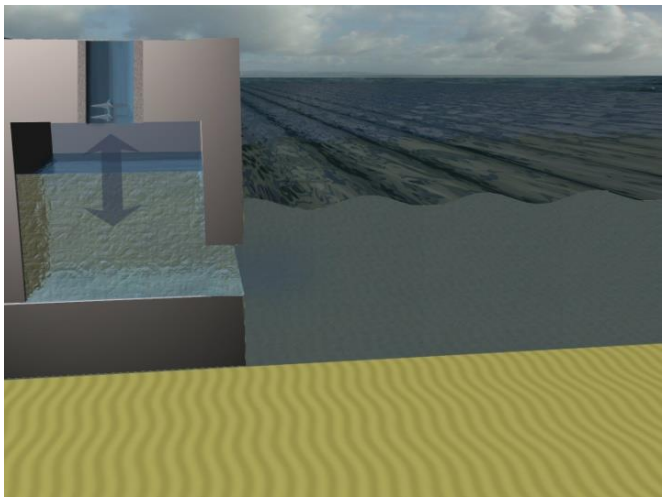
São identificados seis tipos principais de Dispositivos Conversores de Energia das Ondas (WEC):

3.3.1 Coluna de Água Oscilante (Oscillating Water Column)

Estes dispositivos são estruturas parcialmente submersas, em forma de câmara contendo uma abertura inferior para o mar, permitindo que uma coluna de água oscile, subindo e descendo, por ação do movimento da onda, promovendo a compressão e a descompressão de uma coluna de ar contida na câmara, sobre a coluna de água. Esta variação de pressão da coluna de ar faz acionar uma turbina, usualmente de sentido reversível, Figura 3.1.

Estes dispositivos são habitualmente instalados na linha de costa, embora existam também dispositivos ”CAO” flutuantes (AQUA-RET, 2014).

Figura 3.1 – Coluna de Água Oscilante (Oscillating Water Column)

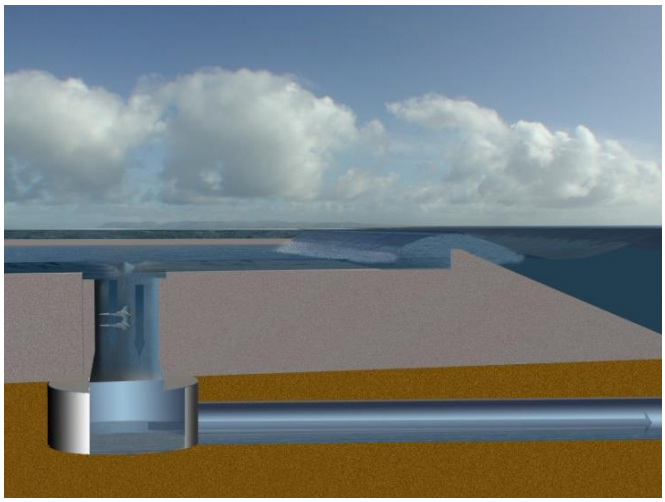


Fonte: AQUA-RET, (2014).

3.3.2 Dispositivos de Galgamento (*Overtopping Device*)

Este tipo de dispositivos utiliza o galgamento da onda por uma estrutura semi-submersa em forma de rampa, que eleva a água do mar, capturando-a num reservatório acima da linha do nível do mar. Esta água é depois devolvida à massa de água do mar através de convencionais turbinas de baixa queda, instaladas no fundo do reservatório. São conhecidos dispositivos deste tipo instalados de forma fixa (estruturas na linha de costa) e ainda flutuantes, Figura 3.2 (AQUA-RET, 2014).

Figura 3.2 - Dispositivos de Galgamento (Overtopping Device)

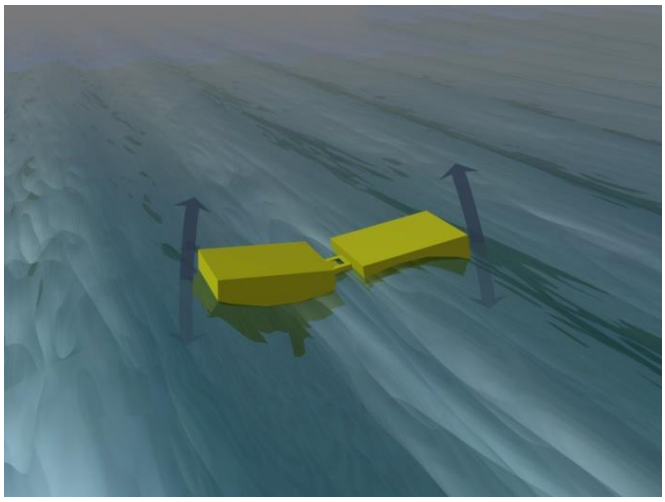


Fonte: AQUA-RET, (2014).

3.3.3 Atenuadores

São dispositivos flutuantes alinhados perpendicularmente em relação à frente de onda, flutuando sobre esta e captando a energia quando estes são atravessados, efetuando um movimento progressivo ao longo do seu comprimento, Figura 3.3 (AQUA-RET).

Figura 3.3 - Conversor flutuante (Atenuador)

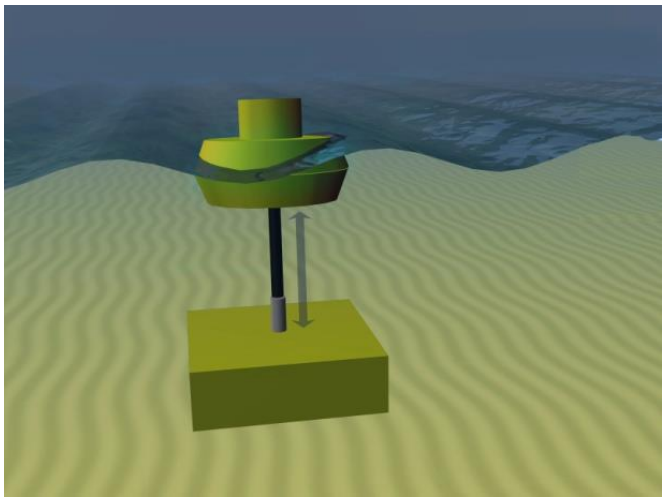


Fonte: AQUA-RET, (2014).

3.3.4 Sistema Oscilante de Simetria Axial (Point Absorber)

Dispositivos flutuantes que absorvem energia proveniente de qualquer direção decorrente dos movimentos da superfície da água, à passagem de uma onda, tendo capacidade para absorver energia de uma área de mar superior às dimensões do dispositivo, Figura 3.4, (AQUA-RET, 2014).

Figura 3.4 - Sistema Oscilante de Sistema Axial (Point Absorber)

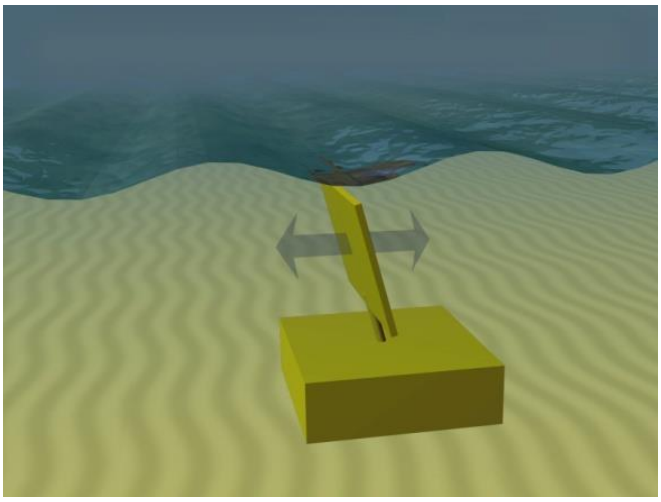


Fonte: AQUA-RET, (2014).

3.3.5 Conversores Oscilantes de Translação das Ondas (Oscillating Wave Surge Converters)

Dispositivos submergidos e fixos ao leito oceânico, contudo com a parte coletora próximo da superfície, que aproveitam a energia criada por vagas de ondas e o movimento de partículas de água por elas provocadas. Possuem um braço oscilatório de movimento pendular invertido, conectado a uma articulação que responde ao movimento da água induzido pela onda, Figura 3.5 (AQUA-RET, 2014).

Figura 3.5 - Conversores Oscilantes de Translação das Ondas (Oscillating Wave Surge Converters)

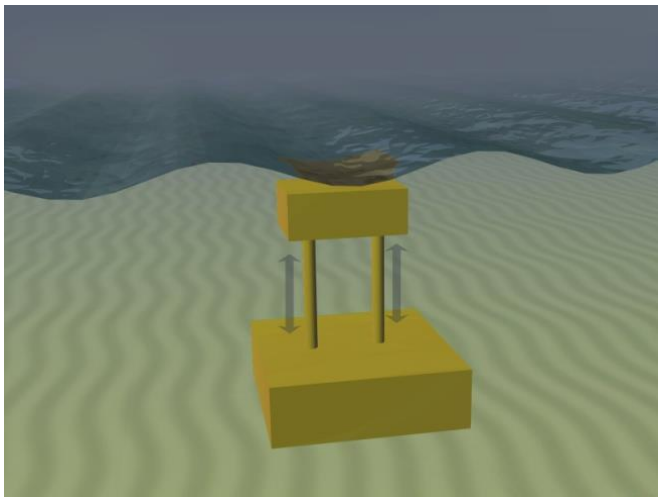


Fonte: AQUA-RET, (2014).

3.3.6 Dispositivos Submersos de Diferença de Pressão (Submerged Pressure Differential)

Dispositivos submersos, habitualmente instalados perto da linha de costa e fixos no leito marinho. A passagem das ondas provoca a subida e a descida do nível do mar sobre o dispositivo, induzindo uma pressão diferencial neste, a que corresponde um movimento tipo-pistão de um sistema hidráulico de forma a gerar eletricidade, Figura 3.6 (AQUA-RET, 2014).

Figura 3.6 - Dispositivos Submersos de Diferença de Pressão (Submerged Pressure Differential)



Fonte: AQUA-RET, (2014).

3.4 Comentários e encaminhamentos

Como foi apresentado, são três os principais tipos de energia extraíveis do mar. Já as tecnologias desenvolvidas para extração estão presentes em maior número. Este trabalho se propões a implementar em ATP/EMTP o modelo dinâmico desenvolvido para usina de Pecém-CE, e que é apresentada no capítulo 4.

4 CONVERSOR DESENVOLVIDO PELA COPPE/UFRJ E APRESENTAÇAO DO PROBLEMA

A primeira usina de ondas para a geração de energia elétrica da América Latina foi instalada no porto de Pecém, a 60 quilômetros de Fortaleza. Projetada e construída pela COPPE /UFRJ com financiamento da Tractebel Engenharia, por meio do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), e apoio do governo do Ceará (TN SUSTENTÁVEL, 2013).

Por ser experimental, a usina é formada por apenas dois módulos (dois conjuntos de flutuador, braço mecânico e bomba), Figura 4.1, com capacidade de produzir 100 kW, mas o projeto é concebido para comportar dezenas de módulos iguais a esses, multiplicando a capacidade instalada, (COPPE, 2014).

Figura 4.1 – Componentes da planta piloto

Fonte: Rosa, (2013).

Apesar da variedade de conversores de energia utilizados no mundo, ainda não se chegou a uma conclusão de qual tecnologia é mais eficiente, principalmente no que diz respeito ao sistema de armazenamento utilizado que apresenta um custo significativo em relação ao custo total do projeto (MACHADO, 2013). A principal vantagem do conversor utilizado no porto de Pecém-CE é possibilitar a simulação de elevadas quedas d'água sem que para isso seja necessário ocupar áreas de grande extensão, como exigem as hidrelétricas (PLANETA COPPE, 2006). Este conversor se enquadra na classificação 3.3.4 apresentada anteriormente.

4.1 Descrição de funcionamento

O sistema de conversão hiperbárica da energia das ondas foi desenvolvido pelo Laboratório de Tecnologia Submarina (LTS) da COPPE/UFRJ e é descrito em várias bibliografias (BOZZI, 2012) (COSTA, 2004) (MACHADO, 2013) (ROSA, 2008) (ROSA, 2013). O princípio da extração de energia se inicia pelos flutuadores, que funcionam como boias, se movimentando na vertical, acompanhando o movimento das ondas. Através do movimento dos flutuadores os braços mecânicos, que funcionam como alavancas conectadas ao flutuador e a uma base fixa, acionam bombas hidráulicas. Esta bomba é composta de um pistão preso ao braço mecânico. No movimento de descida da onda o braço mecânico pressiona este pistão que comprime a água injetando-a no acumulador hidropneumático. Essa bomba possui dutos que fazem a realimentação da água quando o flutuador está no movimento de subida. A água utilizada no sistema é doce e reutilizada, formando um circuito fechado. Toda água que colide com a turbina hidráulica é acumulada num recipiente e novamente bombeada ao sistema hidráulico, como representado na Figura 4.2.

O acumulador hidropneumático é responsável pelo armazenamento de energia. Ele é composto por uma entrada, onde recebe a água injetada pela bomba, e uma saída, onde é liberada a vazão de água na turbina. Um êmbolo móvel se desloca verticalmente à medida que a água entra e sai do acumulador e no movimento de subida é feito o armazenamento de energia por compressão de ar.

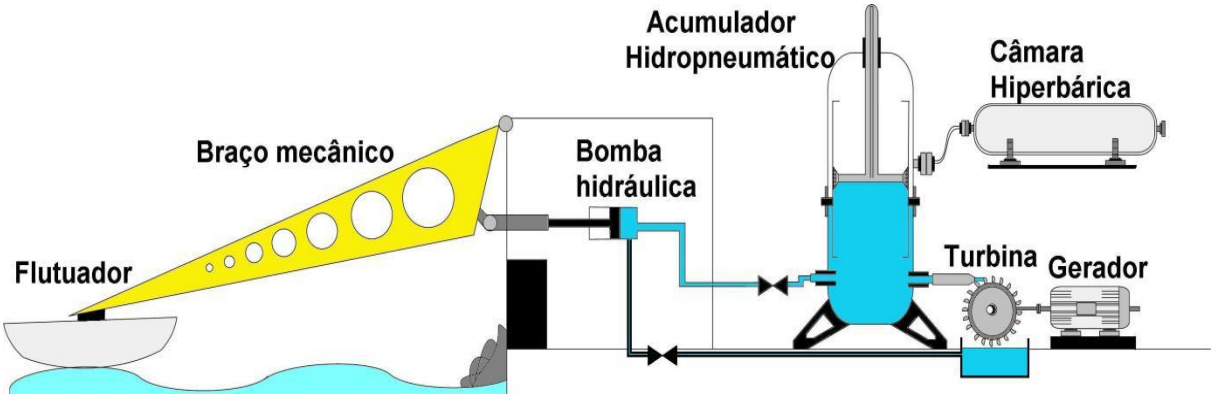
O acumulador hidropneumático tem como principais funções, absorver as intermitências dos pulsos de água injetados pela bomba e injetar água na turbina com velocidade suficiente para a máquina atuar como gerador. Por esses motivos, o acumulador possui uma câmara hiperbárica, Figura 4.2, que fornece um maior volume (absorvendo melhor as intermitências) e alta pressão de ar.

Após a bomba injetar água no acumulador, a água é liberada sob alta pressão para acionar uma turbina do tipo Pelton através de uma agulha móvel de área variável, semelhante a uma válvula. Essa área é modificada à medida que se deseja alterar a vazão de água fornecendo

mais ou menos energia. A turbina hidráulica é responsável por fornecer o torque mecânico suficiente à máquina elétrica para transformar a energia cinética em elétrica.

A Figura 4.2 ilustra o sistema de conversão de energia completo, desde as ondas que incidem nos flutuadores até a geração de eletricidade.

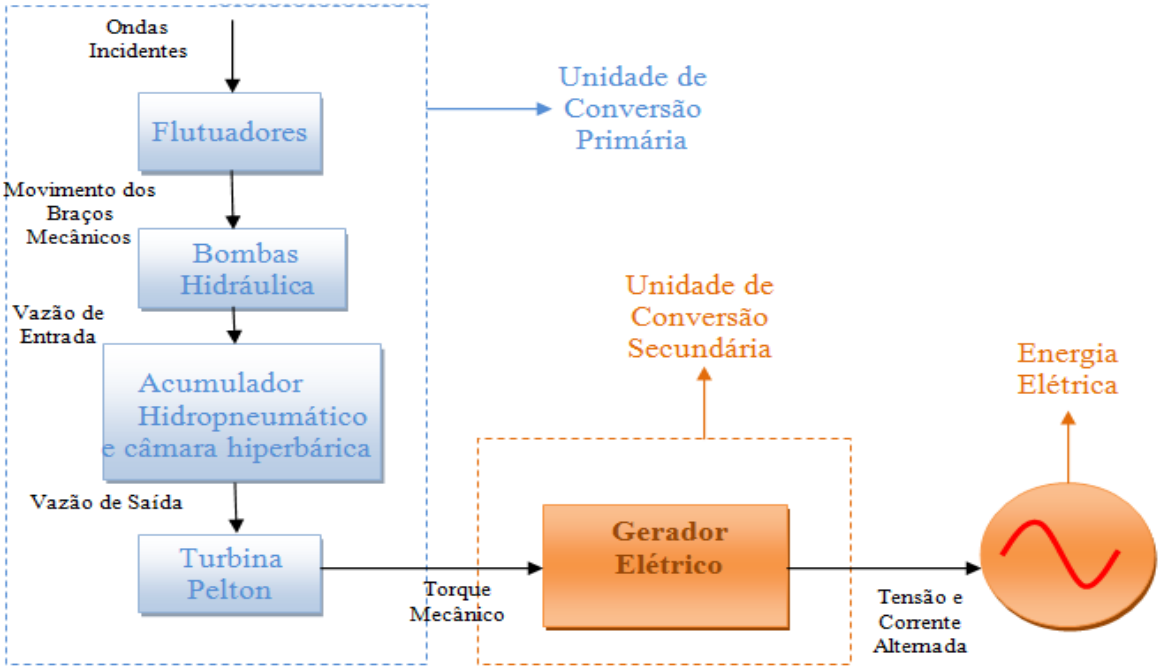
Figura 4.2- Sistema de geração de energia elétrica a partir das ondas do mar



Fonte: Bozzi, (2012).

De forma geral as etapas de conversão da energia das ondas são divididas em duas etapas, que será denominada durante o texto de *conversão primária* e *conversão secundária* como ilustrada na Figura 4.3.

Figura 4.3 - Etapas de conversão da energia das ondas em energia elétrica



Fonte: Produção do próprio autor.

Por *conversão primária* compreende-se a parte do sistema que converte a energia das ondas em energia cinética (movimento dos flutuadores), posteriormente em energia potencial através da água inserida no sistema hidráulico a uma determinada pressão e vazão e por último, a conversão de energia potencial em energia cinética através da ação do jato d'água na turbina hidráulica. Na unidade de *conversão secundária*, a energia mecânica da turbina em forma de torque e velocidade é convertida então em energia elétrica, ou seja, ocorre a conversão eletromecânica. A energia elétrica produzida poderá então alimentar uma carga isolada ou ser injetada na rede elétrica (MACHADO, 2013).

Nos dois próximos capítulos será apresentada a modelagem analítica de cada etapa de conversão. Após o desenvolvimento do modelo serão feitas simulações para a verificação do comportamento do sistema.

5 MODELAGEM DA UNIDADE DE CONVERSÃO PRIMÁRIA

O modelo analítico deste sistema de conversão, tanto primária quanto secundária, se faz necessário para que, a partir dele, possam ser feitas simulações e assim compreender a dinâmica do sistema. No software ATP/ATPDraw são construídos os módulos responsáveis por cada etapa de conversão da energia do mar e em cada módulo são descritas as equações que modelam o sistema.

Em Massel (1996, citado por ROSA, 2013) e Estefen (2003) as ondas do mar são formadas por diversos fatores e existem cinco tipos básicos de ondas oceânicas: a onda *sonora* formada pela compressibilidade da água do mar.; as ondas *capilares* formadas entre a superfície de contato entre o ar e a água com a combinação de ventos turbulentos e a tensão na superfície; as ondas *planetárias* são formadas pela variação do vórtice de equilíbrio potencial, devido a modificações na profundidade ou latitude o que resultam em padrões mais complicados de oscilações; na interface entre camadas de diferentes massas específicas no oceano ocorrem às ondas *internas,* cuja geração está associada a algum tipo de instabilidade no fluxo, por exemplo, variações bruscas no perfil vertical de velocidades; finalmente, as ondas *superficiais de gravidade,* nas quais a gravidade é a principal força restauradora e o vento é a força geradora. Devido a esta diversidade, o oceano apresenta uma variedade ampla de comprimento de onda e período.

De fato o comportamento do mar é modificado aleatoriamente, a altura e período mudam de um ciclo para outro. Geralmente o mar é modelado como um processo estocástico, resultado da superposição de várias componentes monocromáticas de frequências diferentes, (THORPE, 1999 citado por ROSA, 2013). Desta forma a altura significativa e o período médio das ondas são determinados por parâmetros estatísticos. Define-se altura significativa (*Hs*) sendo a média aritmética da terça parte (1/3) das maiores ondas observada e período médio (*Tmed*) é a média aritmética dos períodos observados de um intervalo de tempo.

Devido à complexidade matemática do equacionamento que descreve o comportamento da onda do mar, demonstrado em Parsons&Baddour, (2004) citado por ROSA, (2008), este

trabalho será desenvolvido considerando que o mar seja regular, ou seja, com um perfil senoidal (frequência única).

Considera-se que para um determinado estado de mar (duração de aproximadamente 3 a 4 horas) os parâmetros estatísticos *Hs* e *Tmed* permanecem constantes (ESTEFEN, 2003). Esses parâmetros são utilizados para fazer o levantamento de potência de onda.

Ondas superficiais de gravidade, geradas pelo vento, são o principal agente físico que governa a dinâmica dos ambientes marinhos, representando a principal e mais constante fonte de transporte de energia no mar (PIUMBINI, 2009).

Em Piumbini (2009), é feito o estudo da caracterização do clima de ondas superficiais de gravidade na região marinha adjacente ao estado do Espírito Santo até uma profundidade de cerca de 4500m durante o ano de 2001. A Tabela 2 apresenta a distribuição de ocorrência de período médio e altura significativa do mar durante os períodos sazonais. Os valores foram lidos de gráficos, portanto são valores aproximados.

Tabela 2 – Distribuição de ocorrência de período médio Tmed e Hs

		Geral	Verão	Outono	Inverno	Primavera
		Distribuição de ocorrência de período médio Tmed (%)				
Tmed(s)	5-6	3	5	1	1	3
	6-7	18	26	7	13	22
	7-8	28	35	23	27	34
	8-9	27	22	34	30	25
	9-10	15	10	22	17	12
	10-11	7	4	2,5	8	4
		Distribuição da altura significativa Hs(%)				
Hs(m)	0.5-1	2	4	1	1	0,5
	1-1.5	40	50	35	35	32
	1.5-2	40	35	40	40	45
	2-2.5	15	9	17	16	16
	2.5-3	4	1	5	5	4

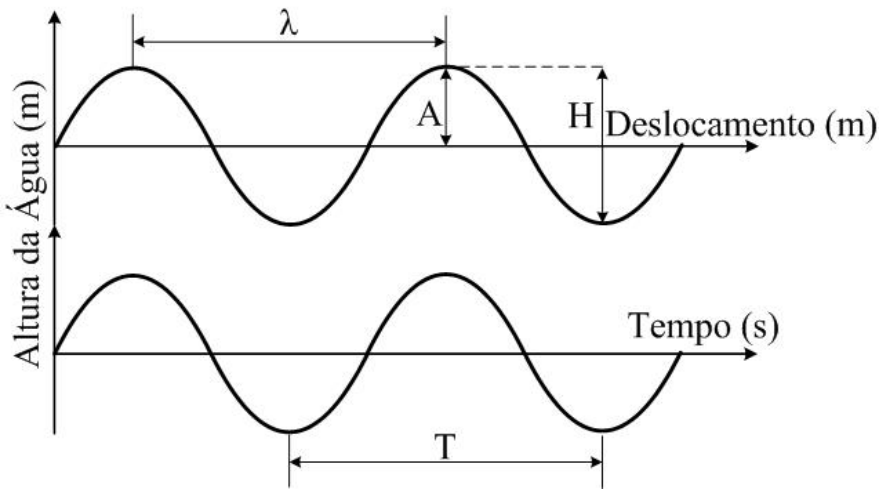
Fonte: Produção do próprio autor.

A modelagem da conversão primária é descrita como mostra Machado, (2013).

5.1 Conceitos Básicos em Energia das Ondas

Os principais elementos de uma onda regular e monocromática são apresentados na Figura 5.1. Define-se como comprimento de onda (λ) a distância entre duas cristas sucessivas, amplitude de onda (A) a distância entre a crista e o nível de referência zero, altura de onda (H) a distância entre uma crista e um vale e período (T) o intervalo de tempo entre duas cristas sucessivas.

Figura 5.1 - Definições básicas de uma onda regular e monocromática



Fonte: MACHADO, (2013).

Em mares reais a relação entre o comprimento de onda (λ) em *m*, a profundidade do oceano (h) também em *m*, e o período (T) é dada por, (FALNES, 2002):

$$\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 = g\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) tanh\left(\frac{2\pi}{\lambda}h\right) \tag{1}$$

Onde $\omega = \frac{2\,\pi}{T}$ é a frequência natural da onda, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ é o número de onda e g é aceleração da gravidade em m/s^2, que resulta em:

$$\omega^2 = g(\,k)tanh(\,kh) \tag{2}$$

Em águas profundas pode-se considerar que $tanh(kh) = 1$, o que na prática significa que a profundidade do mar (h) é suficientemente maior que a metade do comprimento de onda ($\lambda/_2$), (ESTEFEN, 2003) então:

$$\omega^2 = gk \tag{3}$$

A energia total de uma onda é dividida em duas componentes, a energia potencial e a energia cinética. A energia potencial é associada com a elevação da onda e a energia cinética associada com o deslocamento ou velocidade das partículas de água. Segundo Bregman, citado por Machado (2013) , a expressão que calcula a densidade de energia total contida na superfície, em J/m^2, para ondas regulares é dada por:

$$E_w = \frac{(\rho g H^2)}{8} \tag{4}$$

Onde ρ é a massa específica da água em kg/m^3. De (3), em águas profundas, a relação entre o período e o comprimento de onda é:

$$\lambda = \frac{(gT^2)}{2\pi} \tag{5}$$

De acordo com a teoria linear (MÉHAUTÉ, (1976) citado por ALBUQUERQUE, (2008)), a transferência de energia ou fluxo de energia por unidade de crista de onda em *W/m* é dada por:

$$P_w = E_w \frac{v_w}{2} \quad P_w = E_w \frac{\lambda}{2T} \tag{6}$$

onde $v_w = (\lambda/T)$ é a velocidade de propagação da onda. Substituindo (4) e (5) em (6), obtém-se a expressão em *kW/m* de crista de onda:

$$P_w = \frac{(\rho g^2 H^2 T)}{32\pi} \approx H^2 T \tag{7}$$

Devido às perdas de todo o sistema (flutuadores, bombas hidráulicas, turbina , gerador, etc.) os conversores de energia das ondas não absorvem toda a energia, em mares reais, ou seja, com ondas irregulares, a relação aproximada é dada por,(ESTEFEN, 2003) :

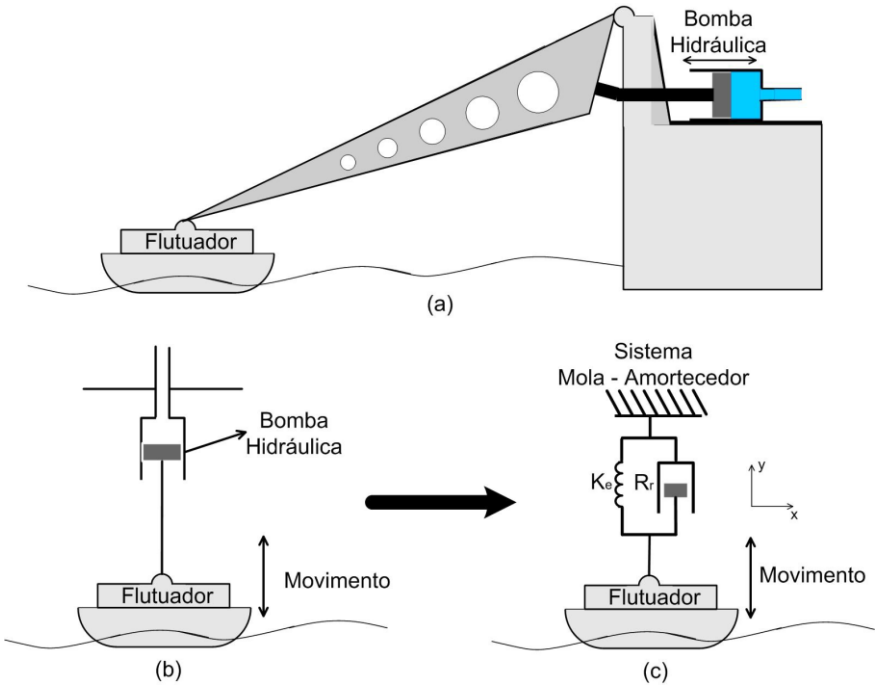
$$P_w \approx 0.49 {H_s}^2 T_{med} \tag{8}$$

5.2 Flutuador e Bomba Hidráulica

Nesta sessão, considera-se a modelagem matemática de conversores de energia das ondas do tipo corpos oscilante. Será apresentada a modelagem do conjunto flutuador-bomba hidráulica interagindo com as ondas, Figura 5.2 (a). Para este trabalho será considerado apenas um flutuador interagindo com a onda regular.

São consideradas algumas simplificações no modelo analítico para as análises seguintes. Como demonstrado por Rosa (2010) considera-se que o flutuador seja acoplado diretamente à bomba hidráulica como mostrado na Figura 5.2 (b) e ainda que a atuação do flutuador e braço mecânico sobre a bomba é similar à atuação sobre um sistema massa mola como mostrado na Figura 5.2 (c).

Figura 5.2 - Unidade de conversão primária do conversor de energia das ondas – (a) Modelo completo, (b) Modelo simplificado e (c) Modelo equivalente



Fonte: MACHADO, (2013).

Para as análises, as seguintes hipóteses são assumidas (ROSA , 2013):

- As águas são profundas, i.e., a profundidade do mar é muito maior que a metade do comprimento de onda;
- A amplitude das ondas e as oscilações do flutuador são suficientemente pequenas, se comparadas ao comprimento de onda, e assim a teoria linear da heterodinâmica pode ser aplicada (LEVI, 2004);
- O flutuador é do tipo absorção pontual com apenas um grau de liberdade, e o movimento vertical.

Desta forma a equação que determina a dinâmica do flutuador é desenvolvida a partir da análise do modelo equivalente da Figura 5.2 (c):

$$M\ddot{y}(t) + R_r\dot{y}(t) + k_e = F_e + F_p \tag{9}$$

onde M é a massa do flutuador (kg), R_r é o coeficiente de amortecimento potencial ou coeficiente de radiação (kg/s), K_e o coeficiente de elasticidade do corpo oscilante (N/m). As forças externas aplicadas ao flutuador são: a força da onda F_e e do pistão F_p.

De acordo com Greenhow & White (1997) e Cummis (1962) citado por Machado (2013):

> Devido ao movimento oscilatório do corpo flutuante ocorre uma irradiação de ondas na superfície livre do mar. Estas ondas irradiadas se afastam do corpo, porém ainda continuam afetando seu movimento nos instantes subsequentes devido à interação com as ondas incidentes. A modelagem deste fenômeno proporciona um acréscimo de massa ao corpo oscilante denominada massa adicional (Mr).

Assim (9) torna-se:

$$(M + M_r)\ddot{y}(t) + R_r\dot{y}(t) + k_e = F_e + F_p \tag{10}$$

De acordo com Falnes, (2002), a força de excitação (F_e) aplicada a um determinado corpo oscilante devido à ação de uma onda regular como apresentada na Figura 5.2 é dada por:

$$\mathrm{F_e}(t) = \sqrt{\left(\frac{2\rho g^2 A^2 R_r}{\omega k}\right)}\sin(\omega \mathrm{t}) \tag{11}$$

Durante o movimento de descida do flutuador ocorre o estágio de compressão da bomba e é quando o pistão injeta água no reservatório. Assim, a pressão no pistão se iguala a pressão no interior da bomba. Durante o movimento de subida do flutuador ocorre o estágio de admissão da bomba, quando o volume interno da bomba enche de água , nesta situação a pressão do pistão é praticamente igual a pressão atmosférica.

Assim a força que o pistão exerce sobre o corpo oscilante, F_p, é dada por:

$$F_p = \begin{cases} A_1 P_1, & \dot{y} \leq 0 \\ 0, & \dot{y} > 0 \end{cases} \tag{12}$$

onde P_1 (em pascal) e A_1 (em m²) representam a pressão interna do sistema hidráulico e área da seção transversal da bomba hidráulica, respectivamente (ver Figura 5.3).

Por fim, a vazão de entrada para o sistema hidráulico é dada por:

$$Q_{in}(t) = \begin{cases} A_1\dot{y}, & \dot{y} \leq 0 \\ 0, & \dot{y} > 0 \end{cases} \tag{13}$$

5.3 Acumulador Hidropneumático e Câmara Hiperbárica

O acumulador hidropneumático, apresentado na Figura 5.3, é composto por um êmbolo móvel que se desloca em movimento vertical sendo que este movimento será considerado sem atrito. Internamente ele é composto por ar, acima do embolo, e água abaixo do embolo. Quando a vazão de entrada Q_{in} é maior que a vazão de saída Q_{out} o pistão sobe liberando água para a turbina hidráulica e armazenando energia em forma de compressão de ar. De forma dual, quando a vazão de entrada Q_{in} é menor que a vazão de saída Q_{out} , o pistão desce liberando a energia que estava armazenada injetando água para a turbina e mantendo o ciclo da água no reservatório. A câmara hiperbárica, Figura 5.4, é conectada diretamente à parte superior do acumulador, sendo ela o dispositivo para armazenagem do ar comprimido, mantendo a pressão a um dado volume. Então quando se trata do volume do acumulador está considerando-se também o volume superior da câmara.

Em Levi (2004) são apresentado modelagens de sistemas hidráulicos. Para este sistema as variáveis são descritas a baixo:

P – Pressões em N/m2;

h – Alturas de líquido em m;

V – Velocidades do líquido em m/s;

g – Aceleração da gravidade em m/s²;

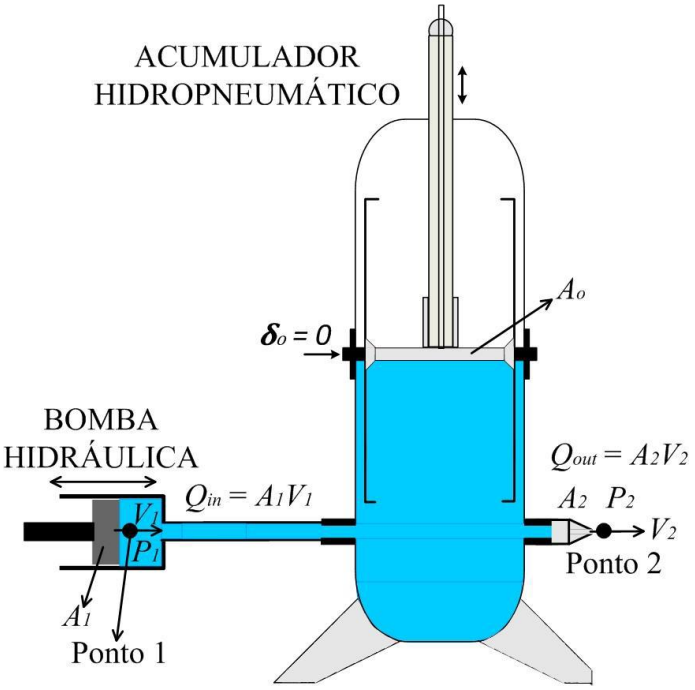
A – Áreas das secções transversais;

ρ – Massa específica em kg/m³;

δ – Posição do pistão interno do acumulador hidropneumático em m;

Q – vazões em m³/s.

Figura 5.3 - Topologia do acumulador hidropneumático e variáveis envolvidas na modelagem.



Fonte: MACHADO, (2013).

Figura 5.4 - Câmara hiperbárica

Fonte: BOZZI, (2012).

Aplicando a equação de *Bernoulli*, (LIVI, 2004), tem-se que:

$$\mathrm{P}_1 + \frac{1}{2}\rho {V_1}^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho {V_2}^2 + \rho g h_2 \tag{14}$$

Observando a Figura 5.3, os pontos 1 e 2 encontram-se num mesmo nível de referência, logo em (14) os termos relacionados com as alturas de líquido se anulam. Desta forma, a velocidade do jato d'água na saída do acumulador (V_2) é dada por:

$$V_2(t) = \sqrt{V_1(t)^2 + \frac{2}{\rho}(P_1(t) - P_2)} \tag{15}$$

Nota-se que a pressão no ponto 2 (P_2) é a pressão atmosférica (1 atm ou 10^5 N/m2) e que a pressão interna do sistema hidráulico, P_1, varia de acordo com variação do pistão interno. Considerando as compressões e expansões do gás contido na câmara hiperbárica sendo isotérmicas (MACHADO, 2013), utiliza-se a lei *de Boyle-Mariotte* ,que analisa a transformação gasosa isotérmica de um sistema:

$$P_1(t) = \frac{P_0 V_{L0}}{V_{L1}(t)} \tag{16}$$

que aplicado ao sistema torna-se:

$$P_1(t) = \frac{P_0 V_{L0}}{V_{L0} - \delta(t) A_0} \tag{17}$$

onde P_o e V_{Lo} representam a pressão e volume de gás iniciais na câmara (considerado também o volume do acumulador hidropneumático acima do êmbolo), respectivamente.

Na prática, a velocidade V_2 é muito maior que V_1. De (15) observa-se que V_2 é influenciada majoritariamente pela pressão interna P_1. De (17) tem-se que P_1 é função de δ. Conclui-se então que a velocidade do jato d'água na saída do acumulador V_2 é função da posição δ.

O deslocamento instantâneo do pistão, *δ(t)***,** é obtido a partir da diferença entre os volumes d'água que entra e sai do acumulador. Considerando o volume como sendo a integral da vazão:

$$\delta(t) = \frac{1}{A_0}\int Q_{int}(t)dt - \frac{1}{A_0}\int Q_{out}(t)dt + \delta_0 \tag{18}$$

onde Q_{in}, Q_{out} e $\boldsymbol{\delta}_o$ são vazão de entrada, vazão de saída e posição inicial do pistão, respectivamente. E $Q_{out}(t) = A_2 V_2(t)$, então:

$$\delta(t) = \frac{1}{A_0}\int Q_{int}(t)dt - \frac{A_2}{A_0}\int V_2(t)dt + \delta_0 \tag{19}$$

A potência hidráulica na saída do acumulador hidropneumático pode ser dada por:

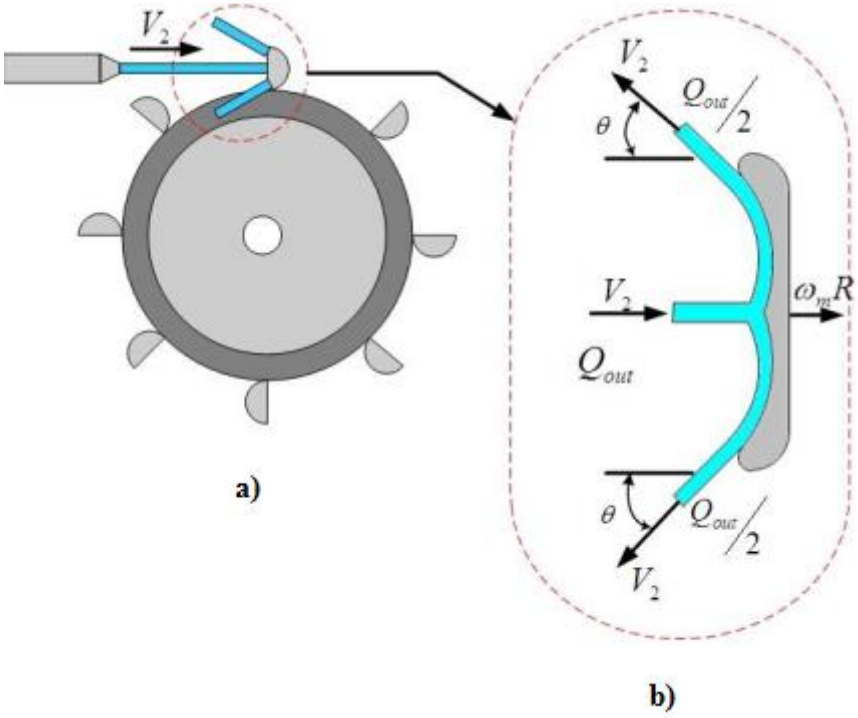
$$\mathrm{P_h(t)} = P_2 V_2(t) A_2 \tag{20}$$

5.4 Turbina Hidráulica

Após a modelagem do sistema de armazenamento é feito a modelagem da turbina apresentada na Figura 5.6. A turbina hidráulica é responsável por transformar a potência do jato de água da saída do acumulador hidropneumático em potência mecânica, na forma de torque mecânico $\mathrm{T_m}$ e velocidade mecânica ω_m.

A turbina escolhida no projeto de Pecém-CE é do tipo Pelton. Este tipo de turbina é ideal para operações em baixa vazão e altas pressões, como é o caso do projeto estudado. Ela é constituída por uma roda com várias pás em forma de conchas, Figura 5.5 (a).

Figura 5.5 - Topologia da turbina hidráulica e variáveis envolvidas na modelagem.



Fonte: MACHADO, (2013).

De acordo com LEVI (2004), a ação de um jato de água a certa vazão Q_{out} e uma velocidade V_2 gera um torque mecânico na turbina. Define-se um volume de contorno (V.C) entre a saída do jato de água e a pá da turbina Pelton, ilustrada na Figura 5.5 (b).

Considera-se que após a colisão com a concha, o volume d'água incidente é dividido em duas partes iguais e formando uma angulação θ em relação à horizontal. A expressão que calcula o torque mecânico da turbina é desenvolvida a partir do somatório dos momentos angulares que entram e saem do volume de contorno, dado por:

$$T_m = \begin{pmatrix} Fluxo\ de\ momento \\ angular\ que\ entra\ no\ VC \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Fluxo\ de\ momento \\ angular\ que\ sai\ no\ VC \end{pmatrix} \tag{21}$$

que substituindo os parâmetros apresentados na Figura 5.3, obtém-se:

$$T_m = R_t(V_2 - \omega_m R_t)\rho Q_{out} + R_t(V_2 - \omega_m R_t)\cos\theta\,\rho\left(-\frac{Q_{out}}{2}\right) + R_t(V_2 - \omega_m R_t)\,cos\,\theta\,\rho\left(-\frac{Q_{out}}{2}\right) \quad (22)$$

Onde R_t é o raio da turbina. Reorganizando as variáveis, o torque do eixo será:

$$T_m = R_t(V_2 - \omega_m R_t)(1 - cos\,\theta)\rho Q_{out} \quad (23)$$

Tornando (23) em função da velocidade V_2, tem-se:

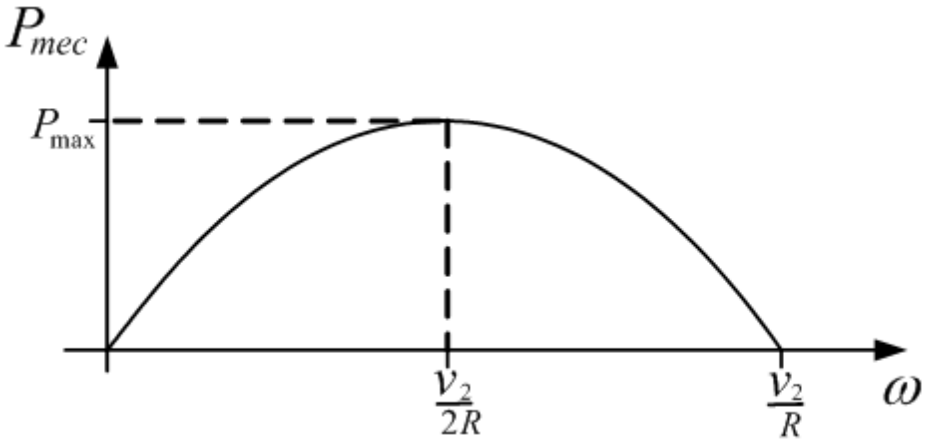
$$T_m = R_t(V_2 - \omega_m R_t)(1 - cos\,\theta)\rho \mathrm{A}_2 V_2 \quad (24)$$

Portanto a potência mecânica pode ser calculada por:

$$\mathrm{P}_m = R_t\omega_m(V_2 - \omega_m R_t)(1 - cos\,\theta)\rho \mathrm{A}_2 V_2 \quad (25)$$

Analisando (25), percebe-se que P_m é uma função quadrática de ω_m. O perfil da variação em função da velocidade mecânica está representado na Figura 5.6 onde mostra o ponto de máximo da potência, porém não faz parte do escopo deste trabalho um controle para máxima extração de potência da turbina.

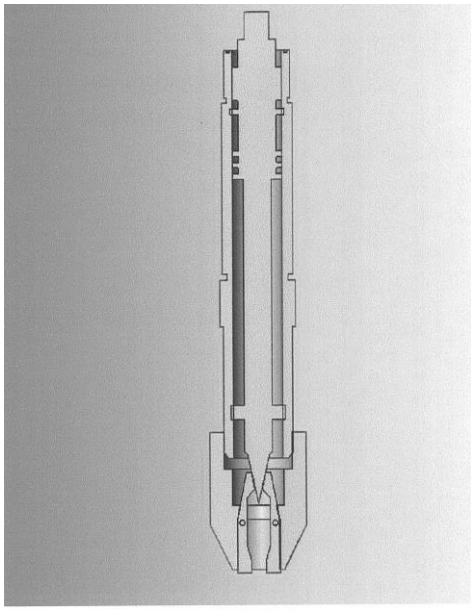
Figura 5.6 - Potência mecânica da turbina (kW) em função da velocidade mecânica



Fonte: MACHADO, (2013).

A potência da turbina pode ser controlada pela área da secção A_2 da válvula de saída do acumulador hidropneumático que consequentemente altera a vazão de saída Q_2 ou velocidade V_2. A Figura 5.5 mostra um exemplo de uma válvula reguladora semelhante à utilizada no projeto.

Figura 5.7 - Desenho em corte da Válvula Reguladora de Vazão



Fonte: COSTA, (2004).

6 MODELAGEM DA UNIDADE DE CONVERSÃO SECUNDÁRIA

Como visto anteriormente, a conversão secundária da energia das ondas se define basicamente pela conversão eletromecânica realizada pelo gerador elétrico. Dentre os tipos de geradores existentes, os geradores síncronos produzem a maior parte da energia elétrica consumida no mundo, formando uma das famílias de máquinas elétricas mais importantes.

Segundo Estefen (2012) e Machado (2013)**,** o gerador utilizado na usina de ondas no porto de Pecém-CE, é um gerador do tipo trifásico síncrono, 100 kVA, 380 V, 60 Hz, quatro polos. No local não há rede elétrica disponível, devida a distância da instalação à costa. Desta forma,

para aplicação isolada da rede, foi escolhida a utilização do gerador sem a utilização de conversores eletrônicos. O controle de frequência e tensão elétrica se trona mais simples, logo a um menor custo.

Neste trabalho utiliza-se de um gerador síncrono de imãs permanentes (GSIP) para a conversão secundária de energia, analisando seu comportamento para a variação de carga e as grandezas associadas ao sistema de conversão de energia das ondas do mar. Considera-se apenas o caso do sistema isolado, ou seja, sem interligação com outras unidades geradoras e com apenas um gerador conectado à carga.

De Monteiro (2012), para aplicações de baixa/média potências torna-se vantajoso a utilização de imãs permanentes no campo das máquinas síncronas ao invés dos enrolamentos presentes nas máquinas convencionais. A capacidade de regulação de potência ativa é perdida, porém se ganha reduzindo os custos com manutenção dos equipamentos, já que não é necessário o sistema de anéis/escovas, nem o circuito de excitação. Uma alta potência pode ser alcançada aumentando o rendimento da máquina, devido à ausência dos enrolamentos de campo do rotor.

A seguir apresenta-se a modelagem da unidade de conversão secundária, composto pelo GSIP.

6.1 Máquina Síncrona de Ímãs Permanentes (MSIP)

Uma máquina rotativa é constituída basicamente por duas partes distintas, o indutor e o induzido. No indutor é gerado o campo magnético de excitação e no induzido ocorrem os fenômenos eletromagnéticos. Uma parte é fixa e recebe o nome de estator, outra parte é móvel e é denominada de rotor. O espaço existente entre estas duas partes designa-se de entreferro.

Em uma máquina síncrona normalmente é fornecida uma excitação cc ao enrolamento de campo (indutor) localizado no rotor e uma corrente alternada flui no enrolamento de armadura (induzido) situado no estator.

Um gerador síncrono com enrolamento de campo ao fornecer potência a uma carga, atua como uma fonte de tensão com frequência determinada pela velocidade da máquina primária. Já a corrente e fator de potência são determinado pela corrente de excitação.

As máquinas síncronas de imãs permanentes (MSIP) apresentam a estrutura do estator semelhante às máquinas síncronas convencionais em que os enrolamentos estão dispostos em ranhuras, porém não possui fonte de tensão contínua alimentando os enrolamentos de campo, pois os mesmos são substituídos por ímãs permanentes. Assumindo que o GSIP é alimentado por uma corrente de campo constante, este pode ser modelada como uma máquina síncrona convencional (FITZGERALD, 2006).

Nas aplicações trifásicas mais comuns, essas máquinas possuem enrolamentos no estator a fim de circular uma corrente trifásica gerando uma força magnetomotriz (*f.m.m*) e um campo magnético girante A velocidade de rotação desse campo é chamada de velocidade de sincronismo, cujo valor é determinado por (SEN, 1996):

$$n_s = \frac{f}{p} 120 \ [rpm] \tag{26}$$

Em que *f* é a frequência e *p* o número de pares de polos.

Nas máquinas síncronas a velocidade de rotação do eixo é igual à velocidade de sincronismo, por isso essa denominação.

Ao se criar um campo magnético constante (Φ_f) no rotor, com este girando a uma velocidade constante ω_m (rad/s), é induzido nos terminais de cada fase das bobinas do estator uma tensão, dada pela equação (SEN, 1996):

$$e_a = \omega_e N_i \Phi_f \ cos(\omega_e t) \tag{27}$$

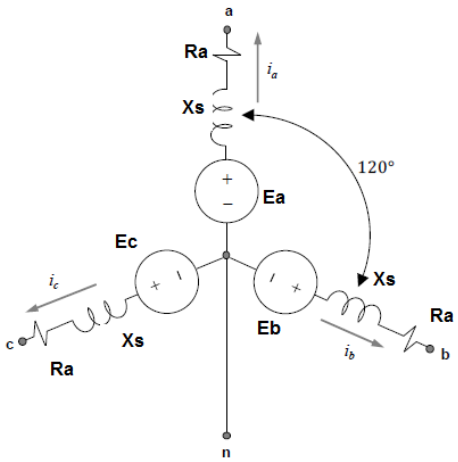
em que $\omega_e = p\omega_m$ representa a velocidade do campo magnético em radianos elétricos por segundos, e N_i é o número de espiras por fase.

O valor eficaz da tensão induzida E_a será então $E_a = \frac{\omega_e N_i \Phi_f}{\sqrt{2}}$ e a frequência $f = \frac{\omega_e}{2\pi}$.

Como o fluxo magnético do indutor é constante, a equação E_a depende apenas da velocidade síncrona da máquina.

Se o circuito do induzido (estator) for fechado alimentado uma carga, vai circular nele uma corrente responsável por perdas joulicas nos enrolamentos do estator e fugas magnéticas em torno dos condutores. Esse modelo é utilizado para estudar o funcionamento em regime permanente tanto do gerador quanto motor. A Figura 6.1 representa o circuito trifásico equivalente de um gerador síncrono, que consiste em três fontes de tensões idênticas conectadas em estrela e defasadas de 120º elétricos uma da outra. Cada fonte de tensão é conectada em série com R_a, resistência de armadura, e X_s, conhecida como reatância síncrona (FITZGERALD, 2006), características dos enrolamentos de máquina.

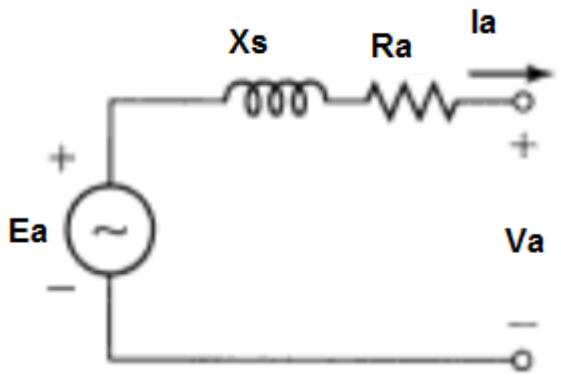
Figura 6.1 – Circuito trifásico equivalente do Gerador síncrono (Estator)



Fonte: Autoria do Próprio autor.

Alternativamente, a Figura 6.2 mostra o circuito monofásico equivalente do estator do GSIP. O sentido da corrente Ia é definido pela referência: no gerador a potência tende a sair da máquina, intuitivamente é mais satisfatório escolher o sentido onde a corrente flui para fora da máquina.

Figura 6.2 - Circuito monofásico equivalente do Gerador síncrono



Fonte: FITZGERALD, (2006).

De acordo com a Figura, para o gerador temos que:

$$V_a = E_a - \mathrm{I}_a(R_a + jX_s) \tag{28}$$

6.2 Dinâmica do rotor

Considere o gerador síncrono acionado por uma turbina representada na Figura 6.3. Desprezando as perdas por atrito, e aplicando-se a 2ª lei de Newton a esse sistema, tem-se a equação de movimento do rotor dada por:

$$T_M = T_E + J\frac{d\omega_m}{dt} \tag{29}$$

J é o momento de inércia combinado do gerador síncrono e da turbina em Kg.m².

$\boldsymbol{\omega_m}$ Velocidade angular do eixo em rad/s.

$\frac{d\omega_m}{dt}$ é a aceleração angular em rad/s².

$\boldsymbol{T_M}$ é o torque mecânico de entrada devido a ação da turbina em N.m.

$\boldsymbol{T_E}$ é Torque elétrico no gerador em N.m.

Para operação em regime permanente ou funcionamento normal → $T_M = T_E$, $\frac{d\omega_m}{dt} = 0$ e a velocidade permanece constante, entretanto durante perturbações $T_M \neq T_E$.

Entretanto, mesmo operando a vazio, há uma parcela de torque que se opõe ao movimento, gerado pelos torques mecânicos internos ao gerador:

Atrito estático: é o que torna o esforço de iniciar o movimento maior que o necessário para mantê-lo. Só interfere na partida.

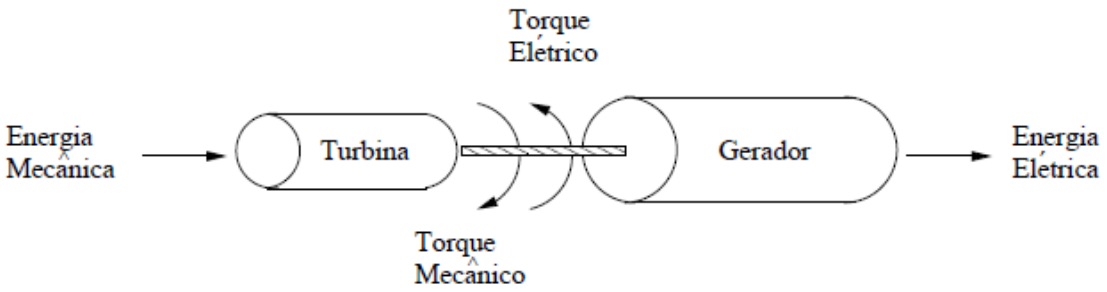
Atrito viscoso: B, produz um torque de oposição que aumenta com a velocidade, de forma proporcional.

$$T_v = \mathrm{B}\omega_m \tag{30}$$

Desta forma, em (29) é adicionada mais um termo se tornando:

$$T_M = T_E + J\frac{d\omega_m}{dt} + \mathrm{B}\omega_m \tag{31}$$

Figura 6.3 - Gerador síncrono acionado por uma turbina



Fonte: ROSA, (2008).

Quando a carga conectada aos terminais do gerador varia, tem-se uma variação instantânea no torque elétrico de saída do gerador, o que causa o desequilíbrio do torque mecânico e resulta em variações na velocidade conforme determinado pela equação.

Considerando-se pequenos desvios (expressos pelo prefixo “Δ”) em torno dos valores em regime permanente (expressos pelo subscrito 0), pode-se escrever:

$$\omega_m = \omega_0 + \Delta\omega \tag{32}$$

De (31) tem-se:

$$\Delta\omega = \frac{(T_M - T_E - B\omega_0)}{J}\Delta T \tag{33}$$

Considerando que ω_0 é a velocidade em regime tem-se:

$$\omega_m = \omega_0 + \frac{(T_M - T_E - B\omega_0)}{J}\Delta T \tag{34}$$

A equação (34) é importante para a simulação da turbina conectada ao GSIP, pois ambos são modelados em função da velocidade do eixo.

7 ESTRATÉGIA DE CONTROLE DO SISTEMA HIDRÁULICO

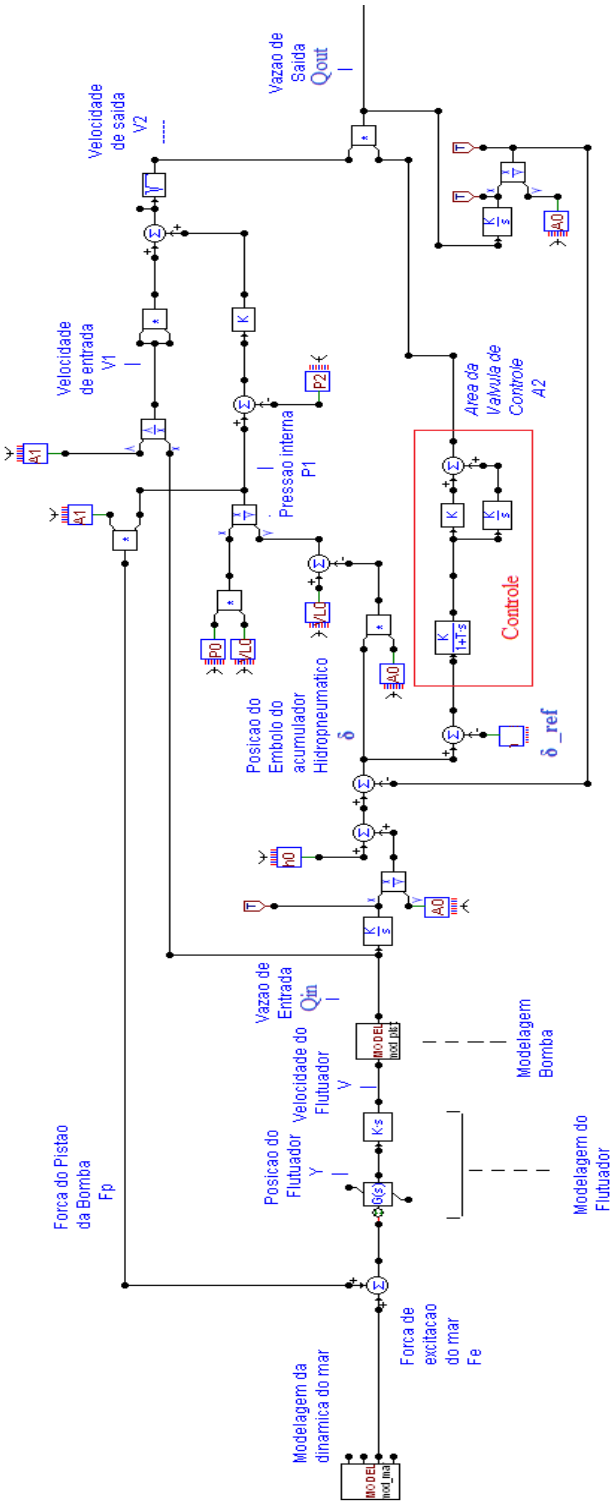
Alguns trabalhos apresentam estratégia de controle para a máxima absorção de energia. Em Rosa (2013) é feito uma metodologia de modelagem, otimização e controle para conversores de energia das ondas do tipo corpos oscilantes, considerando condições de mar real. Rosa (2008) propõe estratégias de controle que aumentem a eficiência e a qualidade da geração de energia elétrica a partir das ondas do mar. Em Machado (2013) é apresentada uma estratégia de controle do sistema hidráulico que permite o ajuste dinâmico da pressão hidráulica (sem utilização de compressores) de acordo com as mudanças do estado de mar, a fim de possibilitar maximização da eficiência dos flutuadores e o controle da conversão eletromecânica como objetivo de máximizar a eficiência da turbina de acordo com o estado mar.

É importante enfatizar que este trabalho não tem como objetivo analisar a otimização de conversão de energia em nenhuma das duas etapas (*primária e secundária*). Os modelos

apresentados nos capítulos anteriores são simplificados, pois não são foco de análises detalhadas. O principal objetivo das simulações é analisar o sistema completo (dinâmica do flutuador, do sistema hidráulico, da turbina Pelton e o GSIP) no software ATP/ATPDraw.

Em Machado (2013) a estratégia de controle do sistema hidráulico baseia-se na inclusão de uma malha de controle que atua na agulha móvel que regula a área do jato de água na saída do acumulador hidropneumático (A_2). A Figura 7.1 mostra o diagrama de blocos da conversão primária e a estratégia de controle apresentada por Machado (2013), e desenvolvida neste trabalho pela autora no software ATP/ATPDraw.

Figura 7.1 – Diagrama de blocos do modelo de conversão primária e controle do sistema hidráulico



Fonte: Produção do próprio autor.

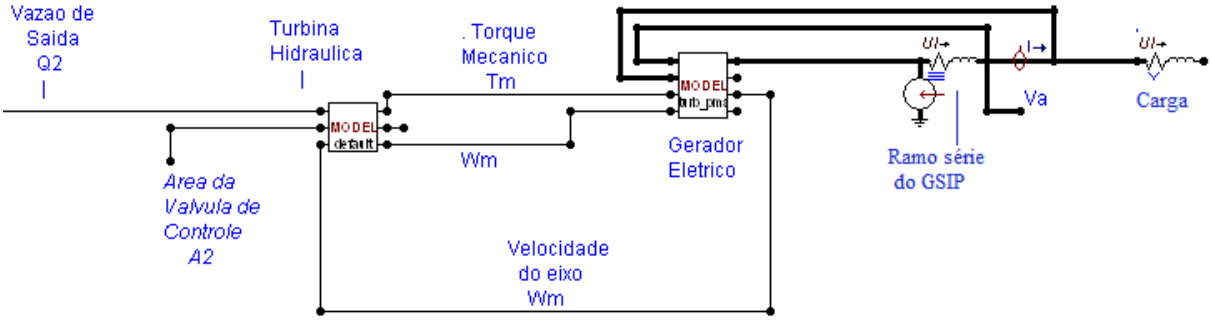
Anteriormente foi visto que a pressão interna P_1 é função da posição do pistão do acumulador hidropneumático ($\boldsymbol{\delta}$), ou seja, controlando $\boldsymbol{\delta}$ é possível controlar P_1, visto que a pressão hidráulica exerce forte influência na eficiência do sistema, tanto para eficiência da turbina quanto dos flutuadores. Obviamente, é inviável controlar a posição absoluta do pistão, pois o sistema hidráulico perderia sua função, que é a filtragem da potência oscilante. Então $\boldsymbol{\delta}$ deve ser controlada em uma posição média constante igual a referência $\boldsymbol{\delta}_{ref}$.

É desejável que a posição do pistão oscile em torno de um valor médio, a fim de manter o processo de filtragem da potência intermitente de entrada. Um filtro passa-baixa foi inserido para extrair a parcela média do erro ($\boldsymbol{\delta}$-$\boldsymbol{\delta}_{ref}$), assim apenas uma parcela média da posição será controlada. O erro filtrado é a entrada do controlador PI e a saída deste controlador é área do jato d'água (A_2), parâmetro que define a vazão de saída (Q_{out}) que é produto de A_2 por V_2.

Como pode ser observado na Figura 7.1, a referência de posição ($\boldsymbol{\delta}ref$) entra no negativo do somador e posição medida ($\boldsymbol{\delta}$) na entrada positiva, sendo assim a planta atua de forma invertida, um erro positivo ($\boldsymbol{\delta}$ maior que $\boldsymbol{\delta}ref$) a área do jato deve aumentar enquanto um erro negativo ($\boldsymbol{\delta}$ menor que $\boldsymbol{\delta}ref$) a área do jato deve diminuir.

A finalidade do controle de posição do pistão neste trabalho é verificar a influência dos diversos parâmetros do sistema hidráulico (pressão, volume e vazão) no fluxo de potência entre os sistemas de conversão, ou seja, desde as ondas até a rede elétrica. A Figura 7.2 apresenta o modelo da turbina hidráulica e conversão secundária composta pelo gerador síncrono de imãs permanentes (GSIP) alimentando uma carga fixa. No modelo, o ramo série do GSIP (resistência R_a e reatância síncrona X_s) é simulado externamente ao bloco que modula o gerador, apenas para facilitar a leitura das grandezas elétricas.

Figura 7.2 – Diagrama de blocos do modelo da turbina hidráulica e conversão secundária



Fonte: Produção do próprio autor.

7.1 Simulações e resultados

Na simulação apresentada nesta sessão considerou-se o sistema com apenas um flutuador interagindo com uma onda regular. Os parâmetros do controlador (Filtro e controlador PI) foram ajustados por tentativa, a fim de conseguir melhores resultados minimizando o tempo de resposta, o sobressinal, e as oscilações.

É importante que fique claro que nas bibliografias não foram apresentadas simulações completas do sistema, desde a dinâmica do flutuador até a geração de energia, no máximo iniciando a parti da vazão de entrada do acumulador hidropneumático. Principalmente simulações que analisassem a força de excitação do mar (F_e) e a força de reação do pistão da bomba (F_p) em escalas reais. Esses trabalhos têm como foco alguma parte do sistema, portanto não sendo interessante a apresentação de todas as variáveis. Essas forças podem ser facilmente calculadas, como demonstrado no capítulo 5, porém a força F_p é bem maior que a força F_e devido à pressão interna (P_1) do acumulador ser muito alta (variando de 2 a 3 MN/m²), neste caso F_p exerceria uma influência bem maior que a própria força do mar, o que não seria coerente. Em Machado (2013), que foi a principal referência seguida para a modelagem do sistema, não ficou claro o que foi utilizado para minimizar o efeito de F_p, portanto para que Q_{in} tivesse a mesma grandeza que a apresentada nas bibliografias foram

feitos ajustes na simulação. Foram inseridos dois ganhos nos diagramas de blocos apresentado na Figura 7.1, um ganho de 0.01 que multiplica F_p antes do somador e um ganho de 0.02 na função de transferência G(S). Desta forma, foi possível obter uma vazão de entrada semelhante aos dos trabalhos consultados.

Os parâmetros utilizados na simulação foram os mesmo que os de Machado (2013), exceto os parâmetros do filtro, controlador PI e do GSIP, uma vez que ele utiliza um gerador de indução duplamente excitado. A Tabela 3 apresenta os valores utilizados do modelo. Para todas as simulações foi utilizado um passo de calculo de 0,0001s no ATP/ATPDraw e considerado apenas resultados em regime permanentes.

Tabela 3 – Parâmetros utilizados na modelagem

Parâmetro	Descrição	Unidade	Valor
	Parâmetro		
H_s	Altura significativa	m	1,5
T_{med}	Período médio	s	6
	Flutuador		
K_e	Coeficiente de elasticidade	N/m	32587
M	Massa	kg	17000
M_r	Massa adicional	kg	12716
R_r	Coeficiente de radiação	kg/s	5379
	Turbina Hidráulica		
R_t	Raio	m	0.182
Θ	Ângulo de escape do jato	Graus	60
	Sistema Hidráulico		
A_1	Área da bomba hidráulica	m²	0,5
A_0	Área do pistão do acumulador	m²	2
g	Aceleração da gravidade	m/s²	9,81
P_0	Pressão inicial sist. hidráulico	N/m²	$2{,}5.10^6$
P_2	Pressão atmosférica	N/m²	$1{,}0.10^5$
V_{l0}	Volume da câmara	m³	5
ρ	Massa específica da água	kg/m³	1025
	GSIP		
S_n	Potência nominal	kVA	100
V_n	Tensão nominal	V	220

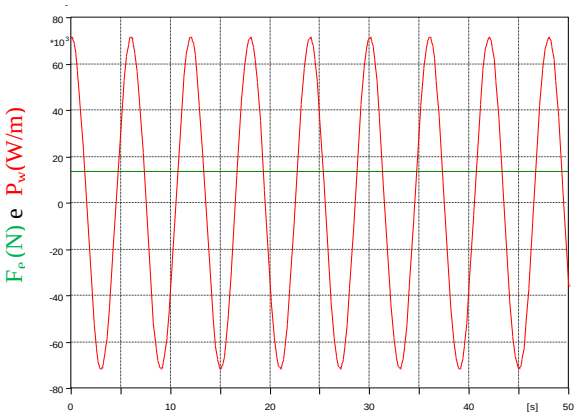
Parâmetro	Descrição	Unidade	Valor
p	Pares de polos	-	2
J	Momento de Inércia conjunto turbina/gerador	kg.m	0,1
R_a	Resistência de armadura	Ω	0.003
L_a	Indutância de armadura	mH	1
f_n	Frequência nominal	Hz	60
Filtro do Controle do sistema Hidráulico			
K_f	Ganho proporcional	-	0,0006
T_f	Constante de tempo	s	6
Controlador PI Controle do sistema Hidráulico			
K_p	Ganho proporcional	-	12
K_i	Ganho Integral	-	0,15

Fonte: Produção do próprio autor.

Inicialmente foram feitas simulações para análise do comportamento das variáveis do mar, do flutuador e da bomba. Neste caso, considera-se uma posição do pistão do acumulador hidropneumática de referência, $\boldsymbol{\delta}_{ref}$, fixa (0 m) e uma carga também fixa de 2 Ω.

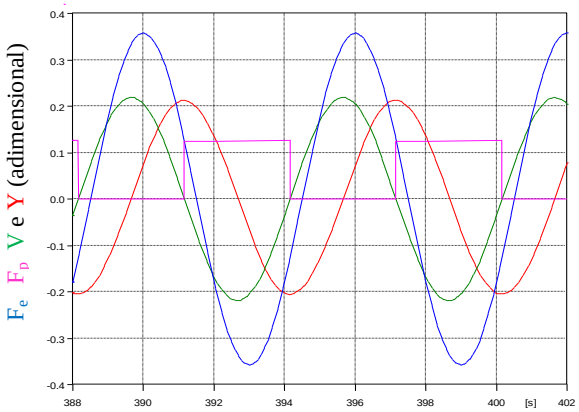
O Gráfico 7.1 ilustra o comportamento da força de excitação (F_e), também senoidal, para onda incidente com amplitude de 70 kN e fluxo de potência de 13,5 kW/m. O Gráfico 7.2 apresenta a F_e e F_p em escala reduzida. Como pode ser observada, a força do pistão (curva rosa) atua durante o movimento de descida do flutuador (curva vermelha) onde a velocidade é negativa (curva verde). No Gráfico 7.4 a vazão de entrada foi multiplicada por 10, a fim de comparação com a velocidade do flutuador. De acordo com a característica de bombeamento do sistema no movimento de descida, quando a velocidade é negativa de acordo com o referencial adotado na seção 5.2 , ocorre a injeção de água no acumulador. No movimento de subida, quando a velocidade é positiva, não há bombeamento de água (Q_{out} = 0), é quando a bomba faz a realimentação para um novo ciclo com a água do reservatório. O Gráfico 7.3 apresenta os pulsos de água (Q_{in}) injetada no sistema hidráulico pela bomba. A vazão de entrada alcança picos de 0.1093 m³/s, e uma vazão média de aproximadamente 0.034 m³/s equivalente a 34l/s. Ainda na mesma figura, tem-se a vazão de saída (Q_{out}) que apresenta mesmo valor médio de Q_{in}, porém com uma variação ΔQ bem menor (0.0331 à 0.0363 m³/s), comprovando a atuação como filtro do acumulador hidropneumático.

Gráfico 7.1– Força de excitação do mar (F_e, verde) e Fluxo de potência (P_w, vermelha)



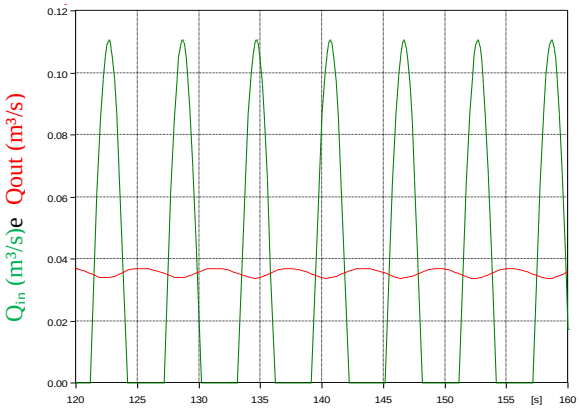
Fonte: Produção do próprio autor.

Gráfico 7.2–Força de Excitação (F_e, azul), Força do Pistão (F_p, rosa), velocidade (V, verde) e Posição (Y, vermelha) do flutuador



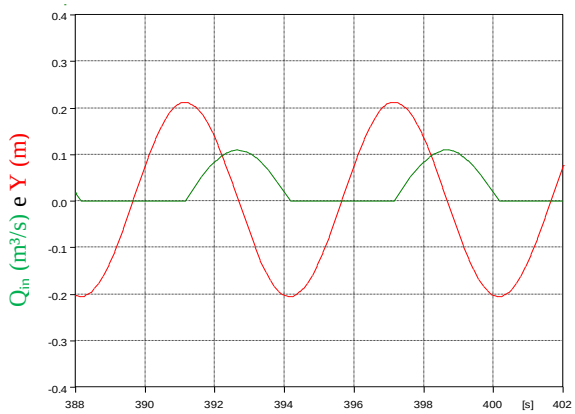
Fonte: Produção do próprio autor.

Gráfico 7.3– Vazão de entrada (Q_{in}, verde) e vazão de saída (Q_{out}, vermelha)



Fonte: Produção do próprio autor.

Gráfico 7.4– Vazão de entrada (Q_{in}, verde) e Posição do flutuador (Y, vermelha)



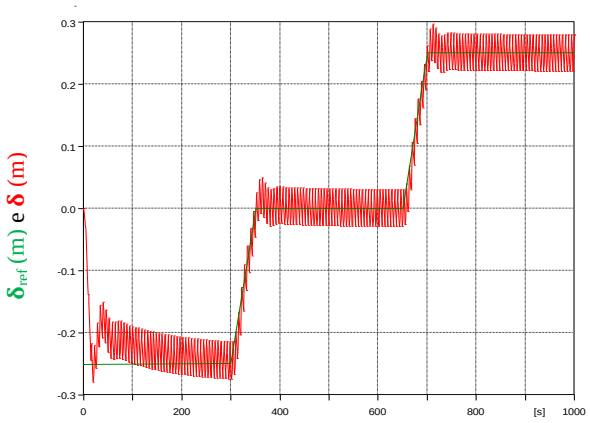
Fonte: Produção do próprio autor.

Em seguida foram feita simulações para diferentes posições de referência (**δ***ref*). A Figura 7.6 mostra os valores para cada intervalo de tempo – de 300 a 350 s a posição de referência passa de -0.25 a 0 m, de 650 a 700 a posição de referência passa de 0 a 0.25 m. A Figura 7.5 apresenta a posição do pistão perante a ordem de referência; de fato a posição média é igual a $\boldsymbol{\delta}_{ref}$, e a variação ($\Delta\boldsymbol{\delta}$) nos três casos é de aproximadamente de 0.07m. A transição observada

tem apenas o objetivo de avaliar o desempenho da malha de controle proposta, o que foi bem correspondido.

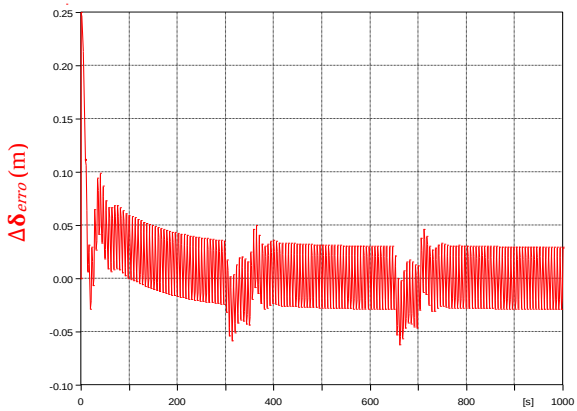
O comportamento do erro da posição do pistão e seu valor filtrado são observados no Gráfico 7.5 e 7.6 respectivamente. Observa-se que o erro oscila em torno do zero, mantendo uma variação ($\Delta\boldsymbol{\delta}_{erro}$)de aproximadamente 0.06 m; o erro filtrado (Gráfico 7.7) apresenta uma variação quase nula ($\Delta\boldsymbol{\delta}_{erro_filtrado}$= 4μ); ambos possuem um valor médio em torno do zero.

Gráfico 7.5– Posição do pistão do acumulador hidropneumático $\boldsymbol{\delta}$ (vermelho) e a posição de referência $\boldsymbol{\delta}_{ref}$ (verde)



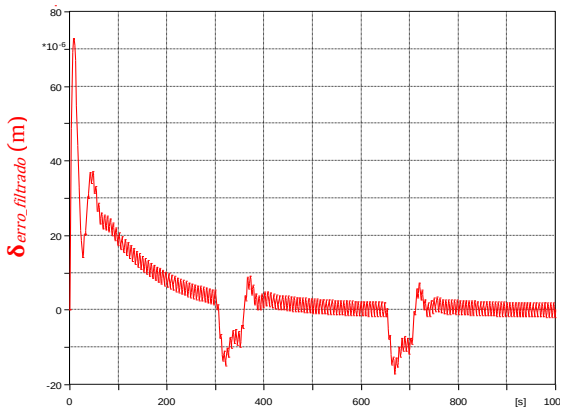
Fonte: Produção do próprio autor.

Gráfico 7.6– Erro da posição do pistão ($\Delta\boldsymbol{\delta}_{erro}$)



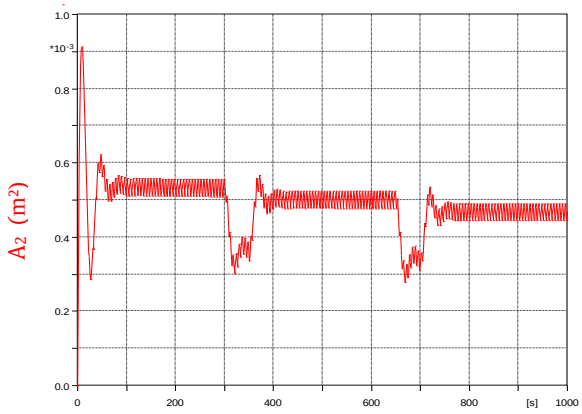
Fonte: Produção do próprio autor.

Gráfico 7.7– Saída do Filtro do sistema hidráulico, $\boldsymbol{\delta}_{erro_filtrado}$



Fonte: Produção do próprio autor.

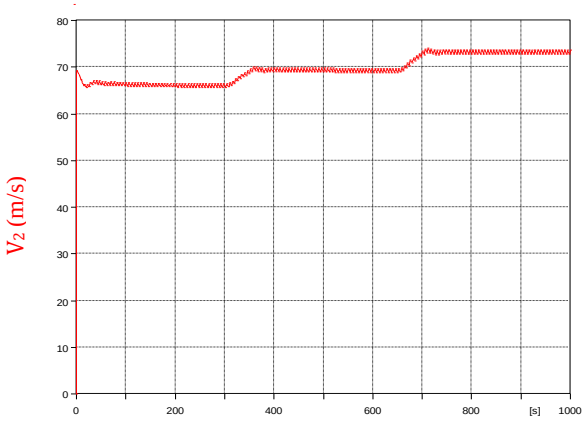
Gráfico 7.8– Área do jato d'água, A_2



Fonte: Produção do próprio autor.

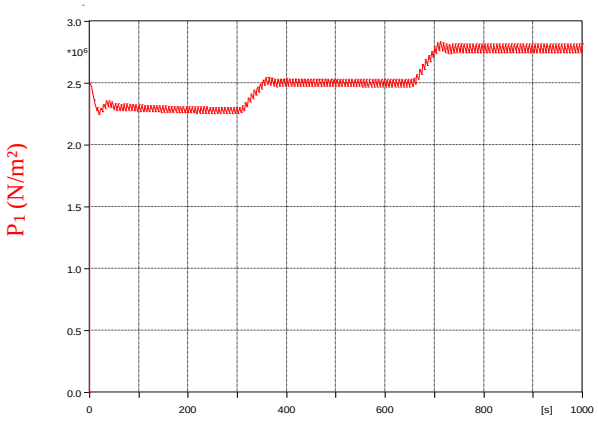
O comportamento da área do jato d'água (A_2) é mostrado no Gráfico 7.8. O valor médio vária de 5.35 cm², 5.00 cm² e 4.70 cm² para os valores crescentes de **δ**, respectivamente, a área diminui para que certo volume d'água se acomode dentro acumulador, uma vez que a posição do pistão aumentou. Dos Gráficos 7.9 e 7.10 observa-se que pressão interna P_1 aumenta com o a variação positiva da posição do pistão. Com uma maior pressão do sistema hidráulico, a velocidade V_2 também deve aumentar.

Gráfico 7.9– Velocidade do jato d'água (V_2)



Fonte: Produção do próprio autor.

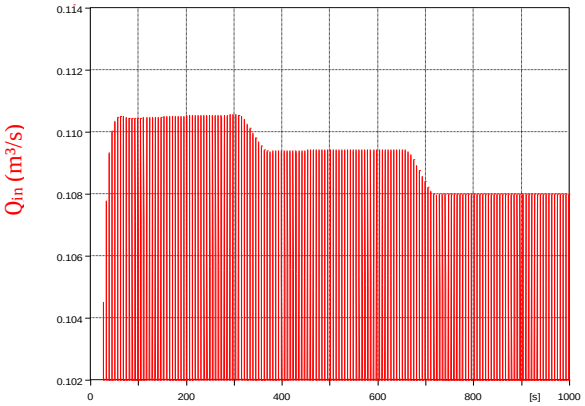
Gráfico 7.10– Pressão hidráulica (P_1)



Fonte: Produção do próprio autor.

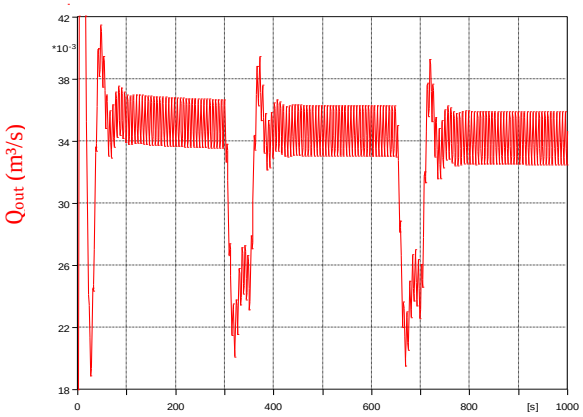
Os Gráficos 7.11 e 7.12 apresentam respectivamente a vazão de entrada Q_{in} e vazão de saída Q_{out} do acumulador hidropneumático. Como é possível observar, Q_{out} sofre pequenos decrementos para a transição de **δ**. Isto deve ao fato de que com o aumento da pressão interna (P_1) a força exercida pelo pistão da bomba F_p também aumenta contribuindo para diminuir a oscilação do flutuador e consequentemente bombeando um menor volume de água para dentro do acumulador. A vazão de saída tende a manter a mesma vazão média de saída como observado nos Gráficos 7.12 e 7.13.

Gráfico 7.11– Vazão de entrada, Q_{in}



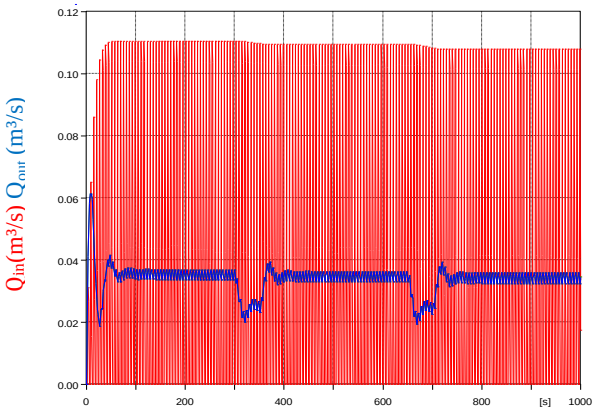
Fonte: Produção do próprio autor.

Gráfico 7.12– Vazão de saída, Q_{out}



Fonte: Produção do próprio autor.

Gráfico 7.13– Vazão de entrada(Q_{in},Vermelha) e Vazão de saída(Q_{out},azul)

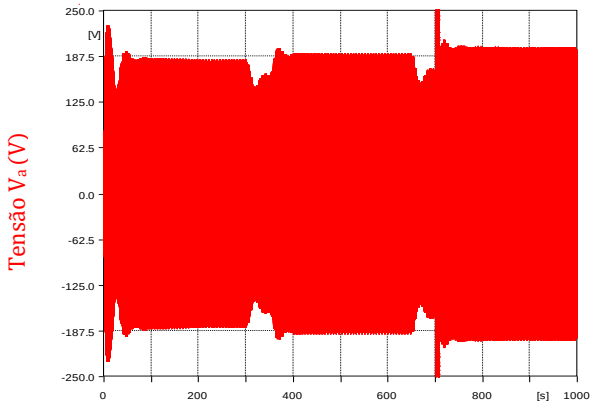


Fonte: Produção do próprio autor.

As variáveis elétricas também são influenciadas pela variação de pressão que é feita pelo controle de posição do pistão. Sabe-se que sistemas mecânicos possuem uma resposta mais lenta quando comparado aos sistemas elétricos. Os Gráficos a seguir apresentam picos nos sinais durante a transição da posição de 0 para 0.25 m que normalmente ocorrem com sinais elétricos quando o sistema mecânico demora a responder. Por isso também a necessidade de um longo período de simulação (1000s).

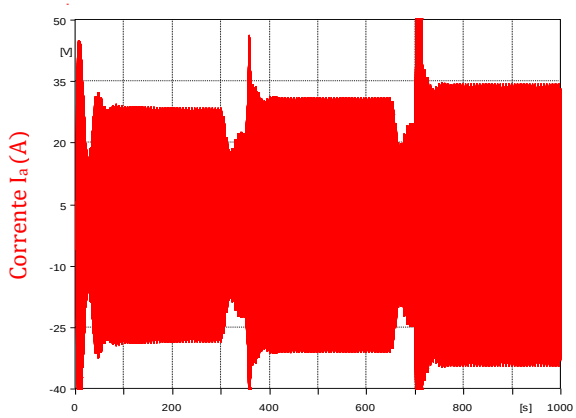
Os Gráficos 7.14 e 7.5 mostram o comportamento da tensão V_a (tensão de fase a) e corrente I_a (corrente de fase a) para a variação de $\boldsymbol{\delta}_{ref}$. Seus valores máximos são incrementados variando de 184, 190 e 200 V e 29, 31 e 34 A aproximadamente.

Gráfico 7.14 – Tensão V_a (fase a)



Fonte: Produção do próprio autor.

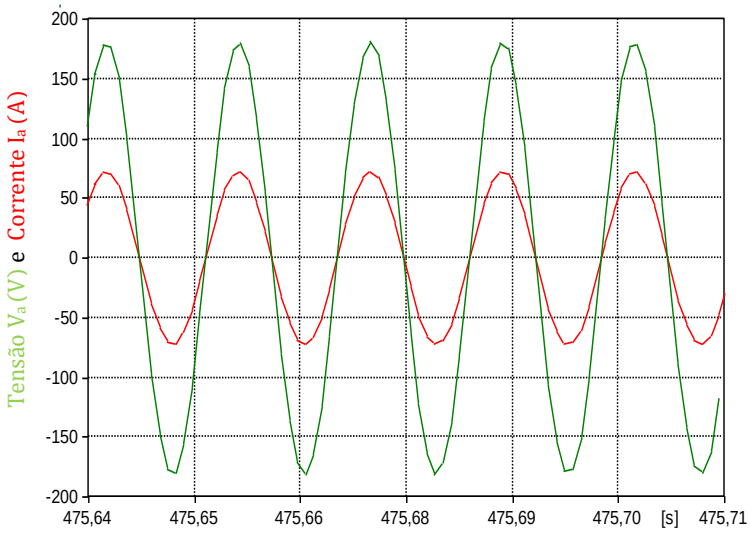
Gráfico 7.15 – Corrente Ia (fase a)



Fonte: Produção do próprio autor.

No Gráfico 7.16 a seguir, é possível observar o perfil senoidal da tensão elétrica corrente em alguns poucos períodos.

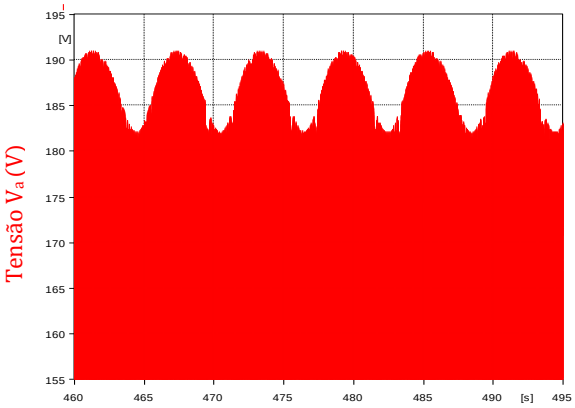
Gráfico 7.16 – Tensão V_a (fase a) e Corrente Ia (fase a)



Fonte: Produção do próprio autor.

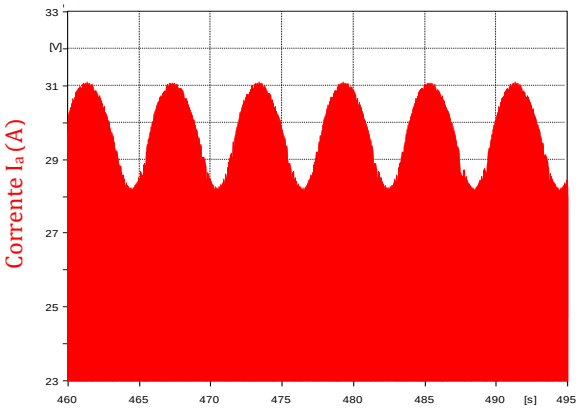
As tensões e correntes geradas possuem flutuação nos seus valores de pico, devido a intermitência da potência da onda, mesmo com a “filtragem” feita pelo sistema hidráulico. Essas flutuações quase não se alteram de um intervalo para outro, sendo que a tensão tem uma flutuação de aproximadamente 10 V e a corrente de 3 A (Vide Gráficos 7.17 e 7.18).

Gráfico 7.17 – Flutuação da Tensão Va para $\boldsymbol{\delta}_{ref}$ = 0m



Fonte: Produção do próprio autor.

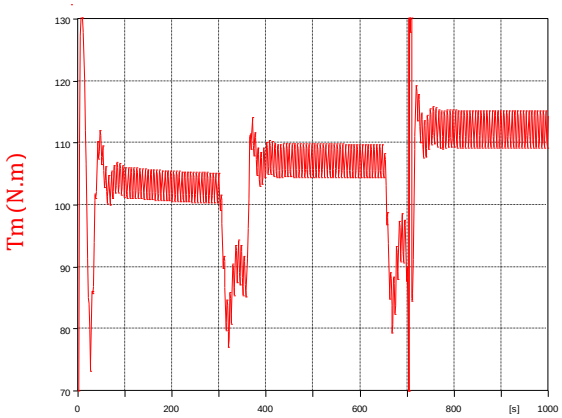
Gráfico 7.18 – Flutuação da I_a Va para $\boldsymbol{\delta}_{ref}$ = +0.25m



Fonte: Produção do próprio autor.

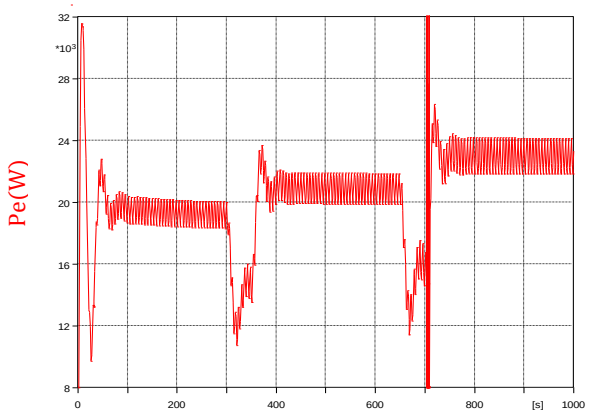
Foi visto do capítulo 5, que o Torque disponível pela turbina é proporcional à vazão de saída Q_{out} e que a velocidade V_2 disponível pela turbina é proporcional. Como a velocidade aumenta substancialmente em relação à vazão, é esperado que o torque também aumente (Gráfico 7.19). Observa-se nos Gráficos 7.20 e 7.21, respectivamente, a potência elétrica consumida pela carga e a frequência elétrica, que também variaram. De fato, com o aumento do torque há um aumento na potência mecânica no eixo do gerador o que faz este girar a uma velocidade mais alta, aumentando também a frequência elétrica e a tensão, por isto o aumento da potência elétrica.

Gráfico 7.19 – Torque Mecânico



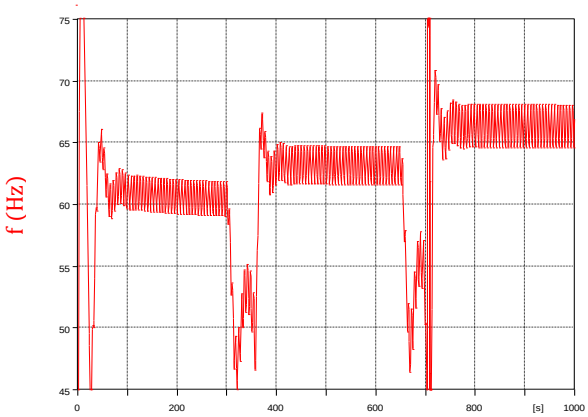
Fonte: Produção do próprio autor.

Gráfico 7.20 – Potência elétrica



Fonte: Produção do próprio autor.

Gráfico 7.21 –Frequência



Fonte: Produção do próprio autor.

Neste capítulo foi visto que o controle da pressão interna do acumulador hidropneumático pode ser feito com o controle de posição do pistão do mesmo. A pressão é uma importante variável do sistema, pois ela interfere de forma direta na operação da conversão primária e secundária da energia das ondas, interferindo na dinâmica do flutuador e no sistema de armazenamento e filtragem de energia do acumulador. Desta forma, não só é possível otimizar a energia absorvida pelo flutuador (que é demonstrado em Rosa (2008)) mas também controlar a energia elétrica gerada , neste caso pela máquina síncrona.

8 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresentou um estudo resumido sobre o potencial energético das ondas do mar no Brasil e no mundo, e a simulação de um protótipo instalado no porto de Pecém-Ce no software ATP/ATPdraw. O capítulo 2 apresentou alguns dados de pesquisas feitas nos últimos dez anos que mostram o potencial energético do mundo em torno de 2 a 3 TW e o potencial brasileiro em torno de 100 GW, sendo que esses valores são teóricos. O aproveitamento desta energia depende da região, pois o clima é um fator muito importante quando se pretende instalar um projeto de uma usina de ondas. O capítulo 3 apresentou os principais tipos de tecnologias utilizadas no mundo. A tecnologia escolhida, apesar de importante ainda não se chegou a uma conclusão de qual a mais adequada para cada tipo de mar.

No capítulo 4 foi descrito o funcionamento do conversor hiperbárico de Pecém, e nos capitulos 5 e 6 a modelagem. A modelagem do sistema é feita em duas etapas. A conversão primária se inicia pelo movimento do flutuador, que transforma a energia contida no mar em energia cinética. Este movimento do flutuador aciona as bombas por meio dos braços mecânicos, que então fazem circular água do reservatório para o acumulador hidropneumático. No acumulador ocorre a parte mais importante da conversão de energia, onde ocorre o processo de armazenamento de energia: filtragem da potência intermitente da onda do mar, por meio das transformações gasosas que ocorre na câmara hiperbárica, e o controle de vazão de saída da água que aciona a turbina hidráulica. A conversão secundária é definida como a conversão eletromecânica da energia a transformação da energia mecânica da turbina em elétrica é feita pelo gerador síncrono de imãs permanentes.

Por ser um dos principais parâmetros de operação, a pressão interna P_1 foi foco das análises de simulação deste trabalho. Utilizando uma malha de controle (desenvolvida já em outro trabalho e apresentada no capítulo 7) que controla a posição do pistão do acumulador hidropneumático, foi possível analisar o efeito da pressão no sistema hidráulico e elétrico. A proposta do controle hidráulico baseou-se em manter a vazão média de saída igual à de entrada, ao mesmo tempo garantindo que a posição do pistão oscilasse em torno de uma posição média, por meio de um filtro e um controlador PI, assegurando-se desta forma que potência de entrada fosse unidirecional. Observou-se que, com o aumento da posição de

referência da posição, a pressão interna aumentou (o que se espera reduzindo o volume ocupado pelo gás). Para haver vazão de saída a área da válvula, controlada por uma agulha interna, deve ser diminuída e com o aumento de pressão a velocidade de saída também é aumentada. Isto influencia o sistema eletromecânico que aumenta a velocidade de rotação aumentando à frequência elétrica e tensão gerada, por sua vez aumentando a potência elétrica entregue a carga.

Conclui-se que as grandezas eletromecânicas podem ser estimadas a partir do valor de referência de posição do pistão. De forma dual, pode-se impor esse valor de referência da posição a partir de um valor de frequência desejada. Controlando a frequência, consequentemente controla-se a tensão terminal gerada.

As principais contribuições deste trabalho se referem no desenvolvimento do sistema de conversão da energia das ondas em um software bem difundido no sistema elétrico e gratuito – ATP/EMTP – criando desta forma uma base para que as principais características possam ser simuladas e analisadas incentivando o desenvolvimento de outros trabalhos.

Como proposta de trabalhos futuros os seguintes pontos podem ser abordados;

- Um estudo de estratégias de controle que permitam controlar a velocidade da GSIP e consequentemente a tensão gerada (suas amplitude e frequências);
- Análise da otimização da potência absorvida por corpos flutuantes no ATP/ATPDraw;
- Um estudo de estratégias de controle que permita a turbina operar na velocidade ótima no ATP/ATPDraw.
- Modelagem da estrutura por uma função de transferência que facilite o projeto de controladores.
- Integração da geração à rede elétrica.

9 BIBLIOGRAFIA

ALBUQUERQUE, G. R. C. **Modelagem e simulação da dinâmica de bóias de superfície ancoradas.** 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, PUC-Rio (Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro), Rio de Janeiro, 2008 *apud*

MÉHAUTÉ, B. **An introduction to hydrodynamics and water waves.** New York: Springer Science, 1976. 315p. Disponível em: < http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/13395/13395_1.PDF>. Acesso em: 09 set. 2014.

ALTERNATIVE ENERGY. Disponível em: http://www.alternative-energy-news.info/seagen-tidal-power-installation/. Acesso em: 04 set. 2014.

AMON, j. F. FILHO; PEREIRA, M. P. ATP alternative transients program: Curso básico sobre a utilização do ATP. COMITÊ LATINO AMERICANO DE USUÁRIOS DO EMTP/ATP.1996. Disponível em: < http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAEfwAD/atp-apostila> Acesso em: 02 dez. 2014.

AQUA-RET, Project. Disponível em:<http://www.aquaret.com/index.php?option=com_content&view=article&id=203&Itemid=344&lang=pt >. Acesso em: 01dez. 2014.

BOZZI, F. A. **Análise da geração de energia elétrica a partir de ondas do mar e máquina de indução.** 2012. Projeto de graduação (Graduação em engenharia elétrica) – Departamento de engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10005009.pdf> Acesso em: 12 set. 2014.

CARVALHO, J.T**. Simulação da distribuição de energia das ondas oceânicas ao largo do litoral brasileiro**. 2010. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, São José dos Campos, 2010. Disponível em: < http://mtc-m19.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-

m19/2010/09.27.19.33/doc/publicacao.pdf?languagebutton=pt-BR>. Acesso em: 08 dez. 2014.

CLEMENTE, D. S**. Energia das ondas: metodologia de ensaios em modelos reduzidos**. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia de Energia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá , 2013. Disponível em: <http://saturno.unifei.edu.br/bim/0040866.pdf >. Acesso em: 23 jun. 2014.

COPPE. **Tecnologia para um desenvolvimento sustentável**. [Publicações]. Disponível em: < http://www.coppe.ufrj.br/pdf_revista/folder_SNCT.pdf >. Acesso em: 01 dez. 2014.

COSTA, P. R. **Energia das ondas do mar para geração de eletricidade.** 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: < www.oceanica.ufrj.br/.../2004_mestrado_paulo_roberto_da_costa.pdf > Acesso em: 01 out. 2014.

ELETROBRAS. Disponível em: < http://www.eletrobras.com/elb/ProinfA/data/Pages/LUMISABB61D26PTBRIE.htm# >. Acesso em: 01dez. 2014

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Outras Fontes. In: Plano nacional de energia 2030.** 2006. Disponível em: < http://www.epe.gov.br/PNE/20080512_9.pdf >. Acesso em: 01 dez. 2014.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2023**. 2014. Disponível< http://www.epe.gov.br/Estudos/Documents/PDE2023.pdf> Acesso em: 01 dez. 2014.

ENERGIAS MARINHAS. Disponível em: <www.wavec.org/energias_marinhas#.U75oUfldXfT> Acesso em: 01dez. 2014.

ESTEFEN, S. F. **Energia das ondas. In: fontes renováveis de energia no brasil**. 1 ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência. 2003.

ESTEFEN, S. F. **Wave energy hyperbaric converter: Small scale models, prototype and control strategies.** 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering – OMAE, Rio de janeiro, 1-9, 1-6/07/2012

FALNES, J. **Ocean waves and oscillanting systems linear interaction including wave-energy**.1 st. USA: Cambridge University Press. 2002.

FITGERALD, A. E.; KINGSLEY, C. Jr.; UMANS, S. D. **Máquinas elétricas.** 6 ed. São Paulo: Bookman . 2006.

JORNAL HOJE. Disponível em: < http://g1.globo.com/jornal-hoje/noticia/2014/11/seca-historica-deixa-concessionarias-de-energia-eletrica-em-alerta.html >. Acesso em: 01 dez. 2014.

LEVI, C.P. **Fundamentos em fenômenos de transporte: Um texto para cursos básicos**. 1 ed. Rio de Janeiro: LTC. 2004.

MACHADO, I.R**. Geração elétrica a partir de ondas do mar: modelo completo e análise do sistema de armazenamento de energia**.2013. Tese (Doutorado em Engenharia elétrica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013 *apud.*

CUMMIS, W. E. (1962). **The impulse response function and shipmotions, In: Schiffstechnik.** Vol. 47, pp. 101–109.

BREGMAN, R.; KNAPP, R.H.; TAKAHASHI, P.K. **Design Considerations for Ocean Energy Resource Systems.** In: *Challenges of Our Changing Environment. Conference Proceedings*, pp 1084 – 1091, Oct 1995.

GREENHOW, M. & WHITE, S. P. (1997). **Optimal heave motion of some axisymmetric wave energy devices in sinusoidal waves**. Applied Ocean Research19(3), 141–159. Disponível em: < http://www.pee.ufrj.br/teses/textocompleto/2013092603.pdf>. Acesso em: 12 ago. 2014.

MONTEIRO, T. M. **Máquina síncrona com tensão não-senoidal para aplicações em fontes alternativas**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia elétrica) – Programa de Pós-

graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: < http://www.pee.ufrj.br/teses/textocompleto/2012100401.pdf>. Acesso em: 04 out. 2014.

PLANETA COPPE, 2006. Disponível em: < http://www.planeta.coppe.ufrj.br/artigo.php?artigo=833 > Acesso em: 02 dez. 2014.

PLANETA COPPE, 2013. Disponível em: < http://www.planeta.coppe.ufrj.br/ artigo.php?artigo=1736 >. Acesso em: 02 dez. 2014.

PIUMBINI; P. P. **Clima de Ondas de Gravidade e Estado de Agitação Marítima em Ambientes Marinhos no Espírito Santo.** 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2009. Disponível em: < http://www.ct.ufes.br/ppgea/files/Disserta%C3%A7%C3%A3o_Prussia_Pestana_AGO2009.pdf>. Acesso em: 01 dez. 2014.

ROSA, P.B.G**. Controle e otimização de um sistema de conversão de energia das ondas do mar em energia elétrica**. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008 *apud.*

PARSONS, W. & BADDOUR, R. E. (2004). **The generation and propagation of deep water multichromatic nonlinear long-crested surface waves. In: Proceedings of the Fourteenth. (2004).** International O_shore and Polar Engineering Conference**.** pp. 249{ 245. Disponível em: < http://www.lee.eng.uerj.br/~jpaulo/PG/2008/MSc-Controle-Energia-das-Ondas-2008.pdf>. Acesso em: 12 ago. 2014.

ROSA, P.B.G. **Modelagem da dinâmica de um conversor hiperbárico de energia das ondas em energia elétrica**. XVIII Congresso Brasileiro de Automática, Bonito-MS, 1107-1113, 12-16/09/2010. Disponível em: < http://www.eletrica.ufpr.br/anais/cba/2010/Artigos/66358_1.pdf >. Acesso em: 01 jul. 2014>. Acesso em: 12 ago. 2014.

ROSA, P.B.G**. Modelagem dinâmica e otimizacao de sistemas de conversão de energia das ondas em energia elétrica**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Oceânica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013 a*pud.*

MASSEL, S. R. (1996), **Ocean Surface Waves: Their physics and prediction, Advanced series on ocean engineering** - Volume 11, World Scientific Publising Co.Pte. Ltd., London, UK. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/.../000891586.pdf?...1 >Acesso em: 12 set. 2014.

SEM, P. C. **Principles of electricmachines and power electronics**. 2nd ed. [S.l.]: Jhon Wiley e Son. 1996.

SILVA, R. G. A Geração de Energia Maremotriz e Suas Oportunidades no Brasil. **Revista Ciências do Ambiente On-Line**, São Paulo, V. 8, n. 2, p. 82-87, out. 2012. Disponível em: < http://sistemas.ib.unicamp.br/be310/index.php/be310/article/viewFile/337/265 >. Acesso em: 01 jul. 2014. Acesso em: 01 dez. 2014.

TN SUSTENTÁVEL. Geração de eletricidade pelas ondas do mar. **Caderno de sustentabilidade**, ano 4, n. 25, p. 84-87, jan. 2013. Disponível em: < www.tnsustentavel.com.br/revista/download/edicao/2 > Acesso em: 15 jan. 2015.

.