MARIO KAWANO

**Geração de energia elétrica por ondas marinhas gerenciadas por
microcontroladores**

São Paulo
(2015)

MARIO KAWANO

**Geração de energia elétrica por ondas marinhas gerenciadas por
microcontroladores**

Tese apresentado à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para a
obtenção do título de Doutor em
Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Roberto Koji Onmori

São Paulo
(2015)

MARIO KAWANO

**Geração de energia elétrica por ondas marinhas gerenciadas por
microcontroladores**

Tese apresentado à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para a
obtenção do título de Doutor em
Engenharia Elétrica.

Área de Concentração:
Microeletrônica

Orientador: Prof. Roberto Koji Onmori

São Paulo
(2015)

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 17 de junho de 2015.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Kawano, Mário

Geração de energia elétrica por ondas marinhas gerenciadas por microcontroladores / M. Kawano. versão corr. – São Paulo, 2015. 142 p

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos

1 Energia das ondas 2. Energia do oceano 3 Energia alternativa. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos) II.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, principalmente, ao Prof. Dr. Roberto Koji Onmori pela orientação, criatividade e ter viajado por diversas vezes até a ilha e ter me ajudado a montar, testar e sugerir novas idéias para o projeto na sua integra.

À minhas colegas Milene Galeti e Michele Rodrigues, que muito me ajudaram a escrever, sugerir e corrigir os artigos.

Aos meus alunos Diego Soleira, Marcos Vicente, Nadia Baumgartner e Roberta Albino. Os alunos me acompanharam por diversas para a e colocaram em funcionamento o sistema de telecomunicação entre a ilha e a sede UNAERP.

A dedicação desses alunos permitiu modernizar o envio e recebimento de dados, inclusive vídeos, da ilha para sede, via comunicação sem fio (*Web*) e vice versa.

RESUMO

O objetivo desse trabalho é a construção de um sistema de geração de energia elétrica, para uso em locais remotos, tendo como fonte primária a energia proveniente de ondas marinhas.

Numa primeira etapa foram realizados estudos e análises dos principais parâmetros significativos para a geração da energia elétrica e os dados de consumo de eletroeletrônicos. Este sistema serviu para coletar e armazenar dados que orientam o desenvolvimento de bombas e turbinas para a geração de energia elétrica. Foram também usados para avaliar o seu rendimento em diversas aplicações que necessitavam de energia elétrica.

O uso da energia elétrica gerada também foi estudado para melhorar o seu rendimento diante dos vários equipamentos que foram utilizados desde notebooks até geladeiras convencionais.

Foram empregados um microcontrolador, da família "arduino", vários sensores colocados em pontos estratégicos no local e os dados armazenados em memória durante o período do desenvolvimento.

Sensores de pressão, vazão, amplitude das ondas, sentido do vento, temperatura e vários medidores (de tensão e corrente em AC e DC) foram usados para obter valores numéricos para análises de rendimentos de conversão em energia elétrica, vazão e outros parâmetros importantes para uma posterior melhoria no projeto inicial. Os dados foram armazenados em memórias do tipo cartão SD de 16 G bytes. Foi confeccionada uma bomba de água movida pelas ondas marinhas. Sua implantação ocorreu na Ilha do Arvoredo, em Guarujá, SP, onde a energia elétrica era gerada através do uso de motores a diesel. A água é bombeada a uma altura de 30 metros e armazenada em um tanque com capacidade de 20.000 litros. A água armazenada vai diretamente para uma turbina geradora de eletricidade por um sistema controlador de pressão e, pode gerar uma potência elétrica de até 200 W.

O excedente de água poderá ser também usado para os viveiros de animais marinhos. A maior parte dos materiais que foram utilizados na fabricação dos equipamentos foi de materiais recicláveis reduzindo o custo do projeto. Esse projeto estará disponível para comunidades carentes que necessitam de energia elétrica em

locais remotos, normalmente ilhas, mas podem ser adaptadas em terra desde que possuam quedas de água.

O projeto de geração de energia usando ondas marinhas é inovador e com fins sociais para pessoas de baixa renda como os pescadores. Normalmente o pescado conseguido nas proximidades de ilhas isoladas são salgados para serem conservados devido à falta de refrigeração.

Palavras-chave: Energia das ondas. Energia do oceano. Energia alternativa.

ABSTRACT

The aim of this work is the constructions of an electrical power generation system for use in remote locations, having primary source of energy from sea waves.

At a first step were carried out studies and analyzes of the main important parameters for the generation of electricity and electronics power consumption data. This system was used to collect and store data that guide the development of pumps and turbines for generating electricity. Various electronics applications were also used to evaluate the total electricity was required and were studied to improve their performance like notebooks or conventional refrigerators.

A microcontroller was employed and several sensors placed at strategic points in the power generation energy system and the data stored in the memory card during the development period.

Pressure sensors, flow, amplitude of waves, wind direction, temperature and various electrical sensors (voltage and current in AC and DC) that were used to obtain numerical values for analysis of conversion into electrical energy, water flow and other important parameters for further improvement the initial project.

The data were stored on SD memory card of 16 G bytes. A water pump driven by ocean sea waves was made. This work has taken place in Ilha do Arvoredo, in Guarujá, SP, where the electricity was generated using diesel engines. The water is pumped until 30 meters high and stored in a tank with 20.000 liters. This stored water goes directly to the turbine by a pressure system control and generate an electrical power output up to 200 W.

When not require, the exceeding water can also be used for marine animals nurseries.

Most materials that were used in manufacturing of the equipment is recyclable materials reducing the cost of the project.

The final project will be available to poor communities that need electricity in remote locations. Usually the fish achieved near isolated islands are salted to be maintained for lack of refrigeration.

Keywords: Wave energy. Ocean energy. Alternative energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Onda Usada para estudo de suas propriedades.....	23
Figura 1.2 - Distribuição global de Energia das ondas em kW/m ²	24
Figura 1.3 - Energia potencial e cinética de uma onda.	25
Figura 1.4 - Conversor Coluna de Água Oscilante.	26
Figura 1.5 - Conversor <i>Wave Dragon</i>	27
Figura 1.6 - Conversor <i>Pelamis Wave Power Ltd</i>	28
Figura 1.7 - Conversor <i>AquaBuoy</i>	29
Figura 1.8 - Turbina de Fourneyron.....	31
Figura 1.9 - Principais tipos de turbinas e suas aplicações.....	32
Figura 1.10 - Turbina Pelton.....	34
Figura 1.11 - Turbina Francis.	35
Figura 1.12 - Turbina Kaplan.....	36
Figura 1.13 - Turbina Bulbo.....	37
Figura 2.1 - Esboço do Sistema de Energia implantado na Ilha do Arvoredo.	41
Figura 2.2 - Fontes de energia na Ilha do Arvoredo.	43
Figura 3.1 - Configuração convencional para trazer a energia até as baterias.	46
Figura 3.2 - Configuração criada da rede isolada para unir as fontes geradoras.....	49
Figura 3.3 - Montagem usada para o teste em laboratório.....	51
Figura 3.4 - Teste de rede isolada em laboratório.....	52
Figura 3.5 - Banco de baterias 24 V 300 Ah.	54
Figura 3.6 - Número de ciclos em função da profundidade de descarga.	55
Figura 3.7 - Curva de SOC x OCV.	56
Figura 3.8 - Detalhe das posições dos sensores de amplitude das ondas.....	58
Figura 3.9 - Sistema de segurança da câmara de ar.	59
Figura 3.10 - Monitoramento da rotação da turbina.	59
Figura 3.11 - (a) Rotor (b) Estator da máquina de lavar.....	61
Figura 3.12 – Gerador já montado na estrutura de teste.....	62
Figura 3.13 – Turbina Pelton Usado no teste.....	63
Figura 3.14 - Esquema hidráulico de teste da turbina e gerador para ondas.....	64
Figura 3.15 - Manômetro antes do bocal.....	65
Figura 3.16 - Modelo por fase do gerador.	68

Figura 3.17 - Detalhes acrescentados ao gerado para permitir a medição da potência mecânica consumida pelo gerador nos ensaios.	69
Figura 3.18 - Comportamento das perdas por fase nas chapas do gerador ensaiado.	71
Figura 3.19 - Foto do artefato mecânico que tornou possível fazer o ensaio em curto.	72
Figura 3.20 - Carga trifásica montada com resistores de NiCromo.....	76
Figura 3.21 - Circuito elétrico por fase do gerador para a comprovação teórica do método. Fonte: autor.....	77
Figura 3.22 - Circuito elétrico equivalente por fase do gerador nas condições da Ilha a 375 RPM. Fonte: autor.	80
Figura 3.23 - Corrente de carga em função da resistência de carga.....	83
Figura 3.24 - Potência útil em função da resistência de carga.	83
Figura 3.25 - Placas fotovoltaicas de 36 volts e 180 watts cada uma.	84
Figura 3.26 – Monitor local e o regulador de carga MPPT.	85
Figura 3.27 - Apontamento da antena1 para UNAERP.....	88
Figura 3.28 - Apontamento da antena2 da UNAERP em direção a ilha.....	88
Figura 3.29 - Variação da amplitude de uma onda marinha em função do tempo.	92
Figura 3.30 - Cilindro de Inox 316 de diâmetro interno de 210 mm.....	93
Figura 3.31 - Embolo a ser usado com duas gaxetas.	93
Figura 3.32 - Esboço do sistema de bombeamento por ondas.	94
Figura 3.33 - Vazão dos cilindros “c” e “d”.....	95
Figura 3.34 - Diferença de vazão de entrada e saída da câmara de ar.	96
Figura 3.35 - Câmara de ar.	96
Figura 3.36 - Diagrama de entrada de sensores e atuadores do microcontrolador...	99
Figura 3.37 - Sensor MPX 5700.	101
Figura 3.38 - Tensão de saída em função da pressão.....	101
Figura 3.39 - Sensor de Umidade e temperatura.	102
Figura 3.40 - Esquema de ligação entre o sensor e o micro controlador.	102
Figura 3.41 - Aplicação típica do sensor de corrente.	103
Figura 3.42 - Curva de saída de tensão analógica em função da corrente de entrada.	104
Figura 3.43 - Fluxograma do programa de aquisição de dados.	104
Figura 3.44 - Placa do sensor SRF05.	106

Figura 3.45 - Diagrama de tempos do sensor ultra-sônico.....	106
Figura 3.46 - Fluxograma do cálculo da amplitude da onda em metros	108
Figura 3.47 - Sensor para o sentido do vento.	110
Figura 3.48 - LDR a ser usado.	111
Figura 3.49 - Resistência do LDR quando um oitavo de sua área for iluminado.....	111
Figura 3.50 - Princípio de funcionamento da matriz de leds.....	112
Figura 3.51 - Trecho da matriz de leds no nível de circuito.....	113
Figura 3.52 - Anemômetro a ser usado.....	114
Figura 3.53 - Indicador do anemômetro.	114
Figura 3.54 - Gaxeta para bomba de pistão de três polegadas.....	116
Figura 3.55 - Cilindro usado na bomba com uma entrada e uma saída d'água.....	116
Figura 3.56 - Cilindro fechado com um cap e reforço de inox.	117
Figura 3.57 - Enchimento do espaço entre os dois canos de PVC e também do êmbolo.	118
Figura 3.58 - Enchimento da parte inferior da bomba com concreto.....	118
Figura 3.59 - Câmara de ar.	119
Figura 3.60 - Forças envolvidas para o bombeamento a 10 metros de altura.	121
Figura 3.61 - Teste prático da bomba para bombear a 10 metros de altura.	122
Figura 3.62 - Flutuadores para a bomba.	123
Figura 3.63 - Bomba movida por ondas na Ilha do Arvoredo preparada para teste.	124
Figura 3.64 - Bomba sendo descida ao mar para teste.....	125
Figura 4.1 - Queda da corrente da bateria do no-break decorrente do aumento da corrente de entrada do <i>Grid Tie</i> . Fonte: autor.	126
Figura 4.2 - Resultado da medida de intensidade luminosa.....	129
Figura 4.3 - Resultado da medida de temperatura.	130
Figura 4.4 - Resultado da medida de umidade.....	131
Figura 4.5 - Amplitude das ondas em função do tempo.	132
Figura 4.6 - Corrente aplicada ao banco de baterias.	133
Figura 4.7 - Flutuação da tensão da bateria devido a aplicação de corrente.	133

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Distância entre as fontes de energia e o UPS.....	45
Tabela 3.2 - Definição do condutor a ser usado.....	47
Tabela 3.3 - Custo estimado para esse método.....	48
Tabela 3.4 - Custo do método com rede isolada.....	50
Tabela 3.5 - Característica dos dispositivos usados na Experiência.....	53
Tabela 3.6 - Estado de Carga da Bateria em Função da Densidade do Eletrólito.	57
Tabela 3.7 - Dados do Ensaio em Vazio.	70
Tabela 3.8 - Resultado do Ensaio em Curto.....	72
Tabela 3.9 - Ensaio prático da turbina de 0,56m a ser usada na ilha.....	75
Tabela 3.10 - Cálculos teóricos comprovando a precisão do método.	78

LISTA DE EQUAÇÕES

(1.1).....	32
(3.1).....	65
(3.2).....	65
(3.3).....	65
(3.4).....	66
(3.5).....	66
(3.6).....	66
(3.7).....	66
(3.8).....	66
(3.9).....	66
(3.10).....	66
(3.11).....	67
(3.12).....	67
(3.13).....	68
(3.14).....	69
(3.15).....	69
(3.16).....	70
(3.17).....	70
(3.18).....	73
(3.19).....	73
(3.20).....	74
(3.21).....	76
(3.22).....	76
(3.23).....	77
(3.24).....	77
(3.25).....	77
(3.26).....	77
(3.27).....	78
(3.28).....	79
(3.29).....	79
(3.30).....	79

(3.31).....	79
(3.32).....	79
(3.33).....	80
(3.34).....	80
(3.35).....	80
(3.36).....	81
(3.37).....	81
(3.38).....	81
(3.39).....	81
(3.40).....	81
(3.41).....	81
(3.42).....	82
(3.43).....	82
(3.44).....	82
(3.45).....	82
(3.46).....	82
(3.47).....	89
(3.48).....	89
(3.49).....	89
(3.50).....	89
(3.51).....	89
(3.52).....	90
(3.53).....	90
(3.54).....	91
(3.55).....	91
(3.56).....	91
(3.57).....	94
(3.58).....	94
(3.59).....	95
(3.60).....	95
(3.61).....	97
(3.62).....	97
(3.63).....	97
(3.64).....	97

(3.65)..... 112

(3.66)..... 120

(3.67)..... 120

(3.68)..... 121

(3.69)..... 121

(3.70)..... 122

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	ampère
Ah	ampère-hora
CA	corrente alternada
CC	corrente contínua
C	conjugado
EDC	estado de carga
FC	fator de capacidade
FV	fotovoltaico
Grid tie	Inversor para conexão com a rede
h	hora
i	corrente
kW	quilowatt
kWh	quilowatt-hora
LD	Indutância de dispersão
LDR	Resistor dependente de luz
m/s	metro por segundo
m²	metro quadrado
MA	massa de ar
MPPT	rastreador do ponto de potência máximo
MWh	megawatt-hora
N	rotação
RPM	rotações por minuto
Ω	ohm
OCV	tensão em circuito aberto
OWC	coluna de Água Oscilante
PC	potência crítica
PCU	perdas na resistência dos condutores
PD	profundidade de descarga
PEL	potência elétrica
Pferro	perdas no ferro
RP	resistência equivalente das perdas no ferro

R\$	real
s	segundo
SOC	estado de carga de baterias
UNAERP	Universidade de Ribeirão Preto
V	volt
VA	volt-ampère
VF	tensão de fase
VL	tensão de linha
W	watt
WECS	conversores de energia das ondas
W/m²	watt por metro quadrado
Wh	watt-hora
Wp	watt-pico
UPS	Área destinada os Funcionários

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	4
RESUMO	5
ABSTRACT	7
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELAS	11
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	15
SUMÁRIO	17
1 - CAPÍTULO I	20
1.1 - Introdução	20
1.2 - Histórico da Energia das Ondas	22
1.3 - Noções Sobre Ondas	22
1.4 - Métodos para recolher a energia das ondas	26
1.5 - Turbina hidráulica	30
1.5.1 Tipos de Turbinas	32
1.5.2 Turbinas Pelton	34
1.5.3 Turbina Francis	35
1.5.4 Turbina Kaplan	36
1.5.5 Turbina Bulbo	37
2 - CAPÍTULO II:	38
2.1 - Objetivo	38
2.2 - A novidade foi construir uma usina usando material reciclado de custo muito baixo	42
2.3 - Plano de Sistema de Energia para a Ilha do Arvoredo	43
2.4 - Geração fotovoltaica	43
2.5 - Gerenciamento da energia gerada	44
2.6 - Monitoramento das condições atmosféricas	44
2.7 - Sistema de Telecomunicação	44
3 - CAPÍTULO III	45
3.1 - Metodologia	45
3.1.1 Usando o método convencional	46
3.1.2 Custo estimado desse método	47

3.1.3	Método criando uma rede isolada	49
3.1.4	Custo da rede isolada.....	50
3.1.5	Criação de uma rede isolada em laboratório	50
3.2 -	Banco de Baterias	54
3.2.1	Estado de carga do Banco de Baterias	56
3.3 -	O cérebro do sistema é um micro controlador.....	58
3.4 -	Gerador Usado na Turbina	61
3.5 -	Turbina usada no Teste.....	63
3.6 -	Uso da Energia da Água para o Teste.....	64
3.6.1	Ensaio em Vazio do Gerador.....	67
3.7 -	Ensaio em Curto do Gerador	71
3.8 -	Ensaio em Carga do Gerador	74
3.8.1	Correção da Resistência Rwire com a Temperatura	74
3.9 -	Resultado do Ensaio em Carga do Gerador.....	75
3.9.1.	Embasamento teórico desses resultados	76
3.9.2.	Previsão Teórica da Energia Gerada nas Condições da Ilha do Arvoredo...79	
3.9.3.	Aumento da Potência Útil	82
3.10 -	Instalação fotovoltaica	84
3.10.1	Regulador de carga MPPT	85
3.11 -	Uso da Energia Gerada	86
3.11.1	Inversores de 3 kW	87
3.12 -	Instalação de um Sistema de Telecomunicação entre a Ilha e a UNAERP do Guarujá.....	87
3.13 -	Necessidade de Energia para Ilha do Arvoredo	88
3.14 -	Outras utilidades para a sobra de energia gerada na ilha	90
3.15 -	Metodologia usada na construção da Bomba para energia das ondas	92
3.16 -	Uso do Microcontrolador.....	98
3.16.1	Características de Um micro controlador para Ilha do Arvoredo	98
3.17 -	Sensores Usados no Microcontrolador	99
3.17.1	Sensor numero 1: DS1302 <i>Real Time Clock</i>	100
3.17.2	Sensor numero 2: Sensor de pressão MPX5700AP	100
3.17.3	Sensor numero 3 Sensor de Umidade.....	102
3.17.4	Sensor numero 4 Sensor de corrente ACS712ELCTR-30A.	103
3.18 -	Sistema de Proteção	105

3.19 -	Medição de amplitude com potenciômetro	109
3.20 -	Sensor da direção e sentido do vento	110
3.21 -	Medição da Velocidade do Vento	113
3.22 -	Protótipo já testado para energia das ondas	115
3.22.1	Construção do cilindro teste	115
3.22.2	Construção da Câmara de Ar	119
3.22.3	Teste de pressão da câmara de Ar.....	119
3.22.4	Cálculo da força necessária para conseguir eleva água do mar a 10m de altura	120
3.22.5	Método de teste prático de se conseguir a força de equilíbrio para o bombeamento.....	122
3.22.6	Teste do protótipo na Ilha do Arvoredo.....	125
4 -	RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO	126
4.1 -	Resultado do teste com rede isolada.....	126
4.2 -	Resultados do ensaio em vazio do gerador.....	127
4.3 -	Resultados do ensaio em curto do gerador	127
4.4 -	Resultados do ensaio em carga do gerador	128
4.5 -	Resultados Ambientais	128
4.6 -	Resultado da Medição com o Arduino	128
4.6.1	Medida da Intensidade luminosa	129
4.6.2	Medida de Temperatura	130
4.6.3	Medida de Umidade.....	131
4.7 -	Resultado da geração com Energia das Ondas	132
5 -	CONCLUSÕES.....	135
6 -	PLANOS FUTUROS.....	136
7 -	APRESENTAÇÃO EM CONGRESSOS	137
8 -	REFERÊNCIAS	138

1 - CAPÍTULO I

Nesse capítulo contém uma breve introdução e revisão do potencial energético das ondas marinhas, métodos para recolher e converter esse potencial energético em eletricidade usando as turbinas.

1.1 - Introdução

A partir do uso da energia elétrica pelo homem, a vida tem ficado muito mais confortável. Aproximadamente oito milhões de brasileiros ainda não possuem e nem usufruem do conforto desta fonte de energia. Sem essa energia, é necessário o uso de tecnologias rudimentares normalmente poluentes e descartáveis.

Muitas famílias moram em pequenas propriedades rurais afastadas das redes elétricas e não têm condições financeiras para arcar com os custos da instalação. Por outro lado uma parte dessa população vive à beira de serras de onde conseguem água potável e têm as pequenas quedas d'água, que podem vir a gerar energia elétrica, ou estão em ilhas ou costas marinhas.

Os muitos aparelhos eletroeletrônicos, de uso doméstico necessitam dessa energia, como: geladeira, telefonia celular, televisão entre outros. A partir dela, caminhos são iluminados tornando o dia mais longo e mais produtivo, alimentos são conservados por um período mais longo e as informações chegam mais rápido. Um exemplo típico é a campanha de vacinação onde esse habitante, por não ter meios de comunicação rápida com as cidades [1], acabava perdendo a oportunidade.

É possível citar varias localidades banhadas pelo mar sem previsão de um dia ter energia elétrica, como por exemplo:

*Ilha do Arvoredo no Guarujá

*Ilha Montão de Trigo de São Sebastião

*Ilha do Cardoso

*Ilha Bela (Castelhanos)

Todas essas localidades ficam no estado de São Paulo. A Ilha do Arvoredo é a menor das ilhas e por isso necessita uma menor quantidade de energia. Essa ilha é administrada pela UNAERP (Universidade de Ribeirão Preto). No local trabalham aproximadamente vinte pessoas principalmente no serviço de recuperação de animais marinhos; A Ilha Montão de Trigo está bastante isolada do continente e possui em torno de cinquenta pessoas, sendo a maioria dedicação exclusiva à pesca. Um dos grandes problemas dos pescadores é conservar o pescado sem a energia elétrica. Na Ilha do Cardoso vivem ao redor de quatrocentas pessoas e até hoje não tem energia elétrica contínua, sem falhas, apesar do Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas [2], ter instalado na ilha um sistema de geração híbrida envolvendo energia fotovoltaica, eólica e um grupo gerador diesel movido a óleo vegetal, menos poluente. As pessoas que usufruem desse benefício têm um cartão pré-pago de tal forma que cada 30 kWh de crédito custa R\$ 12,00. Se não forem colocados créditos a energia é automaticamente cortada. Apesar dessa taxa ser relativamente alta, se uma família estiver consumindo uma potência de 15 kWh durante duas horas, vai gastar equivalente a 12 litros de óleo diesel que nesta época estava ao redor de R\$ 0,85 [2], gastando, portanto R\$ 10,20 de Diesel mais R\$ 1,80 de manutenção e depreciação do gerador.

Na Ilha Bela, inúmeras famílias que moram na região da ilha em frente ao canal de São Sebastião têm energia elétrica, mas no lado oposto, na costa voltada para o mar aberto, só existem geradores diesel para os mais favorecidos enquanto a população nativa vive sem esse conforto. A energia das ondas seria uma grande solução para essas pessoas.

1.2 - Histórico da Energia das Ondas

A idéia de converter a energia das ondas de superfície do oceano em formas de energia útil não é nova. Existem técnicas que foram pela primeira vez patenteada a partir de 1799 (Girard & Filho, França), e, além disso, existem várias referências na literatura técnica para as idéias que documentaram essas técnicas. Leishman & Scobie descreveram cuidadosamente em 1973, o desenvolvimento do primeiro conversor de uma patente britânica de 1855, quando já havia 340 patentes. Várias configurações de conversores de energia das ondas foram projetadas e testadas em escala modelo neste período e alguns foram operados no mar.

Após o dramático aumento dos preços do petróleo em 1973, na Europa iniciou uma intensa pesquisa e estudo no desenvolvimento da conversão de energia das ondas para a energia elétrica. Vários países da Europa acharam viável explorar a energia das ondas e assim passaram a pesquisar as ondas como uma possível fonte de fornecimento de energia. Medidas de apoio foram introduzidas. Vários programas de pesquisa com o governo e privado foram gerados e desde então começou o apoio, principalmente no Reino Unido, Portugal, Irlanda, Noruega, Suécia e Dinamarca, com o objetivo de desenvolver, no médio e longo prazo a exploração industrial da energia das ondas.

1.3 - Noções Sobre Ondas

Quando o vento sopra sobre a superfície do oceano, este produz ondas. A primeira classe de ondas é aquela produzida pelo vento na superfície do oceano. O vento pode gerar ondas localmente que viajam em direções diferentes e em velocidades diferentes. Vento também pode gerar ondas que viajam de um local remoto no oceano aberto e que viajam em uma única direção e são mais regulares do que as ondas locais. As ondulações são menores e mais regulares, produzidas pelo vento como as anteriores [3]. Para estudar ondas de vento, é mais fácil usar ondas ideais como as de forma senoidal. A partir dessa definição, as propriedades das ondas

ideais podem ser analisadas, como mostra a Figura 1.1. A crista de onda é o ponto de máxima elevação e a cava de onda é o ponto de elevação mínima.

Figura 1.1 - Onda Usada para estudo de suas propriedades.

Fonte: [4]

A amplitude da onda é igual à metade da altura da onda H , distância entre a crista e a depressão.

O comprimento de onda λ (letra grega lambda) é a distância entre duas cristas (ou duas calhas ou dois pontos de inflexão, com a mesma curvatura acima e abaixo dos pontos). O período T é o tempo de um comprimento de onda L , ou entre duas depressões consecutivas (ou duas cristas). A velocidade de C (C representa celeridade) da onda é o quociente entre o comprimento de onda e o período. As ondas viajam milhares de quilômetros com uma perda desprezível de energia. O mais importante é que as ondas são mais previsíveis fonte de energia, o que não acontece com a energia eólica e a solar [4].

Colocando-se um corpo flutuante sobre a superfície do mar, será notado um movimento para frente na crista e para trás no vale da onda. O efeito se pronuncia quanto mais a onda se aproxima da praia. Se for amarrado um objeto flutuante e pendendo o mesmo por uma corda será notado o mesmo efeito anterior, mas com menor intensidade.

As ondas têm uma concentração de energia, por metro quadrado, de pelo menos de

quinze a vinte vezes quando comparada à dos ventos e à solar. Uma onda pode transmitir uma potência de 10 a 50 kW [4].

Figura 1.2 - Distribuição global de Energia das ondas em kW/m².

Fonte: [5].

A fim de avaliar um local marítimo para a instalação de conversores de energia das ondas, para finalidade de geração de energia elétrica, devem ser observadas a profundidade, a altura, e a distribuição das ondas. Através desses parâmetros é possível calcular os níveis de energia das ondas por área. Em geral, as ondas no lado oeste dos continentes (Figura 1.2) contêm mais energia por causa dos ventos de oeste para leste. A energia transportada por ondas diminui à medida que alcançam a costa devido às perdas por atrito com o litoral. Deve-se também notar que a onda média tem seis vezes mais energia no inverno que no verão.

Formas de explorar essa energia de alta densidade estão sendo investigadas em todo o mundo [6]. O poder energético de uma onda é proporcional ao quadrado da amplitude e proporcional ao período T (Figura 1.3). Ondas de longo período de tempo (de 7 a 10 s), com amplitude próxima de 2 metros contem cerca de 40-50 kW por metro de largura.

Figura 1.3 - Energia potencial e cinética de uma onda.

Fonte: [6]

Ondas de alta energia estão localizadas ao longo do Oeste da costa Européia. Níveis mais elevados de energia das ondas podem ser encontrados apenas na parte sul da América do Sul e nos Antípodas.

O potencial disponível na região do nordeste do Atlântico, incluindo o Mediterrâneo e o Mar do Norte atinge valores desde 30 a 290 GW, respectivamente.

O potencial de contribuição mundial de energia das ondas do oceano é estimada em cerca de 10% (2 000 TWh / ano) do consumo global de energia.

Entre as principais dificuldades em gerações de energia das ondas estão:

- Dificuldade para obter o máximo de eficiência dos conversores por causa das irregularidades na amplitude de onda, direção e fase.
- O problema do acoplamento mecânico entre o dispositivo de captação de energia das ondas e o gerador elétrico, devido ao movimento irregular e lento das ondas.
- Energia muito alta no caso de condições climáticas extremas como furacões, pois a energia pode ser mais de 100 vezes maior que a média em condições normais.

No entanto, entre as vantagens mais importantes são:

- Compatibilidade ambiental,
- Conversão de energia livre de poluição
- Baixo impacto visual e acústico.

1.4 - Métodos para recolher a energia das ondas

O aproveitamento da energia das ondas vem sendo discutido há mais de 200 anos, mas com a crise do petróleo de 1970, houve uma atenção maior a essa fonte de energia.

Figura 1.4 - Conversor Coluna de Água Oscilante.

Fonte: [7].

Muitos engenheiros desenvolveram e implementaram diversos conversores para energia das ondas (WECs) em eletricidade, que são mostrados a seguir.

O primeiro é conhecido como coluna de água oscilante (OWC) [8]. A Figura 1.4 mostra um conversor utilizando esse princípio.

Coluna de água oscilante são sistemas constituídos por uma estrutura semi-submersa formando uma câmara de ar com uma abertura subaquática permitindo a água do mar fluir para dentro da câmara.

O volume de ar no interior da câmara é comprimido pela elevação do nível da água. Esse ar é direcionado para uma turbina Wells. À medida que o nível de água na câmara diminui, o ar retorna de volta da turbina. A turbina gira e gera energia para o fluxo de ar nos dois sentidos. A turbina Wells usada neste tipo de aplicação não requer válvula para direcionar o ar em um único sentido. As próprias pás da turbina se movimentam em um único sentido qualquer que seja o sentido de deslocamento do ar. O rendimento desse sistema está ao redor de 47% [9].

Outro conversor é o *Wave Dragon*, onde as ondas galgam uma parede inclinada caindo em um reservatório. Para a água voltar para o mar esta passa por um tubo, onde está uma turbina do tipo Kaplan acoplada a um gerador. O primeiro protótipo foi instalado em Nissum Bredning, na Dinamarca em 2003. A Figura 1.5 mostra esse conversor.

Figura 1.5 - Conversor *Wave Dragon*.

Fonte: [7]

Outro conversor de energia é conhecido como *Pelamis* conforme ilustra a Figura 1.6. A *Pelamis* é um atenuador. Os Atenuadores são dispositivos que têm orientação paralela à do movimento da onda e são constituídos por bóias interligadas entre si. O movimento de flexão entre as bóias movimentam bombas e acionam o gerador de energia. É conhecida pelo nome de *Pelamis* cujo significado é uma palavra antiga que significava serpente do mar.

Figura 1.6 - Conversor *Pelamis Wave Power Ltd.*

Fonte: [7]

Esse sistema é parecido com uma cobra gigante. Possui quatro estágios e três módulos de potência com capacidade de 250KW cada e, sendo assim, cada *Pelamis*

pode gerar 750 kW. Entre os módulos existem cilindros que bombeiam óleo aproveitando a oscilações entre eles provocadas pelas ondas.

Outro conversor de energia é conhecido como *Aquabuoy* conforme ilustra a Figura 1.7. A *Aquabuoy* é um absorvedor pontual. Esses conversores não ficam orientados pela direção das ondas, podem absorver energia que vem de qualquer direção. Esse conversor é um cilindro que se movimenta de acordo com o nível das ondas, pois há uma bóia presa ao cilindro. No interior do cilindro há um pistão de densidade neutra em relação à água do mar. Quando a onda sobe o cilindro sobe em relação ao pistão. A mangueira da parte superior do pistão é esticada comprimindo a água que sobe para o interior da bóia, enquanto a mangueira da parte inferior se relaxa aumentando o diâmetro e conseqüentemente se enchendo de água. Quando o cilindro desce acompanhando a onda a parte inferior da mangueira é esticada comprimindo a água que é canalizada pela parede do cilindro e acaba subindo para a bóia, enquanto a mangueira da parte superior se enche de água. No interior da bóia há uma turbina do tipo Pelton. A Figura 1.7 mostra esse conversor.

Figura 1.7 - Conversor *AquaBuoy*.

Fonte: [7]

Diversos WECs operando em conjunto, como estruturas *Pelamis* ou *Aquabuoy* combinadas, formam uma fazenda de ondas.

1.5 - Turbina hidráulica

A turbina hidráulica serve para transformar energia hidráulica, de movimento contínuo em energia mecânica e, na maioria das vezes é transformada em energia elétrica.

As turbinas são usadas para alturas manométricas de 2 a 2.000 m, apesar das aplicações com energia das ondas, as alturas manométricas raramente ultrapassam 100 m e são conseguidas por compressão de fluidos utilizando energia das ondas.

O importante de uma turbina, além da altura manométrica, é a vazão conseguida com o diâmetro do rotor. Existem turbinas suportando uma vazão superior a 700 metros cúbicos por segundo.

As turbinas geralmente pertencem a duas classes gerais:

- a) Turbinas de ação para grandes quedas
- b) Turbinas de reação para baixas e médias quedas

A primeira turbina hidráulica considerada para aplicações industriais deve-se a Fourneyron [10], construída em 1827. Essa máquina possuía aletas fixas chamadas de distribuidor que direcionava a água para as pás móveis presas a um eixo vertical como mostra a Figura 1.8. É interessante notar que a água chega ao rotor com escoamento forçado e sai do rotor em jato livre.

Figura 1.8 - Turbina de Fourneyron.

Fonte: [10].

Em 1849, James Francis, construiu uma turbina na qual o receptor ficava do lado interno do distribuidor e assim a água sempre avançava em direção ao eixo da turbina e assim nascia a turbina centrípeta. Esse tipo de turbina permitia o uso do tubo de sucção e é colocado abaixo do receptor e não deixa a água cair livremente no poço abaixo da turbina. Esse efeito aumenta ainda mais a potência da turbina.

1.5.1 Tipos de Turbinas

Os principais tipos de turbinas hidráulicas são mostrados na Figura 1.9.

Figura 1.9 - Principais tipos de turbinas e suas aplicações.

Fonte: [11].

As turbinas para grandes quedas são as tipo Pelton enquanto para pequenas quedas usam-se as Kaplan e Bulbo. Para as quedas entre 50 a 300 metros, usa se as Kaplan e Francis. As turbinas Pelton são usadas em locais onde existem quedas bastante expressivas, como por exemplo, em Cubatão em São Paulo, cuja queda está ao redor de 700 m [12]. Com essa queda basta ter uma pequena vazão e se tem uma potência elevada, pois a potência disponível no eixo é fornecida pela equação (1.1)

$$P = g * Q * H * \eta [W] \quad (1.1)$$

onde g é a gravidade m/s², Q é a vazão em l/s e H em m. Uma das turbinas de Cubatão gera 34,7 MW e tem uma vazão de 12 m³/s. A água chega a turbina através de bicos injetores tendo desde 1 até 6 bicos por turbina. Esses bicos são regulados

para controlar a vazão e assim alterar o nível da água da represa, com aumento ou redução da potência gerada. As pás da turbina podem se usinadas ou fundidas e a seguir montada na roda. Também é possível fundir a roda Pelton completa mas corre o risco de acidentalmente ter uma pá quebrada e resultar em trocar a roda inteira, apesar da areia existente na água também provocar a erosão das pás obrigando a troca de todas as conchas.

Muitas propriedades aproveitam esse tipo de turbina para instalações em quedas de 15 a 100 m. Neste sistema, um cano capta a água em um ponto mais elevado de um córrego ou mesmo de um rio e é conduzida em paralelo ao curso d'água para uma região mais baixa não inundável onde se constrói a usina. O rendimento dessas usinas dificilmente ultrapassa a 50% mas é melhor ter essa energia do que não ter nenhuma.

Algumas propriedades mesmo dispondo de energia elétrica têm nos procurado para montar sua pico-usina, pois não confiam no fornecimento de energia, que chega a faltar por até quatro dias. Além de ficarem sem usarem eletrodomésticos e iluminação, ficam sem refrigeração. Esses sistemas passam a ser interessantes com a possibilidade da interligação entre a micro geração e a rede elétrica para a venda de energia excedente, mesmo que durante alguns intervalos.

1.5.2 Turbinas Pelton

As Turbinas Pelton são turbinas de ação onde a água é injetada nas conchas em alta velocidade transferindo essa energia cinética para a roda Pelton. A velocidade tangencial da roda tem que ser de aproximadamente metade da velocidade do jato. Nestas condições se tem o rendimento máximo caso a velocidade da roda aumente significativamente e, se a velocidade do jato diminui abaixo de um valor ideal, a potência diminui até ficar nula [1]. Fazendo as conchas de forma artesanal como com barro moldado e a seguir queimando a fim de ser transformado em cerâmica conforme a Figura 1.10, é possível construir pequenas usinas de energia elétrica suficiente para sustentar uma residência. Entretanto não é possível usar o chuveiro elétrico ou o ferro de passar roupa porque eles consomem muita energia.

Figura 1.10 - Turbina Pelton.

Fonte: [1].

Em uma chácara em Caucaia do Alto, em São Paulo, uma turbina Pelton de cerâmica consegue gerar 70 watts (50,4 kWh/mês) alimentando uma geladeira de 24,5 kWh/mês, quatro lâmpadas do tipo PL de 20 W, um liquidificador de uso aleatório, uma antena parabólica e receptor e uma televisão de 14". A manutenção é feita a cada dois anos.

1.5.3 Turbina Francis

É indicada para quedas de 40 a 400 m, mas exige uma obra civil sofisticada, pois além da caixa espiral também são exigidas as aletas ajustáveis. Ao passar pela turbina, a água perde praticamente toda energia. Este tipo está á sendo usada em várias usinas aqui no Brasil, como: Ilha Solteira, Paulo Afonso, São Simão, Usina de Furnas, São Simão, Itaipu e muitas outras.

Figura 1.11 - Turbina Francis.

Fonte: [10].

Varias alterações na turbina original foram feitas com a finalidade de adequar às diferentes quedas d'água e assim surgiram as turbinas Francis lentas, normais, rápidas e extra-rápidas. A Figura 1.11 mostra uma dessas turbinas.

1.5.4 Turbina Kaplan

O rotor da turbina Kaplan se assemelha a uma helice de barco, porém de tamanho apropriado à característica da usina onde é usada. As quedas para esse tipo de turbina vão desde alguns metros até uns 60 metros. Essas turbinas tem um sistema mecânico para alteração do passo das pás. Esse sistema com embolo e manivelas está montado dentro do cubo do rotor

Figura 1.12 - Turbina Kaplan.

Fonte: [13].

O número de pás também varia de acordo com a queda, tanto maior quanto maior for a queda. A Figura 1.12 mostra uma turbina Kaplan com as pás (2) diretrizes fixas (9) e móveis (3). Também pode ser observado o tubo de sucção.

A maior turbina Kaplan do Brasil vai ser usada na hidrelétrica de Estreito (1087 MW), que está sendo construída entre os Estados do Tocantins e Maranhão. A usina hidrelétrica de Três Marias já utiliza esse tipo de turbina.

1.5.5 Turbina Bulbo

A turbina Kaplan possui eixo vertical e isso dificulta o aproveitamento de quedas ainda menores. Surgiram vários projetos a fim de resolver esse problema [10], entre eles as turbinas bulbo e Straflo. Essas turbinas têm eixo horizontal com pás orientáveis. Seu rotor é colocado à frente de um bulbo hidrodinâmico. Dentro do bulbo está o gerador acoplado ao rotor. Nesta turbina, a parte econômica é o item mais importante, uma vez que não se necessita de caracol ou tubo de sucção, representando uma grande diminuição no custo com obras civis. A Figura 1.13 mostra a turbina bulbo de acionamento direto.

Figura 1.13 - Turbina Bulbo.

Fonte: [10]

2 - CAPÍTULO II:

No capítulo II serão abordados os principais objetivos do trabalho explicando o uso de materiais de baixo custo, normalmente materiais reciclados, na obtenção da energia elétrica e o monitoramento das condições adversas envolvidas no seu uso.

2.1 - Objetivo

O principal objetivo deste trabalho foi criar, implantar e otimizar um sistema gerador de energia elétrica, onde a fonte de energia mecânica é proveniente do movimento das ondas do mar. Deve ser de baixo custo e de fácil manutenção podendo ser utilizado pelos moradores em ilhas e costas de difícil acesso.

A energia gerada vai ser acoplada em conjunto com outras fontes de energia elétrica como a fotovoltaica e a eólica. A parte de geração eólica ficou como trabalhos futuros devido ao curto tempo disponível deste trabalho. A energia fotovoltaica é fornecida por três placas com capacidade de fornecer até 180 watts cada uma. A energia elétrica é acumulada em banco de baterias de 24 volts. Um sistema de gerenciamento com microcontrolador, da família arduino, controla a tensão máxima das baterias, já que a tensão mínima já é detectada pelo inversor. Quando houver sobra essa energia será usada futuramente em dessalinizador para se conseguir água potável a partir da água do mar.

Em ilhas pequenas há pouca vazão de água descendo das partes mais altas e não é possível gerar energia elétrica usando métodos tradicionais empregando a queda d'água, pois o volume disponível atende apenas o abastecimento de seus moradores. Essas ilhas têm excelente cobertura vegetal e seus moradores são obrigados a manter essa vegetação intacta a fim de não diminuir a pouca água que possuem. Por outro lado à medida que se entra no interior das mesmas, a altitude aumenta chegando à centena de metros. Não se pode usar placa fotovoltaica devido à cobertura vegetal. Elas devem ser instaladas nas copas das árvores para evitar o sombreamento. Essas ilhas têm peixe em abundância, mas os pescadores são

obrigados a secá-los sobre as rochas, pois a despesa com o óleo para geradores diesel, utilizados na operação de resfriamento, não é economicamente viável.

O aproveitamento de fontes renováveis para a produção de energia elétrica possibilitará a eliminação do uso de combustível fóssil, especificamente o óleo diesel resultando em diminuição da poluição. Houve um aumento populacional ao longo dos anos e apesar do grande avanço tecnológico ocorrido nas cidades, o mesmo não ocorreu nas comunidades isoladas. Como resultado, eles foram excluídos dos benefícios de uma cidade grande tais como esgoto, asfalto e principalmente o conforto social (comodidade) resultado da energia elétrica (exemplo: televisão, internet, etc.,...). Para resolver o principal problema, a energia elétrica, normalmente as pessoas ou vilas usam o gerador a diesel que é muito poluente tanto em termos atmosférico quanto sonoro. Além disso, necessita fazer constantes viagens para as cidades próximas em busca do combustível com seu conseqüente gasto econômico. As ilhas costeiras são locais relativamente próximos aos centros urbanos, porém de difícil acesso. O desafio é a geração de energia elétrica nesses locais. A grande força energética disponível são as ondas marinhas, que contém um potencial muito grande, mas o seu aproveitamento é praticamente nulo hoje em dia, principalmente no Brasil que dispõe de uma vasta costa marítima e ilhas.

Como solução barata e de relativa facilidade de construção, este trabalho busca aproveitar as ondas marinhas para o bombeamento da água do mar para um reservatório de recuperação de animais marinhos ou diretamente à turbina. Quando a água é descartada, antes de ser devolvida para o mar, sua energia potencial é aproveitado para rodar uma turbina (gerador) e, como conseqüência, produzir a energia elétrica.

Esse sistema requer somente a energia das ondas e pode ser usado em ilhas e encostas. O sistema irá funcionar quando a amplitude das ondas for maior do que 0,5 metros e a pressão da câmara de ar atingir cerca de 30 metros de coluna d'água. Seu princípio de funcionamento é muito simples: a água do mar é bombeada para uma câmara de ar usando a variação de altura da onda. Um pequeno orifício na saída da câmara de ar deixará a água sair com pressão equivalente a uma queda de 30 m de altura. Essa água é injetada na turbina resultando na energia elétrica.

Para entender melhor essa câmara de ar, basta imaginar um pneu de carro sendo preenchido por um compressor de ar de pouca vazão. Isto consome muito tempo. Supondo que esse pneu tenha um pequeno furo, vai chegar um momento em que

haverá o equilíbrio onde a vazão de saída é igual à vazão de entrada, e a pressão se torna constante. Na câmara de ar do sistema, a água do mar é bombeada pela bomba do sistema e comprime o ar que está na câmara de ar. Como a água só pode sair por um orifício pequeno na parte inferior da câmara, o ar vai sendo comprimido. O orifício de saída é pequeno resultando no equilíbrio entre a vazão de entrada e a saída para uma pressão de 30 m de coluna d'água. O movimento de sobe e desce é aproveitado por uma bóia presa por um braço. A bóia tem um empuxo de até 400 kgf e uma variação de amplitude mínima de pelo menos 0,5 metros. Normalmente o intervalo entre ondas está abaixo de 10 segundos.

A Ilha do Arvoredo fica próxima à praia de Pernambuco no Guarujá. Atualmente é usada na recuperação de animais marinhos como tartarugas, lobos marinhos, pingüins e alguns outros tipos de animais. Essa atividade requer o uso de tanques para manter os animais e seria fácil abastecê-los com água salgada fresca se estes não estivessem a 30m de altura. Para possibilitar gerar energia elétrica e ao mesmo tempo conseguir água do mar a fim de encher os tanques, a bomba movida por ondas deve elevar a água até essa altura. Quando os tanques estiverem cheios, a água retorna para o mar através de uma turbina Pelton, aproveitando os 30 m de altura. Quando houver descarte de água, esta também pode ser aproveitada para gerar energia.

A Figura 2.1 mostra um esboço do sistema implantado na Ilha do Arvoredo.

Para facilitar a manutenção, a energia elétrica foi gerada em 24 V em corrente contínua, por motor síncrono de ímãs permanentes, que são fáceis de consertar e são facilmente encontrados em lojas de refrigeração. Inversores de tensão convertem a tensão contínua de 24 V em tensão alternada de 110 ou 220 Vrms. Normalmente os inversores comerciais geram onda quadrada. Na ilha foi usado um inversor senoidal.

ILHA DO ARVOREDO

Figura 2.1 - Esboço do Sistema de Energia implantado na Ilha do Arvoredo.

Fonte: autor

Outra vantagem desse método é a estabilidade da tensão CA (corrente alternada), pois a energia fica armazenada em baterias. Se houver consumo, a bateria fornece a potência requisitada. No caso contrário, a energia continua armazenada nas baterias. Nos sistemas de pequena geração usada em sítios e fazendas, a geladeira causa um grande transtorno, pois ela tem um motor de indução de 1/6 de HP em média. Normalmente esse eletrodoméstico fica 10 minutos ligados e 10 minutos desligados.

No instante em que a geladeira entra em operação, a corrente elétrica de partida é de seis vezes a corrente nominal, ou seja, é como se entrasse um HP de carga. Nesse momento as lâmpadas "piscam", clareando pouco e, só votando ao normal quando a geladeira "desliga". Nestes sistemas o gerador a ser usado tem que ter uma capacidade muito grande a fim de suportar o surto dos eletroeletrônicos. O inversor tem essa capacidade por que possui um regulador de tensão de saída melhor do que o gerador diesel. O gerador de 200 W que foi instalado na ilha, não teria capacidade de partir nem uma geladeira. Por isso a necessidade de baterias para acumular a energia e o inversor para suportar a carga de partida da geladeira e os demais eletrônicos.

2.2 - A novidade foi construir uma usina usando material reciclado de custo muito baixo

Como exemplos de materiais a serem usados, podem ser citados: canos de PVC mesmo, novos têm custo acessível, tambores de polietileno com capacidade de 200 litros, mangueiras de hidrante usadas entre outros. As mangueiras usadas nos hidrantes são consideradas reprovadas quando não passam no teste hidrostático que utiliza no mínimo de 100 m de coluna d'água. As reprovadas são descartadas. As sobras industriais de aço inox, restos de demolição como as vigas de peroba também foram empregadas.

2.3 - Plano de Sistema de Energia para a Ilha do Arvoredo

Figura 2.2 - Fontes de energia na Ilha do Arvoredo.

Fonte: autor.

A Ilha do Arvoredo possui várias fontes de energia espalhadas por vários pontos. O ponto de gerenciamento e acúmulo de energia está no setor do UPS (Local reservado aos funcionários da ilha).

A Figura 2.2 mostra os vários pontos de geração de energia na Ilha do Arvoredo.

2.4 - Geração fotovoltaica

Foi instalada uma geração fotovoltaica cujo objetivo é fornecer energia durante os dias ensolarados e permitir fazer manutenção nas outras fontes de energia sem a preocupação de se ficar sem nenhum fornecimento, basta manter as

telecomunicações e refrigeração o restante pode aguardar o reparo da fonte de energia.

2.5 - Gerenciamento da energia gerada

O banco de baterias é de 24 V e recebe toda energia gerada na ilha. Um inversor de 3000 W senoidal inverte para 220 V. Quando a tensão da bateria fica insuficiente o próprio inversor se desarma, mas quando a tensão fica acima de 28 V não há nenhuma proteção, pois o inversor só se desarma com 30 V. Acima de 28 V há a gaseificação do eletrólito da bateria, que reduz drasticamente sua vida útil. Uma das funções do microcontrolador é não deixar a tensão ultrapassar a esse valor.

2.6 - Monitoramento das condições atmosféricas

A temperatura ambiente, velocidade e sentido do vento e amplitude das ondas também são monitorados pelo microcontrolador.

2.7 - Sistema de Telecomunicação

Uso de antena transmissora e receptora para poder ter internet na ilha com objetivo de monitorar sistema em tempo real por câmeras.

3 - CAPÍTULO III

Nesse capítulo são estudadas as metodologias empregadas, os custos envolvidos os sistemas de armazenamento e controlador de energia elétrica.

3.1 - Metodologia

Como a distância das fontes de energia até o setor UPS é relativamente grande, foi bastante difícil levar essa energia para ser usada e acumulada. A Tabela 3.1 mostra a distância, o número de fases, a tensão, potência e corrente gerada.

Tabela 3.1 - Distância entre as fontes de energia e o UPS.

	Células fotovoltaicas	Gerador eólico	Gerador por ondas	Diesel
Distância até UPS [m]	47	55,8	107	52,6
Fases	2	2	2	2
Voltagem gerada [V]	36	36	24	220
Tensão [V]	36	36	24	
Potência gerada [W]	540	1000	200	7000
Corrente [A]	15	28,8	8,33	31,8
Sistema	CC	CC	CC	CA

3.1.1 Usando o método convencional.

A primeira proposta foi trazer a energia em tensão mais elevada possível e chegar ao banco de bateria através de um regulador de carga para cada fonte de energia, devido à corrente elevada seria necessário usar fios de grande bitola a fim de minimizar as perdas. A Figura 3.1 mostra essa opção [2]. O banco de baterias deve ser de 24 V a fim de contemplar a geração de tensão mais baixa. Foi levantado o custo desse método para efeito de comparação com o método adotado. Tanto neste método como no próximo, o microcontrolador vai conectar as cargas no inversor quando a tensão da bateria passar de 28 V. Apesar do banco de baterias estar protegido pelos reguladores de carga, não se pode deixar nem o gerador eólico e nem o de energia das ondas sem carga, pois ambos aumentariam a rotação e atingiriam um limite considerado perigoso.

Figura 3.1 - Configuração convencional para trazer a energia até as baterias.

Fonte: autor.

3.1.2 Custo estimado desse método

Para efeito de comparação de custo, pode-se estimar o custo para o método convencional, baseando-se no rendimento dos *Grids Tie*. Como o rendimento dos *Grids Tie* é superior a 85% está se supondo que no sistema convencional a perda de potência nos condutores é de 15%. Para cada fonte de energia foi calculada a resistência máxima dos condutores, lembrando que todas as fontes possuem dois fios. A Tabela 3.2 mostra na primeira linha a resistência máxima do condutor a ser usado e o restante da tabela ajuda a definir a bitola do fio a ser usado assim como o peso dos condutores.

Tabela 3.2 - Definição do condutor a ser usado.

	Célula fotovoltaica	Gerador eólico	Energia das ondas
Resistência do condutor [Ω]	0,36	0,1944	0,432
Por Km de fio [Ω/km]	3,825	1,742	2,018
Condutor comercial [AWG]	10	7	8
Peso do condutor por Km [kg/km]	46,8	94	74
Peso do condutor a ser usado [kg]	2,2	10,49	15,83

Os reguladores de carga têm que ser do tipo MPPT que permitem uma entrada de tensão bem maior que do banco de baterias. O preço foi cotado na praça. O fio de cobre está no momento a R\$ 30,00 o kilo.

A Tabela 3.3 mostra o custo estimado para esse método.

Tabela 3.3 - Custo estimado para esse método.

1	Custo condutor	R\$ 855,60
2	regulador MPPT	R\$ 490,00
3	regulador MPPT1	R\$ 240,00
4	regulador MPPT2	R\$ 1.000,00
5	inversor 3 kW	R\$ 2.500,00
	total	R\$ 5.085,60

3.1.3 Método criando uma rede isolada

A outra opção adotada neste projeto foi usar uma rede senoidal isolada e conectar todos os geradores direto nessa rede isolada de distribuição. Isso facilitaria muito porque já existe uma instalação monofásica na ilha conectada ao gerador Diesel. Como resultado, a Figura 3.2 mostra como é usada a rede isolada de dois fios.

Figura 3.2 - Configuração criada da rede isolada para unir as fontes geradoras.

Fonte: autor.

3.1.4 Custo da rede isolada

O custo de mercado dos *Grids Tie* é de R\$ 1,00 por watt. Usou-se o *Grids Tie* comercial mais próximo a potência da fonte de energia. A Tabela 3.4 mostra o custo do método com rede isolada.

Tabela 3.4 - Custo do método com rede isolada.

1	Grid 600	R\$ 600,00
2	Grid 200	R\$ 200,00
3	Grid 1000	R\$ 1.000,00
4	inversor 3 kW	R\$ 2.500,00
5	carregador bateria 40 A	R\$ 500,00
	total	R\$ 4.800,00

3.1.5 Criação de uma rede isolada em laboratório

Como não havia literatura sobre ES se tipo de uso de *Grid Tie* em redes isoladas, foi criada uma rede isolada em nossos laboratórios conforme a Figura 3.3. A geração de tensão foi feita com um no-break senoidal em modo bateria. A Figura 3.4 mostra o *Grid Tie* reconhecendo e injetando corrente nesta rede, cuja carga era um reostato de 66 Ohms. A fonte de energia usada para o *Grid Tie* foi uma placa fotovoltaica de 140 W. Foram usadas pontas de corrente para osciloscópio e pode-se observar que quando o *Grid Tie* reconhece a rede inicia a injeção de corrente na rede e a corrente do no-break diminui.

Figura 3.3 - Montagem usada para o teste em laboratório.

Fonte: autor.

Ao desligar o no-break o *Grid Tie* para de injetar energia na rede, o que demonstra segurança, pois com o no-break desativado pode-se tocar na linha com segurança. Em curva em vermelho (corrente com amplitude menor que 0,5 A) é a corrente inserida na rede pelo *Grid-Tie*.

É possível observar um patamar (pequeno intervalo onde a corrente fica constante) para cada ciclo da senoíde indicando o reconhecimento da passagem da senoíde do no-break pelo zero. Somente dessa maneira é injetada a corrente na rede isolada.

Figura 3.4 - Teste de rede isolada em laboratório.

Fonte: autor.

A Figura 3.4 mostra a corrente fornecida somente pelo no-break (*without Grid tie*), a corrente em conjunto com o *Grid tie* (*Grid tie*) e a corrente fornecida pelo *Grid tie* em teste em laboratório de uma rede isolada.

As características dos equipamentos usados na experiência de rede isolada são mostradas na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Característica dos dispositivos usados na Experiência.

Dispositivo	Características	Fabricante
No-break	Input:115/127/220 V Output:115 V Power: 3 kVA	SMS
<i>Grid tie</i>	Input: 15 a 25 V DC Output: 115 V AC Power: 600 W	LiveLife
Células fotovoltaicas	Output: 17,7 V Power: 140 W	Kyocera
Carga	Resistência: 66 Ω	-----

3.2 - Banco de Baterias

O banco de baterias faz o armazenamento eletroquímico de energia e tem por função manter a tensão de saída estável e também armazenar as sobras de energia durante os períodos onde a geração é maior que o consumo.

O banco de baterias permite o uso de geradores de energia que não suportariam 100% da carga, quando o consumo for maior que a geração o excesso é retirado do conjunto. A grande vantagem é diminuir o custo de implantação de um sistema de geração, pois se projeta pelo consumo médio e não pelo máximo. Existem diversos tipos de baterias sendo as mais comuns as de chumbo ácido, as de hidreto metálico, as de níquel cádmio e de íon de lítio. Em termos de custo benefício, as de chumbo ácido levam vantagem, pois é mais barato e fornecem maior potência.

A Figura 3.5 mostra o banco de baterias usado na ilha. A configuração do banco é de 24 V e 300 Ah.

Figura 3.5 - Banco de baterias 24 V 300 Ah.

Fonte: autor.

As baterias de chumbo ácido são formadas catodo e um anodo. O catodo é o eletrodo negativo e o anodo é o eletrodo positivo. O eletrodo negativo é feito de chumbo enquanto que o eletrodo positivo é de dióxido de chumbo. As placas positivas são isoladas das negativas por separadores. Os conjuntos de placas são mergulhados em um eletrólito de ácido sulfúrico e água. As baterias devem ser carregadas em carga lenta, ou seja, a corrente de carga não deve passar de 10% da capacidade do banco, como pode ser visto na Figura 3.6. Essa etapa deve ser monitorada pelo gerenciamento eletrônico. A profundidade de descarga é muito importante na durabilidade das baterias. No caso de só se ter energia fotovoltaica, onde as baterias recebem carga durante o dia e fornece essa energia durante a noite, quanto menos essas baterias se descarregarem maior será a durabilidade. Por exemplo, se a profundidade de descarga for 60% o numero de ciclos será de 1750 para baterias estacionárias. Como ocorre um ciclo por dia, basta dividir pelo numero de dias do ano e se tem a durabilidade de 4,8 anos. Caso as baterias sejam automotivas, estas vão durar um ano, como pode ser visto na Figura 3.6.

Figura 3.6 - Número de ciclos em função da profundidade de descarga.

Fonte: [2].

3.2.1 Estado de carga do Banco de Baterias

O método mais correto de se conhecer o estado de carga de baterias é medindo a densidade do eletrólito. O método é arriscado e bastante difícil, porque necessita abrir cada uma das células das baterias e a seguir, com um densímetro, medir a densidade do eletrólito. Fazendo a correção de temperatura tem-se estado de carga das baterias. A Tabela 3.6 mostra a relação entre a densidade do eletrólito e carga da bateria.

A densidade cai $0,004 \text{ g/cm}^3$ a cada 5°C de aumento de temperatura [16].

A medida da tensão em aberto da bateria (OCV) fornece uma idéia do estado de carga da bateria, mas só fornece o valor correto após muito tempo em repouso após a recarga. A figura 3.7 mostra a curva do estado de carga do banco de baterias em função da tensão.

Figura 3.7 - Curva de SOC x OCV.

Fonte: autor.

Tabela 3.6 - Estado de Carga da Bateria em Função da Densidade do Eletrólito.

Densidade a 26,5 ° C(g/cm³)			Estado de carga
1260	a	1280	100%
1230	a	1250	75%
1200	a	1220	50%
1170	a	1190	25%
1140	a	1160	descarregada

3.3 - O cérebro do sistema é um micro controlador.

O microcontrolador foi programado para tomar decisões desde o funcionamento até armazenamento de dados para estudos posteriores. A amplitude das ondas foi medida de duas formas: por um sensor no braço da bomba (potenciômetro detalhe 2 da Figura 3.8 e por um sensor de distância ultra-sônico (detalhe 1 Figura 3.8).

O sensor ultra-sônico será estudado em 3.19 - . Dependendo da amplitude das ondas o sistema é capaz de desacoplar a bomba das bóias, salvando o sistema de um dano devido às intempéries do meio ambiente como tempestades.

Figura 3.8 - Detalhe das posições dos sensores de amplitude das ondas.

Fonte: autor.

O nível das ondas não é constante e seria importante aumentar a potência gerada à medida que a vazão da bomba aumenta, mas a câmara de ar é quem recebe esse aumento da atividade da bomba e que se traduz em aumento de pressão. Logo é necessário monitorar a pressão da câmara e se ultrapassar quatro bar (3 Figura 3.9), é aberta uma válvula de segurança, deixando a água escapar. Essa válvula fecha assim que o sensor do braço indicar redução no nível das ondas. A velocidade do jato também é monitorada (4 Figura 3.9).

Figura 3.9 - Sistema de segurança da câmara de ar.

Fonte: autor.

O micro controlador mede também a velocidade e o sentido do vento, pois se pretende implantar um gerador eólico e a potência deste está ligada tanto a sentido quanto a velocidade do vento. Foi visto que as ondas também sofrem a influência do vento [3].

Figura 3.10 - Monitoramento da rotação da turbina.

Fonte: autor.

A rotação da turbina tem que ser monitorada (5 Figura 3.10), pois rotação baixa com velocidade do jato normal (4 Figura 3.9) significa carga excessiva provocada por aumento de atrito ou por corrente de carga muito alta de bateria (7 Figura 3.10). Para isso basta checar a carga no inversor (9 Figura 3.10), a tensão da bateria e a corrente de carga (8 Figura 3.10). No microcontrolador todos os parâmetros foram documentados e armazenados em uma memória de cartão tipo SD. As cargas ligadas ao inversor têm que ser gerenciadas (10 Figura 2.1), pois têm que se prever os horários normais e de pico, caso contrário irá faltar energia. O Gerador síncrono só começa a gerar energia se sua rotação ultrapassar 140 RPM, como é visto no ensaio em vazio e também depende da tensão do banco de bateria que deverá estar com a tensão em torno de 23 V. Esse item pode ser mais bem compreendido estudando o ensaio em carga do gerador. Logo essa rotação tem que ser monitorada. No caso em que o gerador para de funcionar o inversor deve ser desligado a fim de preservar a carga das baterias, diminuindo assim a deterioração do banco de baterias, apesar de haver a opção de manter o inversor funcionando até que a descarga do banco chegue ao limite de 25% da carga total. Estando em período de sol, a energia continua sendo fornecida por placas fotovoltaicas.

3.4 - Gerador Usado na Turbina

A parte mais trabalhosa nesse projeto foi escolher um gerador de alto rendimento e de baixo custo. Chegou-se a um motor de lavadora de roupas. Este motor é síncrono de muito baixa rotação. O rotor possui 12 ímãs permanentes. Cada um desses ímãs tem 2 pares de polos magnéticos. O estator é trifásico com 36 bobinas, 12 por fase. Com essa combinação a cada volta do rotor tem-se 24 ciclos de uma tensão senoidal. Foi escolhido esse tipo de motor por não necessitar multiplicar a rotação.

A Figura 3.11 mostra as duas partes desse motor.

Figura 3.11 - (a) Rotor (b) Estator da máquina de lavar.

Fonte: autor.

A Figura 3.12 apresenta o gerador montado na estrutura de teste. As três fases geram uma tensão trifásica quando recebem energia mecânica no eixo do gerador.

A carcaça desse gerador está em balanço, que permite medir o torque recebido pelo eixo do gerador. O rotor possui um ponto reflexivo para leitura óptica da rotação.

Figura 3.12 – Gerador já montado na estrutura de teste.

Fonte: autor.

3.5 - Turbina usada no Teste

A turbina escolhida foi a turbina Pelton que é a fonte de energia mecânica para o gerador. Foi feita de sucata de roda automotiva de alumínio fundido. O modelo da concha foi baseado na literatura [12]. O raio dessa roda após a colocação das conchas ficou com raio em 0,16 metros. A Figura 3.13, mostra essa turbina montada e preparada para uso.

Figura 3.13 – Turbina Pelton Usado no teste.

Fonte: autor.

3.6 - Uso da Energia da Água para o Teste

O teste inicial foi realizado fora da ilha onde seria necessário produzir uma queda d'água próxima da usada em definitivo na ilha. Esse teste ajudou a definir melhor o sistema implantado na ilha. Foi feita uma instalação especialmente preparada para o teste onde conseguiu uma queda equivalente a 22 m de altura, onde a água foi canalizada com mangueiras de incêndio de 2,5 polegadas.

Figura 3.14 - Esquema hidráulico de teste da turbina e gerador para ondas.

Fonte: autor.

As mangueiras tinham 15 m cada uma e foram necessárias 25 mangueiras em um total de 375 m. Foi usado um bocal de 10 mm. A Figura 3.14 mostra o esquema dessa instalação hidráulica. O manômetro registra uma altura manométrica de 18 m, o que significa a perda de 4 metros de altura para essa vazão. A Figura 3.15 mostra a leitura desse manômetro.

Figura 3.15 - Manômetro antes do bocal.

Fonte: autor.

Para medir a vazão foi usado um tanque de 83 litros. Esse reservatório ficou completamente cheio em 58 s e representa uma vazão Q de 1,43 litros por segundo visto pela equação (3.1):

$$Q = \frac{83}{58} = 1,43 \text{ } \ell / \text{s} \quad (3.1)$$

Essa vazão passa por um bocal com orifício de 10 mm, cuja área S é dada pela equação (3.2):

$$S = 7,8 * 10^{-5} \text{ m}^2 \quad (3.2)$$

Por outro lado, ou seja, a vazão é igual à área vezes a velocidade do jato calculada pela equação (3.3), logo:

$$V = \frac{Q}{S} = \frac{1,43}{7,8 * 10^{-5}} = 18,2 \text{ m/s}. \quad (3.3)$$

Usando a equação (3.4), conhecida como equação de Bernoulli, onde se supõe um orifício em um tanque de água aberto a uma altura h_2 , com $h_1=0$ e $p_1=p_2= P_{atm}$,

$$\frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 + P_1 = \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2 + P_2 \quad (3.4)$$

que para esse caso, substituindo os valores, pode ser visto na equação (3.5)

$$\frac{1}{2} \rho v_1^2 = \rho g h_2, \quad (3.5)$$

Logo a altura manométrica equivalente é fornecida pela equação (3.6):

$$h_2 = \frac{1}{2} \frac{v_1^2}{g} = \frac{18,2^2}{2 * 9,8} = 16,73m \quad (3.6)$$

Com a altura manométrica útil de 16,73 m, tem-se a perda no bocal de 1,27 m. Com isso, o bocal tem um rendimento calculado pela equação (3.7):

$$\eta = \frac{16,73}{18} = 0,93 \quad \text{ou} \quad 93\% \quad (3.7)$$

A energia em função de altura de uma massa d'água pode ser calculada pela equação (3.8)

$$E = mgh \quad (3.8)$$

dividindo-se essa expressão pelo tempo, a potência é fornecida pela equação (3.9)

$$P = \frac{mgh}{t}, \quad \text{mas} \quad \frac{m}{t} = \rho Q \quad (3.9)$$

A potência da energia da água saindo do bocal pode ser calculada substituindo os dados na equação (3.1) e o resultado mostrado na equação (3.10)

$$P = 1,43 * 9,8 * 16,73 = 234,45 \, W \quad (3.10)$$

O já to d'água com essa potência é aplicada na turbina. A turbina transforma essa potência em potência mecânica. Não se consegue cem por cento de transformação. O rendimento máximo atinge quando a velocidade tangencial da turbina, no caso da turbina Pelton, chega a 0,455 da velocidade do jato [12] . Como a velocidade do jato é 18,2 m/s. A velocidade tangencial pode ser obtida pela equação (3.11)

$$V_t = 0,455 * 18,2 = 8,28 \text{ m / s} \quad (3.11)$$

O raio da roda Pelton é $R = 0,16 \text{ m}$. Portanto a rotação para a potência máxima é fornecida pela equação (3.12):

$$N = \frac{V_t * 60}{2\pi R} = \frac{8,28 * 60}{2\pi * 0,16} = 494,2 \text{ RPM} \quad (3.12)$$

3.6.1 Ensaio em Vazio do Gerador

Esse método permitiu levantar a expressão das perdas no ferro para esse gerador e assim prever os pontos de funcionamento nas condições da fonte de energia hidráulica da ilha [14].

O primeiro ensaio foi para se descobrir a tensão gerada em função da rotação bastando para isso o ir abrindo o registro e medindo a tensão entre duas fases. Como o modelo usado para o ensaio em vazio é mais simples quando feito em um motor estrela equivalente, basta dividir a tensão gerada por raiz de 3. Ao mesmo tempo mede-se a força que a turbina aplica a carcaça em balanço, em um braço de 79 mm. Como é um ensaio em vazio, a potência mecânica de entrada é consumida nas perdas por Foucault, Histerese, ventilação e atrito. A Figura 3.16 mostra o circuito equivalente do ensaio em vazio por fase.

Figura 3.16 - Modelo por fase do gerador.

Fonte: autor.

A tensão E_0 é a tensão gerada que é função da rotação RPM. A potência perdida está concentrada em R_p , que representa as perdas por Foucalt e Histerese. Essa potência é medida na carcaça em balanço do gerador por uma balança (dinamômetro) digital e um medidor de RPM. A potência é calculada pela equação (3.13)

$$P = C\omega = F \cdot b \cdot \omega = F \cdot b \cdot 2\pi \cdot N / 60 \quad (3.13)$$

Onde C é o conjugado em $N \cdot m$, F a força em N , b o braço onde é aplicada a força e N a rotação em RPM. A Figura 3.17 mostra o gerador detalhando o ponto onde se mediu a força na carcaça e o refletor no rotor para medição óptica do RPM. Para que a carcaça ficasse em balanço o eixo do rotor foi prolongado para a colocação de um mancal.

Figura 3.17 - Detalhes acrescentados ao gerado para permitir a medição da potência mecânica consumida pelo gerador nos ensaios.

Fonte: autor.

A potência mecânica por fase é um terço dessa potência que pode ser calculada pela equação (3.14)

$$P_{mecF} = F * b * 2\pi * N / 180 \quad (3.14)$$

e a potência elétrica é 10% a menos devido ao atrito e ventilação, calculada pela equação (3.15)

$$PEF = P_{mecF} * 0,9 \quad (3.15)$$

A resistência de perdas pode ser calculada pela equação (3.16). Como VF é função da rotação do gerador é possível conhecer o comportamento da resistência de perdas com auxílio da Tabela 3.7.

$$R_p = \frac{VF^2}{PEF} \quad (3.16)$$

Tabela 3.7 - Dados do Ensaio em Vazio.

F(kg)	N(RPM)	C(Nm)	Pmec(W)	PFE(W)	Rp(Ω)	VF(V)
1,36	325,3	1,052912	11,95593	10,76034	262,1974	53,11622
1,69	427	1,308398	19,50182	17,55164	346,1216	77,94229
1,86	618,4	1,440012	31,08443	27,97599	369,0784	101,6136
2,09	731	1,618078	41,28803	37,15923	388,0956	120,0889

A figura 3.13 mostra a curva de Rp em função do RPM. O comportamento das perdas no ferro para um determinado núcleo é calculada pela equação (3.17)

$$P_{FE} = K_H * f + K_F * f^2 \quad (3.17)$$

onde K_H engloba todas variáveis das perdas por Histerese para um determinado núcleo e K_F tem a mesma função nas perdas por Foucault. Para que isso ocorra deve-se manter o fluxo constante. Observando a curva extraída da Tabela 3.7, nota-se que existe uma equação do segundo grau que se adapta a curva, que pode ser visto na Figura 3.18.

Figura 3.18 - Comportamento das perdas por fase nas chapas do gerador ensaiado.

Fonte: autor.

3.7 - Ensaio em Curto do Gerador

Esse método permitiu estimar as perdas nos condutores e determinar o valor da resistência equivalente por fase. Com esse teste é possível prever o funcionamento em quaisquer outras condições de carga.

O ensaio em curto usou o mesmo princípio do ensaio em vazio. A potência continua sendo medida pela potência mecânica usando-se (w_1). Como foi necessário um torque muito elevado, foi construído um redutor para ser acionado por uma furadeira elétrica manual. Esse redutor pode visto na Figura 3.19.

Como a rotação é muito baixa, as perdas por atrito e ventilação foram desprezadas. Devido à rotação muito baixa foram distribuídos no rotor quatro refletores para medir a rotação RPM com maior precisão.

Figura 3.19 - Foto do artefato mecânico que tornou possível fazer o ensaio em curto.

Fonte: autor.

As três saídas do gerador foram colocadas em curto-circuito para não desbalancear as fases e a corrente foi medida com alicate de corrente. A Tabela 3.8 mostra o resultado do ensaio.

Tabela 3.8 - Resultado do Ensaio em Curto.

N(RPM)	P(w)	Rcc(Ω)	Zf(Ω)	X(Ω)	C(Nm)	Icc(A)	F(Kg)	Eo(V)	Vf(V)	Ld(H)
43	9,48	4,51	5,07	2,32	6,50	1,45	8,4	12,74	7,35	0,50
54	12,34	4,64	5,64	3,19	6,70	1,63	8,75	15,92	9,19	0,55
78	17,69	4,60	6,71	4,88	6,78	1,96	8,76	22,79	13,16	0,59
90	20,15	4,40	7,05	5,51	6,73	2,14	8,7	26,15	15,09	0,58
117	23,45	4,43	8,52	7,27	6,03	2,3	7,8	33,94	19,59	0,59
138	25,20	4,37	9,63	8,58	5,49	2,4	7,1	40,03	23,12	0,59

A tensão de linha E_o foi medida antes de ser feito o curto-circuito. Dividindo a tensão de linha por raiz de 3, foi determinado a tensão de fase. Dessa maneira foi possível calcular a impedância por fase bastando substituir os dados na equação (3.18)

$$Z_f = \frac{VF}{I_{cc}} \quad (3.18)$$

Para se calcular X_d basta substituir os valores já calculados na equação(3.19)

$$X_d = \sqrt{Z_f^2 - R_f^2} \quad (3.19)$$

Praticamente todos os parâmetros principais do circuito equivalente por fase foram calculados. É interessante notar a leitura do dinamômetro em função da rotação, pois inicialmente a leitura sobe e a seguir cai indicando algo errado, mas basta observar a potência que sempre sobe devido ao aumento da rotação.

3.8 - Ensaio em Carga do Gerador

Neste ensaio foi feita uma turbina com diâmetro maior e foi definitivamente usada no gerador para energia das ondas na Ilha do Arvoredo. A turbina nos primeiros testes tinha um diâmetro de 0,32 m e a atual tem 0,56 m. Isso foi feito porque foi observado nos ensaios que as perdas nas chapas poderiam ser minimizadas com um aumento do diâmetro da turbina

3.8.1 Correção da Resistência R_{wire} com a Temperatura

Essa correção foi feita em um dia com temperatura ambiente em 25° C e a temperatura das bobinas foram extraídas com termopar Tipo K (*Cromel Alumel*) com a devida eletrônica. A corrente por fase neste experimento foi mantida constante em 1,5 A, a corrente média de funcionamento do gerador. A temperatura ficou ao redor de 60° C.

Nesta temperatura R_{wire} pode ser dado pela equação (3.20)

$$R_{wire60} = f_{io_{25}}(1 + \alpha(T2 - T1)) = 4,5(1 + 0,039(60 - 25)) = 5,1 \ \Omega \quad (3.20)$$

3.9 - Resultado do Ensaio em Carga do Gerador

Para extrair o máximo de energia desse gerador deve-se trabalhar na mais baixa rotação possível, minimizando as perdas no ferro. A rotação ideal fica dependendo do diâmetro da turbina, para ficar próximo do ponto de rendimento máximo. Como a tensão gerada depende da rotação, foi necessário compensar com subida da corrente e, com isso, sobe a potência perdida em R_{wire} . Foram feitas várias medições práticas para cargas de valores diferentes.

Tabela 3.9 - Ensaio prático da turbina de 0,56m a ser usada na ilha.

RL	IL	N	F(kg)	Pot mec	PEL	VRLfase	Pferro	Pcu
31	1,1	266,25	7,205	153,9398	112,53	34,1	23,91	18,513
21,6	1,32	243,375	7,89	154,0921	112,9075	28,512	12,3	26,65872
15,5	1,51	227,2	8,422	153,5504	106,0247	23,405	3,3	34,88553
6,1	2,05	245	8,145	160,1344	76,90575	12,505	12,3	64,29825

A Tabela 3.9 mostra os resultados do ensaio onde se observa a coluna das perdas no ferro por fase, extraída da Figura 3.18. Como a rotação está muito baixa, se somar as perdas no fio e no ferro, chega-se à potência mecânica fornecida pela turbina.

A carga RL foi feita com fios e chaves para facilitar a medição. A Figura 3.20 mostra essa carga.

Como no trabalho anterior [1] a força cai para carga muito alta, mas nota-se o aumento da potência mecânica.

Figura 3.20 - Carga trifásica montada com resistores de NiCromo.

Fonte: autor.

3.9.1. Embasamento teórico desses resultados

Para chegar ao cálculo da potência necessita-se da velocidade angular obtida pela equação (3.21). O cálculo de ω [rad/seg] é fornecida pela equação (3.21), extraindo o restante dos dados da Tabela 3.9 onde a rotação é 227,2 RPM, $R_{wire} = 5,1 \, \Omega$, $L_d = 0,593 \, H$ e supondo a configuração de carga de uma R_t de $15,5 \, \Omega$, onde basta alterar a posição da chave da Figura 3.20 (S3 e S4 ligadas).

$$\omega = \frac{2\pi N}{60} = \frac{2\pi 227,2}{60} = 23,79 \, rad / s \quad (3.21)$$

O dinamômetro registrou uma força calculada pela equação (3.22):

$$F = 9,8 * 8,422 = 82,53 \, N \quad (3.22)$$

Figura 3.21 - Circuito elétrico por fase do gerador para a comprovação teórica do método. Fonte: autor.

O braço (b) onde é aplicada essa força é de 0,079 m.

Logo a potência mecânica pode ser calculada pela equação (3.23):

$$P = Fb\omega = 82,53 * 0,079 * 23,79 = 155,10 \text{ W} \quad (3.23)$$

Por outro lado, a tensão gerada em função da rotação em RPM [1] é calculada pela equação (3.24):

$$E_0 = 0,165N = 0,165 * 227,2 = 37,48 \text{ V} \quad (3.24)$$

que pode ser melhor compreendida usando-se o circuito equivalente da Figura 3.21. Essa tensão E_0 alimenta um circuito RL onde o R_{total} é: calculada pela equação (3.25):

$$R_t = 15,5 + 5,1 = 20,6 \text{ } \Omega \quad (3.25)$$

nesta rotação e a reatância de dispersão (X_d) é calculada pela equação (3.26):

$$X_d = 0,593 * \frac{2\pi 227,2}{60} = 14,11 \text{ } \Omega \quad (3.26)$$

Com essa dispersão pode-se finalmente calcular a corrente do circuito da Figura 3.21, fornecida pela equação (3.27)

$$I = \frac{37,48}{\sqrt{20,6^2 + 14,11^2}} = 1,50 \text{ A} \quad (3.27)$$

A Tabela 3.10 mostra a precisão do método. Para outros valores de RPM (N) são só apresentados os cálculos, mostrados na Tabela 3.10.

Tabela 3.10 - Cálculos teóricos comprovando a precisão do método.

RL	N	X LD	Rwire	Z	E ₀	IL
15,5	227	14,09643	5,1	24,96136	37,455	1,500519
21,6	243	15,09001	5,1	30,66918	40,095	1,307339
6,1	245	15,21421	5,1	18,89212	40,425	2,139781
31	266,25	16,53381	5,1	39,70613	43,93125	1,10641

3.9.2. Previsão Teórica da Energia Gerada nas Condições da Ilha do Arvoredo

A queda de água na Ilha do Arvoredo foi ajustada para 30m descontando as perdas. A velocidade do jato pode ser calculada pela equação(3.28):

$$V = \sqrt{2 * g * h} = \sqrt{2 * 9,8 * 30} = 24,24 \text{ m/s} \quad (3.28)$$

Tendo a velocidade do jato pode se calcular a rotação ideal da turbina pela equação (3.28) [12]:

$$N = \frac{120 * 0,455 * V}{2 * \pi * D} = \frac{120 * 11}{2 * \pi * 0,56} = 375,15 \text{ RPM} \quad (3.29)$$

Tendo o conhecimento da rotação da turbina, calcula-se a velocidade angular pela equação(3.30):

$$\omega = \frac{2\pi N}{60} = \frac{2\pi 375,15}{60} = 39,28 \text{ rad/s} \quad (3.30)$$

O bocal usado na ilha é de 8,5 mm e assim pode-se calcular a vazão pela equação (3.31):

$$Q = V * A_{bocal} = \frac{24,24 * \pi * (8,5 * 10^{-3})^2}{4} = 1,377 * 10^{-3} \text{ m}^3 / \text{s} \quad (3.31)$$

com a vazão calculada, é possível obter a potência hidráulica que chega na turbina obtida pela equação (3.32)

$$P_{hidralica} = \rho * Q * g * h = 1,38 * 9,8 * 30 = 405,72 \text{ W} \quad (3.32)$$

As turbinas feitas de forma artesanal têm um rendimento de 70% na rotação ideal [12]. Assim pode-se calcular a potência mecânica extraída pela turbina, conforme a equação (3.33):

$$P_{mec} = 0,7 * P_{hidraulica} = 0,7 * 405,72 = 284 \text{ W} \quad (3.33)$$

Pode-se prever a força a ser registrada pelo dinamômetro fornecida pela equação (3.34):

$$F = \frac{P_{mec}}{b * \omega} = \frac{284}{0,079 * 39,28} = 91,52 \text{ N} \quad (3.34)$$

Por outro lado, a tensão de fase gerada em função da rotação RPM [17] é calculada pela equação (3.35):

$$E_0 = 0,165N = 0,165 * 375,15 = 61,9 \text{ V} \quad (3.35)$$

O circuito equivalente por fase da Figura 3.21 fica conforme a Figura 3.22.

Figura 3.22 - Circuito elétrico equivalente por fase do gerador nas condições da Ilha a 375 RPM. Fonte: autor.

Ensaando o gerador nas condições da ilha com uma carga R_L 15,5 Ω , tem-se a tensão E_o alimentando um circuito R_L , R_{wire} e X_d onde o R_t é dado pela equação (3.36):

$$R_t = 15,5 + 5,1 = 20,6 \Omega \quad (3.36)$$

nesta rotação calcula-se X_d pela equação (3.37):

$$X_d = 0,593 * \frac{2\pi 375,15}{60} = 23,3 \Omega \quad (3.37)$$

A tensão E_o alimenta R_t em série com X_d dando portanto uma corrente calculada pela equação (3.38):

$$I = \frac{61,9}{\sqrt{20,6^2 + 23,3^2}} = 1,99 A \quad (3.38)$$

A potência útil será consumida no R_L nas três fases e, portanto fornecida pela equação (3.39):

$$P_u = 3 * R_L * I^2 = 3 * 15,5 * 1,99^2 = 184,14 W \quad (3.39)$$

A tensão na carga é calculada pela equação (3.40):

$$E_{RLF} = 15,5 * 1,99 = 30,84 V \quad (3.40)$$

e a tensão de linha é calculada pela equação (3.41):

$$E_{linha} = 30,84 * \sqrt{3} = 53,43 V \quad (3.41)$$

As perdas no ferro por fase podem ser extraídas pela equação da curva de perdas no ferro da Figura 3.18 e para esse caso, calculadas pela equação (3.42):

$$P_{FE} = 4 \bullet 10^{-5} \bullet 375,15^2 + 2,27 \bullet 10^{-2} \bullet 375,15 - 3,89 \bullet 10^{-2} = 14,11 \text{ W} \quad (3.42)$$

Todos os parâmetros do circuito por fase estão representados na Figura 3.22
A perda total no ferro nesta rotação é obtida pela equação (3.43)

$$P_{FET} = 3 * P_{FE} = 42,3 \text{ W} \quad (3.43)$$

A perda total no fio para essa carga é calculada pela equação (3.44):

$$P_{fio} = 3 * R_{fio} * I^2 = 3 * 5,1 * 1,99^2 = 61,2 \text{ W} \quad (3.44)$$

Somando a potência útil com as perdas chega-se bem próximo da potência mecânica, que normalmente é 10% maior, devido às perdas por atrito e ventilação.

3.9.3. Aumento da Potência Útil

Pode-se aumentar a potência útil apenas aumentando R_L o que reduz a corrente e conseqüentemente a perda no fio (P_{fio}), pois V_f só depende da rotação. Para manter a rotação constante tem que se manter a potência mecânica constante.

Pode-se procurar graficamente com auxílio da equação (3.45):

$$P_u = 3 * R_L * I^2 = 0,9 P_{mec} - 3 * P_{FE} - 3 * P_{fio} \quad (3.45)$$

substituindo os valores conhecidos em na equação (3.45) , chega-se a equação (3.46)

$$P_u = 3 * (R_L + 5,1) * I^2 = 0,9 * 284 - 42,3 \quad (3.46)$$

Figura 3.23 - Corrente de carga em função da resistência de carga.

Fonte: autor.

Figura 3.24 - Potência útil em função da resistência de carga.

Fonte: autor.

Construindo a curva de I (A) em função de RL , que pode ser vista na Figura 3.23 e da potência útil em função de RL mostrada na Figura 3.24. Com auxílio destas duas figuras é possível prever onde os valores alcançarão a potência pretendida no projeto.

3.10 - Instalação fotovoltaica

Foram instaladas três placas fotovoltaicas de 180 W cada uma, totalizando 540 W de potência máxima instantânea. Só essas placas podem suprir em torno de 2,7 kWh em dias ensolarados.

O local original de instalação seria próximo a torre do gerador eólico, mas devido a uma limpeza de arbusto e poda de árvores, o telhado do UPS ficou ensolarado o dia todo e foi possível instalar as placas diretamente sobre o teto do quarto onde está alojado o banco de baterias, usando 6 metros de fio.

Com a eliminação de um *Grid-Tie* foi, possível a compra de um regulador de carga MPPT em conjunto com um monitor local (MeTer MT-5). Com esse monitor é possível verificar a energia fornecida pelas placas (tensão, corrente, se está carregando) e também do estado de carga da bateria em %.

A Figura 3.25 mostra as três placas instaladas no telhado do UPS (local destinado aos funcionários).

Figura 3.25 - Placas fotovoltaicas de 36 volts e 180 watts cada uma.

Fonte: autor.

3.10.1 Regulador de carga MPPT

O regulador MPPT além de cumprir a sua função de manter a tensão de carga do banco de baterias dentro da faixa de tolerância, também extrai o máximo de energia da fonte fornecedora de energia, no caso os painéis fotovoltaicos.

Figura 3.26 – Monitor local e o regulador de carga MPPT.

Fonte: autor.

3.11 - Uso da Energia Gerada

O refrigerador é o mais preocupante em uma instalação, pois na partida exige uma corrente de até seis vezes a nominal, apesar desse refrigerador ser o mais econômico do mercado por mês gasta apenas 15,8 kWh/mês. A potência do refrigerador é de apenas 21,94 W. As lâmpadas são de led consumindo 10 ou 12 W. A TV e o receptor de parabólica gasta ao redor de 30 W. Somando todo consumo constante, esse valor não ultrapassa os 90 W.

Quatro baterias, formando um banco de 24 V, com capacidade de 300 Ah, serve de pulmão principalmente no uso de máquina de lavar ou moto serra elétrica.

Um inversor de 1 kW senoidal converte 24 V de CC em 220 VCA.

Um microcontrolador mede a tensão da bateria que se passar de 28 V liga uma carga resistiva de 120 W para absorver a energia excedente.

Normalmente durante a noite, quando só esta ligada a geladeira e o receptor de parabólica, essa carga chega a ser insuficiente e é acionada outra carga resistiva de 240 W, que normalmente abaixa a tensão muito rapidamente e o sistema é desligado. A tensão de desligamento dessas cargas é de 23 V.

3.11.1 Inversores de 3 kW

Para acionamento do guindaste, existem dois motores de 2 CV que para serem acionados necessita-se de um inversor para cada um desses motores. Normalmente, para pequena potência, a entrada desses inversores pode ser monofásica, mas pode ser aplicada a tensão retificada do inversor monofásico diretamente no barramento CC dos inversores para motores.

Como o rendimento do sistema fica ao redor de 80% são necessários dois inversores de 3 kW e dois inversor para motor de 2 CV.

Devido ao alto investimento está se aguardando que esse custo seja coberto pela economia de óleo diesel.

Outra solução foi utilizar um inversor e um sistema de chaveamento para acionar os motores em separado.

3.12 - Instalação de um Sistema de Telecomunicação entre a Ilha e a UNAERP do Guarujá

Observando a imagem de satélite pode-se observar que a distância entre a ilha e a UNAERP (Universidade de Ribeirão Preto) é de aproximadamente 5.600 m. Isso mostra que se pode usar uma antena para essa distância. Essas antenas são muito usadas em sistema de segurança em condomínio de residências. A principal dificuldade foi alinhar uma antena com a outra devido a distância ser tão grande onde não é possível ver onde está a outra antena. Normalmente se usa uma bússola para um pré-ajuste, mas usando foto de satélite, o apontamento ficou bastante simples e preciso. No caso da Ilha do Arvoredo, bastou apontar a antena da ilha em direção ao canto direito do Morro do Mar Casado bem no meio do penúltimo prédio do Hotel Jequitimar na praia de Pernambuco. Assim a antena ficou na direção da UNAERP. Na universidade a antena é apontada a um prédio da própria faculdade. A figura 3.16 mostra a direção da ilha para UNAERP e a figura 3.17 mostra o apontamento na universidade.

Figura 3.27 - Apontamento da antena1 para UNAERP.

Fonte: autor.

Figura 3.28 - Apontamento da antena2 da UNAERP em direção a ilha.

Fonte: autor.

3.13 - Necessidade de Energia para Ilha do Arvoredo

A ilha não tem um porto para o embarque e desembarque, ao invés disso existe um guindaste para retirar e colocar as pessoas diretamente nas embarcações.

O guindaste reboca uma gaiola com capacidade de até quatro pessoas por vez.

Os motores elétricos do guindaste são de indução trifásica e o mais potente tem 2 CV correspondente a 1,492 kW. Para não serem substituídos, deverão ser acionados por inversores trifásicos. Existem dois motores, um deles faz o movimento vertical e o outro o movimento horizontal do guincho. Existem momentos em que os dois motores são acionados ao mesmo tempo. Essa dificuldade foi resolvida com a instalação de um sistema de bloqueio impedindo o acionamento duplo. O tempo de uso costuma ser

muito pequeno de no máximo 15 minutos e por no máximo seis vezes ao dia. O consumo diário será menor que dado pela equação (3.47)

$$E = 1,472 * 0,25 * 6 = 2,2 \text{ kWh} \quad (3.47)$$

Como o armazenamento é feito com baterias, usa-se quatro baterias de 12 V em série paralelo a fim de alimentar o inversor principal de 24 VCC para 220 VAC. A corrente a ser retirada da bateria pelo inversor DC-AC ao acionar um motor é fornecida pela equação (3.48):

$$I = 2200 / (0,9 * 24) = 68,14 \text{ A} \quad (3.48)$$

A capacidade dessas baterias deverá ser superior ao número de horas diárias de uso, que pode ser calculada pela equação (3.49)

$$E_n = I * tempo = 68,14 * 0,25 * 6 = 102,2 \text{ Ah} \quad (3.49)$$

Como se pretende gerar no mínimo ao redor de 200 W, só para essas cargas são necessárias uma quantidade de horas obtidas pela equação (3.50)

$$t = \frac{E_n}{P_{ger} * \eta / E_{Bat}} = \frac{102,2}{200 * 0,9 / 24} = 13,6 \text{ horas} \quad (3.50)$$

Como o gerador irá funcionar 24 horas por dia é gerado um total calculado pela equação (3.51)

$$E_n = t * P_{ger} * \eta = 24 * 200 * 0,9 = 4320 \text{ Wh} \quad (3.51)$$

A diferença entre a previsão de gasto apresenta o excedente a ser usado na carga de do banco de baterias ou bombeamento de água de chuva de um reservatório a outro e é dado pela equação (3.52):

$$E_{sobra} = 4320 \text{ Wh} - 13,6 * 200 * 0,9 \text{ Wh} = 1980 \text{ Wh} \quad (3.52)$$

3.14 - Outras utilidades para a sobra de energia gerada na ilha

A sobra de energia seria usada para iluminação e refrigeração. Atualmente não há refrigerador na ilha. Atualmente o consumo desse eletrodoméstico caiu muito, tem-se geladeira de 260 litros consumindo 16 kWh por mês. Por dia o consumo é de 0,53 kWh. Tirando a geladeira ainda sobra 0,96 kWh, que seria usado para alguns outros eletrodomésticos e iluminação conforme equação (3.54)

$$E_{mensal} = 4320 \text{ Wh} * 30 = 129,6 \text{ kWh} \quad (3.53)$$

Se essa energia fosse comprada de uma concessionária a R\$ 0,40 gastar-se ia R\$ 51,80. Que não é um valor considerável, mas quando se sabe que não será mais necessária a ligação do motor diesel do gerador, o valor economizado em poluição não tem preço. Observou-se que manter uma usina movida por ondas é bastante difícil, logo essas estimativas são otimistas, mas espera-se ir aumentando o número de horas de funcionamento ao mesmo tempo resolvendo os problemas que vão surgir. No caso de se gerar 200 W a potência da queda d'água tem que ser de 400 W.

Como o gerador carrega baterias, a rotação da turbina depende do estado de carga das baterias. Se as baterias estiverem com uma tensão de 26 V e se carregar com 7,2 A, o sistema está no ponto de rendimento máximo e na rotação projetada, fornecendo os 200 W. Quando se descarrega muito a bateria a corrente de carga aumenta, mas a tensão é menor que 26 V, dando uma potência de carga menor que os 200 W. Neste caso a rotação da turbina cai. Por outro lado a bateria com 28 V a corrente cai e a potência novamente fica menor que os 200 W, neste caso a rotação

da turbina aumenta. Como são quatro baterias de 12 V em série paralelas, usou-se um motor síncrono de ímãs permanentes funcionando como gerador. Para se chegar a esse gerador foram feitos vários testes usando um sistema de com uma potência da ordem de metade do sistema usado na Ilha do Arvoredo, pois é bastante difícil ir constantemente até a ilha, pois varia vezes não se conseguiu colocar a embarcação no mar devido ao mau tempo.

O ponto de trabalho de uma turbina é uma parábola com a concavidade voltada para baixo, onde na abscissa tem-se o RPM e na ordenada à potência [12]

O rendimento desse sistema de energia tem um rendimento ao redor de 50%, portanto tem-se que conseguir 400 W de energia das ondas, logo para se conseguir essa potência com uma altura simulada de 30 m é necessário uma vazão estimada pela equação (3.54)

$$Q = \frac{P}{\rho g H} = \frac{400}{1000 * 9,8 * 30} = 1,36 l / s \quad (3.54)$$

Infelizmente nossa fonte de energia chega a ter um intervalo de 10 segundos, portanto para cada onda 13,6 litros tem que entrar na câmara de ar. O volume dessa câmara tem que ser tal que a entrada desta água não produza um aumento de pressão perceptível.

Aproximando a variação das ondas marinhas a um seno conforme equação (3.55)

$$A = 0,25 \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \quad (3.55)$$

onde, A é a amplitude da onda, se a onda tiver um período de 10s, tem-se a velocidade angular (ω) obtida pela equação (3.56) :

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 0,628 \text{ rad} / \text{seg} \quad (3.56)$$

A Figura 3.29 mostra a variação da amplitude dessa onda no tempo.

O importante é imaginar um flutuador acompanhando a crista dessa onda.

Figura 3.29 - Variação da amplitude de uma onda marinha em função do tempo.

Fonte: autor

3.15 - Metodologia usada na construção da Bomba para energia das ondas

Para baratear o projeto usaram-se sobras de canos de inox de diâmetro interno de 210 mm e 500 mm de comprimento. Neste cilindro, um êmbolo vai bombear a água. A Figura 3.30 mostra o cilindro a ser usado e a Figura 3.31 mostra o êmbolo.

Nos tambores tem-se um braço formando uma alavanca para acionar os êmbolos como pode ser visto na Figura 3.32. A alavanca reduz o curso de 0,5 m para 0,196 m. Esse esboço tem que ser alterado, pois para cada cilindro são necessárias duas válvulas de retenção.

Figura 3.30 - Cilindro de Inox 316 de diâmetro interno de 210 mm.

Fonte: autor.

Figura 3.31 - Embolo a ser usado com duas gaxetas.

Fonte: autor.

Figura 3.32 - Esboço do sistema de bombeamento por ondas.

Fonte: autor.

Usando treliça de 6 metros, pode-se ter $a = 4,3 \text{ m}$ e $b = 1,69 \text{ m}$ mostrados na equação (3.57) :

$$0,196a = 0,5b \quad (3.57)$$

Com auxílio da Figura 3.32, pode-se calcular a força que os flutuadores devem aplicar na ponta da treliça e multiplicação da força devido à alavanca feita pelo trecho de 1,69 m da treliça. Para manter a pressão de 30m de coluna d'água no interior da câmara de pressão é necessária uma força aplicada nos êmbolos calculada pela equação (3.58):

$$F_1 = P * S = 1000 * 9,8 * 30 * 31,4 * 10^{-3} = 9231,6 \text{ N} \quad (3.58)$$

Nos flutuadores a força pode ser calculada pela equação, dividindo-se esse valor pela razão entre a/b obtida pela equação (3.59):

$$F_2 = \frac{F_1}{4,3/1,69} \quad (3.59)$$

Os dois cilindros apenas comprimem a água a ser injetada na câmara de Ar, sendo o “c” na descida e o “d” na subida do flutuador respectivamente. Quando o êmbolo sobe é criado certo vácuo que tem por finalidade de encher o cilindro d’água. Cada cilindro deve contribuir com 6,8 litros, que é a metade dos 13,6 litros. O volume de cada parte do cilindro pode ser calculado multiplicando a área da base, que é dado pela equação (3.60):

$$Ab = \frac{\pi d^2}{4} = 34,7 * 10^{-3} m^2 \quad (3.60)$$

onde, Ab é a área da base vezes a altura “h”. O cilindro “c” opera na descida da onda enquanto o “d” na subida. Estudando a água recebida na câmara pela câmara de ar tem-se: durante o intervalo de 0 a 5 segundos, onde “c” está injetando de 5 a 10 seg. “d” é quem injeta. A vazão é dada pela Figura 3.33.

Figura 3.33 - Vazão dos cilindros “c” e “d”.

Fonte: autor.

A câmara de Ar mantém a pressão constante e assim a vazão de saída se mantém em 1,36 litros/segundos, a diferença entre a saída e entrada é a variação de volume da câmara de ar que pode ser vista na Figura 3.34.

Figura 3.34 - Diferença de vazão de entrada e saída da câmara de ar.

Fonte: autor.

Figura 3.35 - Câmara de ar.

Fonte: autor.

Usando uma câmara com 10 litros a variação de volume já se torna desprezível.

Essa câmara foi feita com cão de PVC de 100 mm, procurando-se ter um volume bem superior aos 10 litros. O esboço dessa câmara pode ser visto na Figura 3.35. O bocal é por onde a pressão da água é injetada na turbina, como se necessita de uma vazão de 1,36 litros por segundo e a câmara simulam uma coluna d'água de 30 metros, pode-se calcular a velocidade do jato pela equação (3.61) [10]:

$$v = \sqrt{2 * g * h} = \sqrt{2 * 9,8 * 30} = 24,25 \text{ m/s} \quad (3.61)$$

mas para se ter 1,36 l/s de vazão o diâmetro do bocal D é calculado pela equação (3.62):

$$D = \sqrt{\frac{4 * Q}{\pi * v}} = \sqrt{\frac{4 * 1,36 * 10^{-3}}{\pi * 24,25}} = 8,45 \text{ mm} \quad (3.62)$$

A turbina escolhida é uma Pelton com D = 0,56 m de diâmetro. A rotação ideal de uma turbina é quando a velocidade tangencial é calculada pela equação (3.63) [12]:

$$V_t = 0,455 * v \quad (3.63)$$

que no caso seria $V_t = 11 \text{ m/s}$.

Isso faz a rotação N ser calculada pela equação (3.64):

$$N = \frac{120 * V_t}{2 * \pi * D} = \frac{120 * 11}{2 * \pi * 0,56} = 375,15 \text{ RPM} \quad (3.64)$$

3.16 - Uso do Microcontrolador

O micro controlador é um componente que serve para fazer o controle e automação de sistemas. Antes desses dispositivos os componentes discretos eram usados para a construção de um hardware, que poderia exercer controle. Qualquer alteração ou aprimoramento era extremamente dificultoso era mais fácil fazer um novo projeto. O consumo de potência era extremamente alto a fonte de alimentação chegava a ocupar mais espaço que o circuito de controle.

A seguir surgiram os microprocessadores, estes passaram a implementar as funções lógicas por software, que facilitou tremendamente as correções e aperfeiçoamento do controle. O microprocessador exigia diversos periféricos como memória RAM, ROM, conversores A/D e D/A, circuitos de interface e etc. Como consequência o consumo de energia diminuiu tremendamente. Com o surgimento dos microcontroladores os periféricos do microprocessador passaram para dentro do integrado. O microcontrolador escolhido foi o Aduino mega 2560

3.16.1 Características de Um micro controlador para Ilha do Arvoredo

Vários sinais poderão ser digitais como: sentido do vento, velocidade do vento, amplitude das ondas por ultra-som, mas a maioria tem que ser analógica como amplitude das ondas via potenciômetro, tensões, correntes. No caso de uma ocorrência esporádica, seria importante não ficar testando até que ocorra o fato, isso faria o sistema perder tempo desnecessário em processamento.

Os microcontroladores têm um sistema de interrupção que só é acionado na ocorrência esporádica. Ocorrendo o fato o sistema para o que estava fazendo e atende a interrupção e a seguir volta ao processamento normal. Um cuidado deve ser tomado no início da interrupção os registradores de trabalho devem ser salvos, além de bloquear novas interrupções, pois se ocorresse uma nova interrupção o sistema poderia se perder. Algumas interrupções serão internas geradas pelos *Timers* internos, são medições que ocorrem periodicamente na faixa de um ou mais

segundos, como por exemplo, a medição de velocidade dos ventos, que pode ser media cada dez minutos.

3.17 - Sensores Usados no Microcontrolador

Os diversos sensores estão ligados as entradas do micro controlador representado por números já os atuadores são mostrados por letras, como mostra a Figura 3.36

Figura 3.36 - Diagrama de entrada de sensores e atuadores do microcontrolador.

Fonte: autor.

3.17.1 Sensor numero 1: DS1302 *Real Time Clock*

Na realidade esse modulo DS1302 não é um sensor, mas sim um relógio de tempo real e calendário e 31 bytes de RAM estática. Através de uma interface serial simples é possível comunicar com o microcontrolador.

Em tempo real, o circuito de relógio / calendário fornece segundo, minuto, hora, dia, semana, mês, ano de informações, o número de dias por mês e ano bi-sexto ajustado automaticamente. Relógio pode ser usado na configuração AM / PM ou 12horas, mas foi adotado o formato de 24 horas.

Com esse modulo o micro controlador pode armazenar os dados informando o tempo real da ocorrência em minutos, horas, dias, mês e ano. A bateria garante a precisão do tempo sem nenhuma preocupação com falta de energia.

Entre o DS1302 e o microcontrolador, usa-se modo de comunicação serial síncrona, usada apenas três linhas de portas:

1. Redefinir RST
2. Linhas de I / O de dados
3. SCLK relógio serial.

Relógio / RAM dados de leitura / gravação para um byte ou de até 31 bytes de comunicação carácter set caminho. DS1302 trabalho de baixa potência para manter as informações de dados e relógio quando a energia é inferior a um mW

3.17.2 Sensor numero 2: Sensor de pressão MPX5700AP

É um transdutor piezo resistivo para uma gama muito grande de aplicação principalmente quando ligado a micro controlador com entrada analógica.

A escala desse sensor vai de 2,18 a 101,5 PSI, que pode ser melhor compreendido quando comparado em coluna d'água, que equivale a 1,5 mca a 71,4 mca respectivamente. Este sensor monitora a coluna equivalente de água aplicada a turbina.

A Figura 3.37 mostra o desenho desse sensor

Figura 3.37 - Sensor MPX 5700.

Fonte: [18].

Figura 3.38 - Tensão de saída em função da pressão.

Fonte: [16].

A Figura 3.38 mostra a tensão de saída em função da pressão. A pressão de nosso uso na câmara de ar é de aproximadamente 30m de coluna d'água o que corresponde a uma pressão de 294 kPa, isso representa na curva a uma tensão de 2,0 V.

3.17.3 Sensor numero 3 Sensor de Umidade

O sensor de temperatura e umidade digital DHT11 o resultado da medição é convertido em informação serial. A Figura 3.39 mostra a foto desse sensor.

Figura 3.39 - Sensor de Umidade e temperatura.

Fonte: [30].

Figura 3.40 - Esquema de ligação entre o sensor e o micro controlador.

Fonte: [30].

A Figura 3.40 como é feita a comunicação serial entre o sensor de umidade e o micro controlador. O pino de dados necessita de um resistor *pull-up* e quando inativo fica no nível de VCC.

Para o micro controlador receber os dados do sensor, este deve requisitar os dados que é feito zerando o pino de dados por 18 ms, o DHT11 responde após 40µs. A resposta do sensor é manter o pino de dados baixo por 54µs e vai a seguir a NL1 por

mais 80 μ s, Neste momento inicia o envio de dados. Os dados são enviados em cinco pacotes de oito bits, sendo o primeiro o mais significativo da Unidade o próximo pacote traz a parte decimal, os próximos dois pacotes trazem da mesma forma a informação da temperatura, o último pacote é o *checksum*.

3.17.4 Sensor numero 4 Sensor de corrente ACS712ELCTR-30A.

Este sensor utiliza o efeito Hall sobre um condutor de cobre de resistência de 1,2 m Ω Pode medir corrente CA ou CC e varia linearmente com corrente unidirecional ou bidirecional. A Figura 3.41 mostra o esquema de ligação desse sensor.

Figura 3.41 - Aplicação típica do sensor de corrente.

Fonte: [31].

Figura 3.42 - Curva de saída de tensão analógica em função da corrente de entrada.

Fonte: [31].

A Figura 3.42 mostra a tensão de saída do sensor em função da corrente de entrada, se a corrente de entrada for 0 A a tensão de saída será $V_{cc}/2$.

Figura 3.43 - Fluxograma do programa de aquisição de dados.

Fonte: Autor.

A Figura 3.43 mostra o fluxograma usado para o funcionamento do sensor de corrente. Inicialmente são definidos os pinos do arduino que servem de entradas e saídas. Na sequência é subtraída a tensão de 2,5 volts e assim tem-se a referencia zero de corrente. Como somente foi medida corrente cc positiva, basta calcular a corrente pela tensão medida para em seguida guardar na memória.

3.18 - Sistema de Proteção

Sistema de Proteção Quando as ondas atingem mais de 2 metros de altura, um sistema de proteção interrompe o bombeamento. Isso é feito soltando a bóia do braço. A bóia se afasta do braço e permanece ancorada até a calmaria.

Precisa-se fazer o monitoramento da amplitude das ondas e sua periodicidade.

O tempo decorrido entre uma onda e outra está na faixa de 4 a 10 segundos, se monitorar em um intervalo de 0,25 segundos é possível determinar a amplitude máxima e também a periodicidade. Usando um sensor de distância acoplado a um conversor AD de 16 bits, as medições serão bem precisas. Cada medida ocupará dois endereços de uma memória de 8 bits, por hora serão necessários $N = 4 \times 3600 = 14\,400$ endereços em um mês serão necessários 10,37 GB. Supondo monitorar mais 5 variáveis, é necessário o uso de um cartão SD ou *pendriver* de 16 GB. O principal medidor de amplitude das ondas é um sensor ultra-sônico o SRF05

O SRF05 é um sensor ultra-sônico, com novo modo de operação permite que o esse sensor use um único pino para o gatilho e eco, economizando pinos valiosos no seu controlador. Quando o pino modo é deixado desligado, o SRF05 opera com gatilho separado e pinos de eco. O SRF05 inclui um pequeno atraso antes do pulso de eco para dar aos controladores mais lentos o tempo para executar os pulsos de comando.

Figura 3.44 - Placa do sensor SRF05.

Fonte: [18].

O SRF05 tem internamente um resistor *pull up* neste pino. A Figura 3.44 a placa desse sensor.

Figura 3.45 - Diagrama de tempos do sensor ultra-sônico.

Fonte: [18].

3.18.1 Como calcular a distância

A Figura 3.45 mostra o diagrama de tempos para esse sensor. O microcontrolador deve fornecer um pulso de disparo de pelo menos 10 microssegundos, feito pelo bloco: “Emitindo pulso de disparo” da Figura 3.46. O SRF05 transmitirá uma salva de 8 ciclos, na frequência de 40 kHz . O pino de sinal eco fica neste instante em nível lógico um até que chegue o sinal de retorno, representado pelo bloco “Aguardando eco” da Figura 3.46. No instante do recebimento do eco essa linha volta a nível lógico zero. A largura desse pulso equivale a distância em que se encontra o objeto, caso não ocorra eco em até 30 ms a linha de eco volta a zero para que o microcontrolador tente uma nova medição. Para se saber a distância até o alvo basta dividir o tempo de eco por 58 e o resultado será a distância em cm. O SRF05 pode ser ativado cada 50 ms, esse cálculo é feito no bloco: “Calculando a distância e gravando dados” na Figura 3.46. A amplitude das ondas não deve passar de 2 metros, isso é feito por um comparador representado pelos blocos: “Amplitude maior que dois metros e atuador de segurança” gerando um sinal de saída para desativação do sistema mostrado na Figura 3.46.

3.18.2 Fluxograma da Medição de Distância com SRF05

Figura 3.46 - Fluxograma do cálculo da amplitude da onda em metros .

Fonte: Autor.

3.19 - Medição de amplitude com potenciômetro

Um potenciômetro foi colocado no eixo de acionamento dos êmbolos e com isso pode-se medir o quanto sobe e quanto às bóias descem e isso vai dar uma idéia da realidade da crista da onda e o vale.

3.20 - Sensor da direção e sentido do vento

Esse sensor foi feito usando um LDR de 27 mm de diâmetro. Acima do LDR foi colocada uma placa de obstrução da luz, placa essa com uma fenda por onde leds de alto brilho podem iluminar o LDR. A placa estará solidária ao sensor do vento.

Um único leds é acionado a cada instante e ao mesmo tempo está sendo medida a resistência do LDR. Os leds estarão a uma distancia tal da placa de obstrução que haverá influencia de led em outro de tal forma que pelo valor da resistência medida pode-se ter a precisão da posição da biruta. A Figura 3.47 mostra um esboço do sensor.

Figura 3.47 - Sensor para o sentido do vento.

Fonte: autor.

A Figura 3.48 mostra o LDR a ser usado, quando todo iluminado por leds sua resistência foi de 314 Ohms. Quando se ilumina 1/8 do led essa resistência aumenta para 2 138 ohms, apesar deste valor não ser importante, pois interessa a queda do valor resistivo Figura 3.49.

Figura 3.48 - LDR a ser usado.

Fonte: autor.

Para acionar um led por vez foi usado um multiplex e demultiplex. Como a corrente dos leds não pode ser suportada por esses componentes serão usados transistores com essa finalidade.

Supondo que S0 tenha nível lógico 1, S3, S2 e S1 tenha nível lógico zero, neste caso a linha Eo do demultiplex terá nível lógico um e somente o Io do multiplex foi aterrado. Neste caso somente o led ligado entre Eo e Io é acionado. Pode-se ter uma idéia melhor do funcionamento observando a Figura 3.49 e Figura 3.50.

Figura 3.49 - Resistência do LDR quando um oitavo de sua área for iluminado.

Fonte: autor.

Nota-se que o multímetro está medindo o valor da resistência de um oitavo do LDR iluminado.

Figura 3.50 - Princípio de funcionamento da matriz de leds.

Fonte: autor.

Quando as variáveis de seleção S1 e S0 forem 00 a tensão da bateria estará ligada à linha E0, é a única linha energizada. Qualquer um dos quatro leds ligados nessa linha poderá acender, basta ligar um dos I0, I1, I2 ou I3 a terra. Para ligar I0 basta fazer S2=S3=0, como pode ser visto na Figura 3.51. Em nível de circuito, pode-se enxergar o caminho percorrido pela corrente de acendimento dos leds. Supondo que a tensão da bateria seja 5 volts a tensão de E0 fica em torno de 4,7 V. No emissor de Q1 tem-se E0-Vbe. Como Vbe está ao redor de 0,7 volts, a tensão do emissor estará ao redor de 4,0 volts. Usando leds operando em 3,5 V e 20 mA, o resistor R7 deve diminuir de 0,5 volts (4,0 - 0,5 = 3,5). Portanto o valor de R7 pode ser calculado pela equação (3.65)

$$R_7 = \frac{0,5}{0,02} = 25 \text{ Ohms} \quad (3.65)$$

Pode-se notar que I0 polariza a base de Q5. Este transistor ao saturar liga os catodos de quatro leds a terra e assim o led 1, que é o único polarizado dos quatro, acende.

Figura 3.51 - Trecho da matriz de leds no nível de circuito.

Fonte: autor.

3.21 - Medição da Velocidade do Vento

Para se medir a velocidade do vento ira se usar um anemômetro fabricado pela SINALIZADORES GERAIS. É um sensor bastante simples usa conchas de plástico que é bastante sensível. A cada volta do rotor um *reed switch* é fechado e aberto esse sinal é detectado por uma entrada do micro-controlador e usando o fator de correção do fabricante chega-se a velocidade do vento. A Figura 3.52 mostra esse sensor.

Figura 3.52 - Anemômetro a ser usado.

Fonte: autor.

No rotor há um pequeno ímã e na haste há um *reed switch* que se fecha e abre a cada volta do rotor.

O indicador de velocidade do vento que acompanha o anemômetro pode ser visto na Figura 3.53, pode-se notar que a indicação está em quilômetros por hora.

Figura 3.53 - Indicador do anemômetro.

Fonte: autor.

3.22 - Protótipo já testado para energia das ondas

Inicialmente procurou-se obter experiência com um sistema bastante pequeno, que utilizasse o mesmo princípio de funcionamento. O custo teria que ser bastante baixo, pois uma vez testada a experiência, o material empregado praticamente não seria usado no protótipo definitivo.

Esse protótipo serviu para testar a idéia e verificar se os cálculos estavam coerentes. Seu objetivo era bombear a água do mar elevando-a a 10 metros de altura, em um tanque de 20.000 litros.

3.22.1 Construção do cilindro teste

Considerando a pequena vazão da bomba não foi necessário utilizar uma alavanca, as bóias teriam que suportar a força de bombeamento. Sem a alavanca a excursão do pistão deve ter a mesma amplitude das ondas e por este motivo usou-se um cano de PVC de esgoto com 6 metros de comprimento e três polegadas de diâmetro para permitir compensar as diversas amplitudes de maré. Esse cano foi revestido com outro cano de maior diâmetro, quatro polegadas, pois esse tipo de material é muito flexível. Uma massa de concreto foi colocada entre os dois canos, resultando em uma rigidez muito boa. Para preencher o espaço entre eles foi necessário fixá-los em uma parede com 6 m de altura.

O embolo foi construído com uma gaxeta de três polegadas, como pode ser visto na Figura 3.54.

Figura 3.54 - Gaxeta para bomba de pistão de três polegadas.

Fonte: autor.

Figura 3.55 - Cilindro usado na bomba com uma entrada e uma saída d'água.

Fonte: autor.

Observa-se o conjunto para montagem do pistão constituído por: arruelas de alumínio, gaxeta de couro, parafuso de aço inox, e pino de fixação de pistão de latão. Esse conjunto é fixado em um cano de alumínio, completando o embolo.

Na parte inferior do cano de três polegadas foram coladas luvas para serem usadas como entrada e saída de água. O cilindro pode ser visto na Figura 3.55.

Na Figura 3.56 mostra-se o cilindro fechado com um “cap” e devido elevada pressão no bombeamento foi acrescentada na parte inferior do cilindro uma cinta de aço inox para reforçar sua parte inferior.

Figura 3.56 - Cilindro fechado com um cap e reforço de inox.

Fonte: autor.

Na Figura 3.56 mostra-se o cilindro fechado com uma capa e reforço de inox.

Devido à pressão elevada no interior do cilindro foram colocadas diversas cintas de aço ao longo de seu comprimento com objetivo de segurar as partes coladas e ao mesmo tempo servir de suporte para a fixação no mar. Na Figura 3.57, pode-se ver o cano de alumínio, que também foi preenchido com concreto. Após um primeiro teste no mar esse cano foi substituído por um de PVC de 60 mm de diâmetro. Foi necessário reforçar a parte inferior da bomba com concreto, com a finalidade de aumentar seu peso e simultaneamente suportar a pressão de bombeamento.

A Figura 3.58, mostra o enchimento com concreto da parte inferior da bomba, para se conseguir esse feito o cilindro foi invertido.

Figura 3.57 - Enchimento do espaço entre os dois canos de PVC e também do êmbolo.
Fonte: autor.

Figura 3.58 - Enchimento da parte inferior da bomba com concreto.
Fonte: autor.

3.22.2 Construção da Câmara de Ar

A câmara de ar reguladora de pressão tem a finalidade de diminuir a perda de carga, Tendo sido construída usando-se um cano de PVC de 8 polegadas de diâmetro e um comprimento de 0,8 m resultando em um volume interno de 25 litros. A água comprime o ar no interior de um volume de tal forma que a saída do mesmo será quando a pressão em seu interior for levemente maior do que a da coluna d'água.

O objetivo é fazer a água entrar pela parte inferior do cilindro e através de um tubo pescador essa água é sai também na parte inferior do cilindro, mantendo o ar comprimido e dessa forma mantém a velocidade de saída constante. O objetivo é pode trafegar em canos de menor diâmetro, pois a velocidade fica constante na saída da câmara, diminuindo a perda de carga.

3.22.3 Teste de pressão da câmara de Ar

Figura 3.59 - Câmara de ar.

Fonte: autor.

A Figura 3.59 mostra a câmara em teste para ver se suporta pelo menos 10m de coluna d'água. Foi usado um compressor de ar e quando a pressão chegou ao equivalente a 15 m de coluna d'água a válvula foi fechada e foi observado não haver vazamentos.

3.22.4 Cálculo da força necessária para conseguir eleva água do mar a 10m de altura

Na Ilha do Arvoredo onde foi feito o teste da bomba existe uma piscina a 10m de altura onde o cientista Fernando Lee protegia seu barco das tempestades. A intenção do protótipo é bombear água para encher essa piscina. A equação (3.66) mostra o cálculo da pressão em função da força e da superfície, onde F é a força, P é a pressão e S a área:

$$P = \frac{F}{S} \quad (3.66)$$

Essa pressão é devido a 10 metros da coluna d'água a ser vencida pela bomba e é calculada pela equação (3.67)

$$P = d * g * H \quad (3.67)$$

onde d é a densidade, g é a aceleração da gravidade e H altura da coluna d'água.

A Figura 3.60 mostra o esboço das forças envolvidas nesta bomba.

Figura 3.60 - Forças envolvidas para o bombeamento a 10 metros de altura.

Fonte: autor.

Substituindo os dados na equação (3.67), pode-se calcular a pressão dessa coluna d'água é calculada pela equação (3.68):

$$P = 1000 * 9,8 * 10 = 98kP \quad (3.68)$$

e a força para equilibrar essa coluna d'água é obtida pela equação (3.69):

$$F = \frac{98KP * \pi * 0,075^2}{4} = 433 \text{ N} \quad \text{isto é } 44,18 \text{ kgf} \quad (3.69)$$

3.22.5 Método de teste prático de se conseguir a força de equilíbrio para o bombeamento

O teste prático foi feito colocando-se a bomba sobre uma balança, onde se mediu inicialmente o peso da bomba que foi de 90 kg. A saída da bomba foi levada a uma altura de 10 metros. A haste da bomba ficou a 6,5 metros de altura, onde duas pessoas podiam aplicar força nesta haste. Pode-se notar na Figura 3.61 as medições feitas pela balança no momento da movimentação da haste, também é importante observar as válvulas de retenção. Com um pouco de trabalho consegue-se observar o valor do peso marcado pela balança que foi calculado pela equação (3.70), onde F_t foi a força em kgf aplicado ao embolo da bomba e P_b é o peso da bomba antes do acionamento.

Figura 3.61 - Teste prático da bomba para bombear a 10 metros de altura.

Fonte: autor.

$$F = F_t - P_b = 144,8 - 90 = 54,8 \text{ kgf isto é } 537,04 \text{ N} \quad (3.70)$$

Esse aumento em relação ao calculado era esperado devido ao atrito da gaxeta no cilindro de PVC.

Para o teste no mar foram usados quatro flutuadores de 60 litros. Dois dos flutuadores ficaram cheios d'água e dois vazios. A Figura 3.62 mostra os flutuadores.

Figura 3.62 - Flutuadores para a bomba.

Fonte: autor.

Na Ilha do Arvoredo, Fernando Lee construiu uma piscina cuja finalidade era guardar as embarcações em dias de tempestade. Existe um guindaste para subir e descer as embarcações a 10 metros de altura.

A Figura 3.63 mostra a bomba totalmente montada e guardada na piscina à espera do dia do teste.

Figura 3.63 - Bomba movida por ondas na Ilha do Arvoredo preparada para teste.

Fonte: autor.

3.22.6 Teste do protótipo na Ilha do Arvoredo

O teste foi feito com o mar bastante calmo e conseguiu-se bombear água para essa piscina com a energia das ondas. A Figura 3.64 mostra a bomba sendo descida ao mar pelo guindaste da ilha. Há um vídeo mostrando o teste da bomba.

Figura 3.64 - Bomba sendo descida ao mar para teste.

Fonte: autor.

4 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

Nesse capítulo foram estudados os resultados experimentais na geração e controle da energia elétrica obtidos após o estudo teórico e montagem do sistema.

4.1 - Resultado do teste com rede isolada.

A Figura 4.1 mostra a comparação entre a corrente da bateria e a de entrada do *grid Tie*.

Figura 4.1 - Queda da corrente da bateria do no-break decorrente do aumento da corrente de entrada do *Grid Tie*. Fonte: autor.

Pode-se notar que ao aumentar a participação do *Grid Tie* há uma queda correspondente na corrente fornecida pelo banco de baterias, Quando a corrente da bateria estiver muito próxima de zero o microcontrolador liga um carregador de baterias e aí o próprio microcontrolador passa a monitorar a tensão de carga para que não ultrapasse a 28 V.

4.2 - Resultados do ensaio em vazio do gerador

Para construção de um sistema de geração de energia é importante saber a potência mecânica a ser aplicada ao eixo do gerador, a seguir basta aplicar os parâmetros extraídos desse gerador e assim se consegue projetar sistemas com o máximo rendimento possível

O resultado do ensaio em vazio do gerador apontou as perdas no ferro para esse gerador. Como não há como conseguir esse mesmo gerado de outros fabricantes não houve a preocupação de saber se essas perdas são grandes ou pequenas ao definir a rotação já se pode saber quais vão ser as perdas nas chapas, basta substituir a rotação na equação 3.42 e a seguir multiplicar por três, pois essa equação calcula as perdas por fase e o gerador é trifásico.

4.3 - Resultados do ensaio em curto do gerador

O ensaio em curto vai dar as perdas no fio dos enrolamentos e assim pode-se procurar o melhor rendimento do gerador tentando manter a corrente baixa. Pode-se notar combinando esses dois ensaios, que se aumentando a tensão de saída diminui-se a corrente, mas por outro lado há o aumento das perdas nas chapas.

4.4 - Resultados do ensaio em carga do gerador

O ensaio em carga serve para comprovar a previsão teórica dos resultados e mostra a grande precisão dos resultados com instrumentos de medições bastante simples e baratos.

4.5 - Resultados Ambientais

A cada mês eram gastos 200 litros de óleo Diesel e como cada litro desse óleo produz ao redor de 4 kg de CO₂, jogava-se 800 kg de CO₂ na natureza.

Apesar de não se ter todas as cargas ligadas no sistema de rede isolada, a emissão de CO₂ já caiu para 25%, pois ainda são gastos 50 litros por mês, isso equivale a 200 kg de CO₂ liberados na natureza.

4.6 - Resultado da Medição com o Arduino

O arduino foi extremamente importante como interface para os sensores além de se poder monitorar, fazer controles além de memorizar esses dados. Vários resultados serão apresentados nos próximos itens. Esses resultados mostram como exemplo, os valores medidos e armazenados na memória gravados em um banco de dados, no período de quatro dias corridos.

4.6.1 Medida da Intensidade luminosa

Figura 4.2 - Resultado da medida de intensidade luminosa.

Fonte: autor.

A Figura 4.2 mostra a medição feita durante quatro dias corridos. Nos primeiros momentos foram ajustes do sensor LDR. Como o sensor satura facilmente quando apontado diretamente para o sol, a medição foi feita dentro da UPS assim como os demais sensores mostrados a seguir. A medição foi iniciada durante a noite. Nesse momento o valor da medição é ajustado em zero, como é verificado no início do gráfico. No decorrer do tempo, o sol começa a aparecer e a intensidade de luz começa a aumentar até atingir valores máximos. Nesse primeiro intervalo de valores máximos é possível observar pouca variação mostrando que o sol não teve presença de nuvens como aconteceu nos dias seguintes. É possível notar que o máximo de intensidade não acontece próximo ao meio do patamar. Isso aconteceu porque houve sombreamento de uma árvore próximo à UPS o que alterou a luminosidade do sol. Ao final do primeiro, o decaimento deve-se início do anoitecer. No segundo dia, nuvens estavam presentes no começo do dia mostrando sombreando o sol em vários momentos. Depois, as nuvens foram dissipando mas ainda ficou a presença de nuvens de grande altitude, tênues mas o suficiente para atenuar a intensidade solar. No terceiro dia verifica-se a presença de várias nuvens

interferindo na luminosidade solar como é possível observar no gráfico. No quarto dia, as nuvens foram mais espessas e teve momentos de chuva como é verificado no sensor de umidade.

4.6.2 Medida de Temperatura

Figura 4.3 - Resultado da medida de temperatura.

Fonte: autor.

A Figura 4.2 mostra a variação de temperatura durante os quatro dias. Há duas quedas de temperatura na primeira e segunda noite. Isso aconteceu por causa dos ventos e pouca umidade para manter a massa térmica da USP. No terceiro dia, a temperatura teve pouca queda devido ao aumento da umidade e a capacidade de armazenar calor, sentida como “mormaço”. Isso manteve a temperatura mais quente e constante.

4.6.3 Medida de Umidade

Figura 4.4 - Resultado da medida de umidade.

Fonte: autor.

A Figura 4.4 mostra o resultado das medições para os quatro da umidade relativa do ar. Nos dois primeiros dias obteve-se uma grande variação da umidade. Durante o dia, a umidade diminui devido à presença do sol e, durante a noite, a umidade aumenta. Foi observada a saturação da umidade em 95% no início do dia e, além de ser uma característica do sensor, é a presença de orvalho. No quarto dia, observa-se a saturação constante indicando que houve chuva no local monitorado o que foi uma realidade.

4.7 - Resultado da geração com Energia das Ondas

A medição de amplitude das ondas foi feita com o sensor ultra-sônico SRF05 acoplado ao micro-controlador arduino ATMEGA 2660. Foram coletadas informações de apenas três ondas muito próximas as bóias de acionamento do gerador de energia das ondas. No momento somente metade da bomba está funcionando, pois a parte superior da bomba está desligada para reparo.

A Figura 4.5 mostra a amplitude de três ondas consecutivas.

Figura 4.5 - Amplitude das ondas em função do tempo.

Fonte: autor.

A Figura 4.6 mostra a corrente gerada sendo aplicada no banco de baterias. O sensor de corrente utilizado foi o ACS712 acoplado ao arduino.

Figura 4.6 - Corrente aplicada ao banco de baterias.

Fonte: autor.

Figura 4.7 - Flutuação da tensão da bateria devido a aplicação de corrente.

Fonte: autor.

A Figura 4.7 tem-se a flutuação de tensão devido à corrente aplicada ao banco de baterias. A tensão nominal do banco é de 24 V e no momento as baterias estão bastante descarregadas, pois normalmente chegam a 28 V.

Acredita-se que o sistema deva funcionar por algumas horas antes de ter que ser desligado. O rendimento é inferior aquele que se tem conseguido nas micros usinas por nós instaladas, hoje ao redor de 50%, que no início não passava de 15%, mas devido a persistência em detectar erros e na correção, foi-se aperfeiçoando e derrubando o custo. A vantagem da experiência em energia das ondas de ser realizado perto de São Paulo é que se pode acompanhar o funcionamento da usina constantemente. O sistema de monitoramento pode acusar com antecedência o aparecimento de falhas e assim dando tempo maior para sua correção.

5 - CONCLUSÕES

Por ser um sistema muito barato, podem-se fazer alterações a muito baixo custo, o que não acontece com as empresas fabricantes dos diversos tipos de conversores. A potência gerada é muito pequena, suficiente apenas para uma ou duas famílias. Com os recursos muito pequenos utilizando praticamente sobras industriais e sucatas já se conseguiu levar água do mar a 10 metros de altura.

O sistema a ser concluído utiliza a mesma idéia apenas há o aumento da vazão e a altura que passa a ser de 30m. A manutenção do sistema pode ser feita pelo próprio usuário, pois se usou materiais muito comuns e conhecidos por todos nós. Pretende-se interligar o sistema de energia existente na ilha ao gerado por esse sistema, pois como se trabalha com uma queda de 30 metros passa a ser economicamente viável [15]. Como o sistema de gerenciamento estará constantemente medindo e armazenando dados, vai ajudar a aperfeiçoar o sistema e ajudar a criar novas idéias de onde surgirão novos trabalhos.

Neste trabalho foi apresentado um método proposto para integrar diferentes fontes de energia renovável para um sistema de gerenciamento inédito no Brasil e não necessita de nenhuma sustentação da energia externa como a do motor diesel. Este sistema irá gerar energia elétrica praticamente ininterrupta. Seu funcionamento é manter um sistema híbrido concatenado com um inversor de corrente contínua para alternada (que usa o banco da bateria). Adicionalmente, a fim reduzir o custo e as perdas, um dispositivo do tipo *Gried Tie* foi usado a fim reconhecer as características da fonte gerada e retornar a energia capturada de outras fontes nas mesmas fases e frequência deste sistema adicionando-a no sistema tornando-a muito prática de juntar as diferentes fontes de energia. Isso faz a conexão diretamente às linhas de alimentação e carga serem interligadas e proporciona uma capacidade de carga muito maior do que o somente banco da bateria poderia fornecer na fiação. As fontes podem ser adicionadas em qualquer momento com grande facilidade.

6 - PLANOS FUTUROS

O trabalho mostrou que não se deve utilizar e depender somente da energia das ondas e fotovoltaicas, mas também outras fontes de energia necessitam ser acopladas ao sistema. Basta uma calmaria ou um mar bravo para que o sistema de ondas não funcione.

Aumentar o número de placas fotovoltaicas implica aumentar muito o número de baterias, pois em média são apenas cinco horas de Sol por dia.

Um gerador eólico ajudaria muito a manter o fornecimento de energia equalizado e foi feita medidas iniciais indicando a possibilidade do seu uso em conjunto com os demais geradores de energia.

Está sendo projetado também um sistema para alimentar os motores do guincho na energia alternativa.

Como projeto final da energia elétrica na ilha, a geração a Diesel será usada somente em emergências. Nos demais usos, a energia alternativa acoplada no sistema será suficiente e com reservas para alimentar todos os equipamentos eletro-eletrônicos.

Deve-se urgentemente implantar um dessalinizador para se ter água potável na ilha.

7 - APRESENTAÇÃO EM CONGRESSOS

Este trabalho de Doutorado gerou os seguintes trabalhos:

Mario Kawano*, M. Rodrigues**, M. Galetti**, Erick Pfeifer**, Devair A.**, R. K. Onmori. **A MECHANICAL METHOD TO EXTRACT THE CORE AND WIRE LOSSES ON A SYNCHRONOUS GENERATOR**; 10th International Conference on Hydraulic Efficiency Measurement; Itajubá, MG 2014

Cassiano, D.A. **Kawano, M.** Senna, R. M. de. Lourenço, S. R. **Sensitivity Analysis na Tomada de Decisão em Projeto de Energia Distribuída**; Simpósio de Pesquisa do grande ABC; 2012.

KAWANO, M. ; Onmori, R.K. **Trabalho voluntário social dos alunos de engenharia na geração artesanal de energia com turbinas de cerâmica**. In: xxxv congresso brasileiro de educação em engenharia, 2007, Curitiba. XXXV Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, 2007.

KAWANO, M. **Micro-hidrogerador com turbina pelton de cerâmica**. In: 6 Congresso Internacional Sobre Geração Distribuída e Energia no meio Rural, Campinas. Anais do 6 Congresso Internacional Sobre Geração Distribuída e Energia no meio Rural. Unicamp: Unicamp-Nipe, 2006. CD.

GIN, Rosangela. B. B.; WILLIAMS, Earle ; BENETI, Cesar Augusto Assis; PEREIRA FILHO, Augusto; JUSEVICIUS, Marco ; **KAWANO, M.**; BIANCHI, Reynaldo; BELLODI, Marcello. **The electrical and meteorological conditions in thunderstorms in the vicinity**. In: VIII International Symposium on Lightning Protection, São Bernardo do Campo. Anais do congresso, 2005. v. 1. p. 137-142.

KAWANO, M. **Gerador Elétrico Social**. In: II SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE CIÊNCIAS INTEGRADAS, 2005, GUARUJÁ. Anais do congresso, 2005. ver Site.

BELLODI, Marcello; **KAWANO, M.**; GIN, Rosangela B. B.; BIANCHI, Reynaldo; TONIDADEL, Flavio; ROMANO, Marco; MOURE, Eduardo; SANTOS, Romário dos. **The electrical-meteorological monitoring conditions in São Bernardo do Campo, São Paulo state: system in development**. In: VIII International Symposium on Lightning Protection, 2005, SBC, SP. Anais do Congresso. v. 1. p. 164-167.

KAWANO, M. **Aquecedor Solar Social**. In: I SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE CIÊNCIAS INTEGRADAS, 2004, Guarujá. Anais do congresso, 2004. ver Site.

KAWANO, M. **Gerador Social**. Revista Pesquisa FAPESP, São Paulo, 01 jul. 2008.

8 - REFERÊNCIAS

- [1] Kawano, M.; Onmori, R. K.; Matakas JR, L. (2007) **Trabalho voluntário social dos alunos de engenharia na geração artesanal de energia com turbinas de cerâmica**, Curitiba. XXXV Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia – COBENGE 2007.
- [2] Luciano Hauschild, **Avaliação de Estratégia de Operação de Sistemas Híbridos Fotovoltaico Eólico Diesel**, Dissertação apresentada na escola politécnica da Usp, 2006.
- [3] Véronique Cochin ;**Sea Surface Current–Wave–Wind Interactions Measured by Coastal Ground Wave HF Radars**; IEEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING LETTERS, VOL. 5, NO. 2, APRIL 2008 227.
- [4] A. Muetze and J. G. Vining, “**Ocean wave energy conversion – a survey**,” Proceedings of the 41st IEEE IAS Annual Conference, vol. 3, pp. 1410-1417, Tampa, FL, October 8-12, 2006. Page(s): 457 - 463 Product Type: Conference Publications.
- [5] Thomas W. Thorpe, “**An Overview of Wave Energy Technology: Status, Performance and Costs**,” Proceedings of a Conference on Wave Power: Moving towards Commercial Viability, 30 November 1999, Institute of Mechanical Engineers, London.
- [6] Marian P. Kazmierkowski and Marek Jasiński,**Power Electronic Grid-Interface for Renewable Ocean Wave Energy**. Compatibility and Power Electronics (CPE), 2011 7th International Conference-Workshop. Date of Conference: 1-3 June 2011 Inst. of Control & Ind. Electron., Warsaw Univ. of Technol., Warsaw, Poland Jasinski, M. Page(s): 457 - 463 Product Type: Conference Publications.
- [7] Lagoun, M. S. Lagoun, A. Benalia and M.E.H Benbouzid. **Ocean Wave Converters: State of the Art and Current Status**. 2010 IEEE International Energy Conference.

- [8] Previsic, Mirko. **Wave power Technologies**. Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting, Vol.2, Jun. 2005Electric Power Reseal, pp. 2005-2016.
- [9] Washio, Yukihisa Washio, Hiroyuki Osawa, Teruhisa Ogata. **The Open Sea Tests of The Offshore Floating Type Wave Power Device “Mighty Whale”**. OCEANS, 2001. MTS/IEEE Conference and Exhibition. Page(s): 579 - 585 vol.1.
- [10] MACINTYRE, A.J. & SILVEIRA, J.F.S. **Máquinas Operatrizes-Bombas**. In: Máquinas Hidráulicas. s.n.t., 1969. p.22-131.
- [11] Heinlein,K.P; Dourador,M. A. F., **Alterações Tecnológicas a Serem Implementadas em Usinas Hidroelétricas Objetivando Melhorar a Convivência com os Peixes** Monografia apresentada no IEE da Universidade de São Paulo, 2009.
- [12] MACINTYRE, A.J. **Máquinas motrizes hidráulicas**. Rio de janeiro: Guanabara Dois; 1983.
- [13] Souza,Z.;Fuchs,R.D.;Santos,A.H.M. **Centrais Hidro e termelétricas**. São Paulo: Edgard Blücher. Itajubá, MG:Escola Federal de Engenharia,1983.244p.
- [14] **Edson; máquinas elétricas e acionamento; Elsevier; rio de janeiro; 2009.**
- [15] Cassiano, D.A. et al **Sensitivity Analysis na Tomada de Decisão em Projeto de Energia Distribuída**;Simpósio de Pesquisa do grande ABC; 2012
- [16] Devantech SRF05 Sonar Ranging Module | Acrônimo disponível em: <http://www.picaxe.com/docs/srf005.pdf>. Acesso em: 9 junho. 2014
- [17] Mario Kawano*, M. Rodrigues**, M. Galeti**, Erick Pfeifer**, Devair A.**, R. K. Onmori. **A MECHANICAL METHOD TO EXTRACT THE CORE AND WIRE LOSSES ON A SYNCHRONOUS GENERATOR**; 10th International Conference on Hydraulic Efficiency Measurement; Itajuba, MG 2014
- [18] **FREESCALE SEMICONDUCTOR**. Technical Data MPX5700, Texas, Estados Unidos, 10/2012.

- [19] Elhadidy MA, Shaahid SM, "**Parametric study of hybrid (wind+ solar + diesel) power generating systems**", Renewable Energy, vol. 21, pp. 129–39, 2000.
- [20] El-Sayes MA, Osman MG, Kaddah SS, "**Assessment of the economic penetration levels of photovoltaic panels, wind turbine generators and storage batteries**", Electric Power System Research, vol. 27, pp. 233-46, 1993.
- [21] Hansen U, "**Technological options for power generation**", The Energy Journal vol. 19, no. 2, pp. 63-87, 1998.
- [22] Bajpai P, Dash V. "**Hybrid renewable energy systems for power generation in stand-alone applications: a review**", Renewable and Sustainable Energy Reviews vol. 16, pp. 292-39, 2012.
- [23] Ribeiro L, Saavedra O, Lima S, Matos J, Bonan G. "**Making isolated renewable energy systems more reliable**", Renewable Energy, vol. 45, pp. 221-31, 2012.
- [24] J.E. Paiva, A.S. Carvalho, "**Controllable hybrid power system based on renewable energy sources for modern electrical grids**", Renewable Energy, vol. 53, pp. 271-79, 2013.
- [25] Sun Z, Zhang X, "Advances on distributed generation technology", Energy Procedia, vol. 17, pp. 32-8, 2012.
- [26] Y-C. Kuo, T-J Liang, J-F Chen, "**Novel Maximum-Power-Point-Tracking Controller for Photovoltaic Energy Conversion System**", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 48, no. 3, pp. 2001
- [27] F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre, A.V. Timbus, "**Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems**", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 53, pp. 1398-1409, Oct. 2006.
- [28] A. Rajapakse, D. Muthumuni, N. Perera, "**Grid integration of renewable energy systems**", Renewable Energy, ISBN: 978-953-7619-52-7.
- [29] Ramirez D, Martinez S, Carrero C, Platero C. **Improvements in the grid connection of renewable generators with full power converters**. Renewable Energy, vol. 43, pp. 90-100, 2012.

[30] DHT11 Humidity & Temperature Sensor **Robotics UK** 30/07/2010
(www.droboticsonline.com) . Acesso em: 9 junho. 2014

[31] **Allegro MicroSystems**, LLC 15115 Northeast Cutoff
Worcester, Massachusetts 01615-0036 U.S.A. 16/11/2012
www.allegromicro.com. Acesso em: 9 junho. 2014