



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL



Instituto de
Pesquisas Hidráulicas

Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

Dissertação de Mestrado

**Viabilidade de geração de energia elétrica através de ondas oceânicas no
litoral norte do Rio Grande do Sul:
estudo de um sistema híbrido de energias renováveis**

Jones Souza da Silva

Porto Alegre
novembro 2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

Dissertação de Mestrado

**Viabilidade de geração de energia elétrica através de ondas oceânicas no
litoral norte do Rio Grande do Sul:
estudo de um sistema híbrido de energias renováveis**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) como requisito parcial para obtenção do título de

**Mestre em Recursos Hídricos e
Saneamento Ambiental.**

Aluno: Jones Souza da Silva - Engenheiro Civil

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Beluco

Banca:	Prof. Dr. Arno Krenzinger	PROMECC/UFRGS
	Prof. Dr. Luiz Augusto Magalhães Endres	IPH/UFRGS
	Prof. Dr. Luiz Emílio de Sá Brito de Almeida	IPH/UFRGS

Porto Alegre, 09 de novembro de 2012.

Dedico este trabalho
aos meus **pais**.

AGRADECIMENTOS

Quero aqui demonstrar minha gratidão aos meus maravilhosos pais, Nildo e Pulcina, por terem me dado o direito à vida. À minha mãe, uma pessoa de uma energia incrível, de uma sabedoria exemplar, que sempre me incentivou a buscar o melhor para a vida, e que me ensinou que tudo o que realmente merecemos é possível de se obter. Ao meu pai, por sua simplicidade, paciência e, principalmente, por sua alegria de viver.

À minha família em geral e aos meus irmãos Jorge, Jairo e Jesus, obrigado pela companhia e apoio. Agradeço à minha cunhada Débora, que sempre me incentivou muito a lutar e estudar.

Aos meus colegas e amigos Maria Cristina, André, Dani, Lário, Felipe, Alice, Viviane, Lauro, Josiane, Laísa e Lenise. Valeu pela troca de materiais, ideias, conhecimentos e brincadeiras. Nunca me esquecerei das nossas festas!

À minha grande amiga Tirzah, que sempre me incentivou a continuar meus estudos no Doutorado, pela sabedoria transmitida e pela amizade verdadeira.

Aos meus amigos em geral, especialmente à Andréia, à Susane, à Priscila, ao Querino e ao Fernando Telles, os quais estiveram ao meu lado em momentos marcantes dessa caminhada.

Ao meu amigo Nelson Sonntag (*in memoriam*), que também me inspirou muito desde a seleção do mestrado. Uma amizade que merece ser destacada e lembrada!

A toda galera do vôlei do Parcão de Canoas... Valeu galera!!!

Aos meus amigos da Prefeitura Municipal de Canoas. Um agradecimento especial à Lena Mazzotti, que foi a pessoa que mais me incentivou a trocar a estabilidade de um emprego público pela busca de novos conhecimentos.

Aos técnicos do Laboratório de Tecnologias Ambientais do IPH, conhecido como Laboratório do Saneamento, especialmente às funcionárias Susan, Vera e Mara, que sempre me ajudaram muito durante a fase das disciplinas.

Aos funcionários da Secretaria do PPG do IPH, Leonardo e Maurício, muito obrigado pela atenção que sempre recebi e pela agilidade no atendimento.

Às bibliotecárias do IPH, que sempre me atenderam com muita educação.

Aos professores do IPH, que contribuíram para o meu crescimento acadêmico.

Ao professor Luiz Emílio, meu muito obrigado pela grande receptividade, pela sabedoria, pela atenção e pelos dados de onda de Tramandaí fornecidos, com os quais consegui elaborar um estudo de maior qualidade.

Ao professor Endres, muito obrigado por acreditar no meu trabalho, pelo incentivo, e por todas as sugestões, as quais tornaram este trabalho mais organizado e objetivo.

À equipe do LABGEO/UFRGS, especialmente ao professor Hasenack, o qual sempre estive à disposição e que muito me inspirou neste trabalho.

À CEEE, pela receptividade e pelo fornecimento dos dados da demanda energética da porção norte do litoral do Rio Grande do Sul. Agradeço ao Diego, e também ao meu amigo Cássio, pelo ótimo atendimento e pela força visando ao estreitamento das relações entre o IPH e a CEEE.

À *HOMER ENERGY*, pela disponibilização do programa *HOMER* e pelo excelente suporte recebido. *Thank you very much!*

Ao meu orientador, Alexandre Beluco, meu muito obrigado pela excelente orientação, pela atenção e tempo dedicados a este trabalho, por responder aos e-mails de forma muito ágil, pela confiança depositada em minha pessoa e pela amizade.

Aos ensinos públicos e gratuitos que tive acesso - municipal, estadual e federal -, sem os quais eu jamais teria chegado até aqui.

A Deus, que sempre me transmitiu força e equilíbrio necessários para as grandes decisões e transformações da vida.

*Procure ser um homem de valor
em vez de ser um homem de sucesso.*

Albert Einstein

RESUMO

As energias renováveis vêm ocupando parcelas cada vez maiores das matrizes energéticas dos principais países do mundo, devido aos custos e impactos da exploração de combustíveis fósseis, e à necessidade de ampliação dos suprimentos de energia. Atualmente, as energias hidrelétrica, eólica e solar apresentam viabilidade técnica e econômica para uma grande quantidade de aplicações, com desenvolvimento tecnológico em alto nível de maturidade. A energia de ondas oceânicas ainda exige investimentos razoáveis para se tornar uma alternativa viável para fornecimento de energia elétrica, e vem sendo alvo de projetos para prospecção de potenciais e para desenvolvimento de tecnologias para conversão de energia. Neste estudo, chegou-se ao valor médio anual de 12 kW por metro de frente de onda como estimativa do potencial energético das ondas oceânicas do litoral norte do Rio Grande do Sul (RS). Esse valor é considerado razoável se comparado a potenciais em outros locais do mundo, e pode representar um acréscimo interessante de suprimentos de energia ao sistema energético local, que se mostra bastante receptivo aos recursos renováveis. Este trabalho tem como objetivo avaliar, em nível de pré-viabilidade, a inserção de suprimentos de energia de ondas no sistema interligado do litoral norte do RS, com base em simulações computacionais realizadas com o *software HOMER*, desenvolvido especialmente para otimização de sistemas de geração de energia baseados em recursos renováveis. Os resultados obtidos sugerem que empreendimentos para aproveitamento de energia de ondas atinjam viabilidade econômica quando seus custos específicos se tornarem pelo menos iguais ao dobro dos custos específicos associados aos aproveitamentos eólicos.

Palavras-chave: Energia de ondas oceânicas; Energias renováveis; Viabilidade.

ABSTRACT

Renewable energies are increasingly occupying larger areas of the power generation matrices in major countries in the world, because of the costs and impacts of the fossil fuels exploitation, and because of the need to increase energy supplies. Currently, hydro, wind and solar energies present technical and economic feasibility for a lot of applications, with technological development at a high level of maturity. The wave energy still requires reasonable investment to become a viable alternative for electric energy supply, and has been the target for research projects about locations of potential energy and for development of power conversion technologies. The potential of the coast of Rio Grande do Sul (RS) has already been estimated and presents an annual average around 12 kW per meter of wave front. This value is considered reasonable compared to other potential sites in the world, and may represent an interesting addition to the energy supply of the local energy system, which shows a great receptivity to renewable resources. This study aims to assess, in pre-feasibility level, the insertion of wave energy supplies in the interconnected system of the northern coast of RS, based on computer simulations performed with the software *HOMER*, specially developed for optimization of power generation systems based on renewable resources. The results suggest that projects for harnessing wave energy reach economic feasibility when their specific costs become at least twice the specific costs associated with wind farms.

Keywords: Ocean wave energy; Renewable energies; Feasibility.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diferenças entre os suprimentos renováveis e não renováveis.	18
Figura 2: Distribuição do fluxo médio de energia das ondas no mundo em kW/m.	19
Figura 3: Percentuais da oferta de energia por fonte no Mundo em 2008.....	20
Figura 4: Oferta interna de energia elétrica por fonte no Brasil em 2010.	20
Figura 5: Localização geográfica dos municípios da porção norte do litoral do RS.....	25
Figura 6: Formação de ondas oceânicas através de uma tempestade.....	26
Figura 7: Interação entre as ondas e o fundo do mar com a aproximação à costa.	27
Figura 8: Classificação das ondas quanto à profundidade relativa.....	28
Figura 9: Descrição de uma onda senoidal.	28
Figura 10: Esquema de definição para determinação da energia potencial.....	29
Figura 11: Esquema de funcionamento de uma coluna de água oscilante.	35
Figura 12: Conversor de energia das ondas desenvolvido pelo Laboratório de Tecnologia Submarina (LTS) da COPPE - princípio de funcionamento.	36
Figura 13: Dispositivo <i>OSPREY I</i> sendo rebocado - Escócia.	37
Figura 14: Conversor oscilante de translação de ondas.....	37
Figura 15: Esquema de funcionamento do dispositivo <i>AWS</i>	38
Figura 16: Vistas lateral e superior do dispositivo <i>Pelamis</i>	38
Figura 17: Esquema de funcionamento do dispositivo <i>Wave Dragon</i>	39
Figura 18: Médias anual e sazonais do potencial energético de ondas para o litoral do RS. ...	41
Figura 19: Médias mensais do potencial energético de ondas para o litoral do RS.	42
Figura 20: Média anual do potencial energético de ondas para o litoral brasileiro (em kW/m).	42
Figura 21: Relação conceitual entre simulação, otimização e análise de sensibilidade.	45
Figura 22: Exemplo de curva de potência de uma turbina eólica e demonstração de como é encontrada a potência de saída da turbina.	49
Figura 23: Taxa de massa específica do ar segundo a altitude local.	52
Figura 24: Esquema do sistema de energia adotado.....	58
Figura 25: Sistema fotovoltaico conectado à rede.....	59
Figura 26: Vista parcial dos Parques Eólicos de Osório.	62
Figura 27: Aerogerador utilizado nos Parques Eólicos de Osório.....	62

Figura 28: Configuração básica de uma turbina eólica de eixo horizontal.	63
Figura 29: Curva de potência da turbina eólica modelo E-70 E4 segundo catálogo da fabricante ENERCON (potência máxima modificada para 2 MW).	63
Figura 30: Usina (protótipo) de conversão das ondas oceânicas desenvolvida pela COPPE/UFRJ e implantada no Porto de Pecém, no município de São Gonçalo do Amarante/CE.	65
Figura 31: Radiação solar incidente sobre uma superfície plana, segundo a latitude local para cada hora do ano, obtida diretamente através do programa <i>HOMER</i>	67
Figura 32: Médias mensais da radiação solar incidente sobre uma superfície plana, segundo a latitude local, calculadas através do programa <i>HOMER</i>	67
Figura 33: Comparação sazonal da velocidade média do vento medida em Mostardas (ajustada para a altura de 100 m) com a velocidade média do vento para uma altura de 100 m encontrada para a cidade de Osório através do Atlas Eólico do RS.	70
Figura 34: Série horária anual sintética da velocidade do vento para a região de Mostardas, para uma altura de 100m, obtida através do programa <i>HOMER</i>	71
Figura 35: Médias mensais da velocidade do vento, obtidas através da série horária sintética para uma altura de 100m, calculadas através do programa <i>HOMER</i>	71
Figura 36: Série horária das vazões obtidas através da altura significativa (H_s) e do período de energia (T_e) das ondas oceânicas da região de Tramandaí/RS para o ano de 2009.	74
Figura 37: Vazões médias, máximas e mínimas mensais obtidas através da altura significativa (H_s) e do período de energia (T_e) das ondas oceânicas da região de Tramandaí/RS.	75
Figura 38: Demanda elétrica horária do litoral norte do RS para o ano de 2011.	76
Figura 39: Médias mensais da demanda elétrica do litoral norte do RS para o ano de 2011.	76
Figura 40: Demanda elétrica do litoral norte segundo as estações do ano de 2011.	77
Figura 41: Médias mensais do potencial energético das ondas do mar para o litoral norte do RS.	78
Figura 42: Médias sazonais da altura significativa das ondas do mar para o litoral norte do RS.	79
Figura 43: Médias sazonais do período de energia das ondas do mar para o litoral norte do RS.	80
Figura 44: Médias sazonais do potencial energético das ondas do mar para o litoral norte do RS.	80

Figura 45: Resultados de simulação do sistema em estudo, com valor inicial do custo dos painéis fotovoltaicos (PVs) fixado em R\$ 10,00/W.....	82
Figura 46: Combinação dos sistemas possíveis, ordenados pelo CTPL, referente ao seguinte ponto da Figura 45: eficiência da usina de ondas de 40% e custo de US\$ 944.827.586,00.....	83
Figura 47: Resultados de simulação do sistema em estudo - custo dos PVs: R\$ 4,50/W.....	84
Figura 48: Resultados de simulação do sistema em estudo - com custo dos PVs: R\$ 4,00/W.....	84
Figura 49: Resultados de simulação do sistema em estudo - custo dos PVs: R\$ 3,50/W.....	84
Figura 50: Resultados de simulação do sistema em estudo - custo dos PVs: R\$ 3,00/W.....	85
Figura 51: Valores do custo médio de energia do sistema em estudo - custo dos PVs: R\$ 3,00/W.....	85
Figura 52: Resultados da análise de sensibilidade da potência da usina de ondas (E = 40%).....	87
Figura 53: Resultados da análise de sensibilidade da potência da usina de ondas (E = 30%).....	87
Figura 54: Resultados da análise de sensibilidade da potência da usina de ondas (E = 20%).....	87
Figura 55: Resultados da análise de sensibilidade da potência da usina de ondas (E = 40%) para um custo com os PVs de R\$ 4,50/W.....	88
Figura 56: Resultados da análise de sensibilidade da potência da usina de ondas (E = 40%) para um custo com os PVs de R\$ 3,00/W.....	88
Figura 57: Resultados da análise de sensibilidade da potência da usina de ondas (E = 30%) para um custo com os PVs de R\$ 4,50/W.....	89
Figura 58: Resultados da análise de sensibilidade da potência da usina de ondas (E = 30%) para um custo com os PVs de R\$ 3,50/W.....	89
Figura 59: Resultados da análise de sensibilidade da potência da usina de ondas (E = 30%) para um custo com os PVs de R\$ 3,00/W.....	90
Figura 60: Resultados da análise de sensibilidade da potência da usina de ondas (E = 20%) para um custo com os PVs de R\$ 4,50/W.....	90
Figura 61: Resultados da análise de sensibilidade da potência da usina de ondas (E = 20%) para um custo com os PVs de R\$ 4,00/W.....	91
Figura 62: Resultados da análise de sensibilidade da potência da usina de ondas (E = 20%) para um custo com os PVs de R\$ 3,50/W.....	91
Figura 63: Resultados da análise de sensibilidade da velocidade do vento (E = 40%).....	93
Figura 64: Resultados da análise de sensibilidade da velocidade do vento (E = 30%).....	93
Figura 65: Resultados da análise de sensibilidade da velocidade do vento (E = 20%).....	93

Figura 66: Resultados da análise de sensibilidade da velocidade do vento (E = 40%) para um custo com os PVs de R\$ 4,50/W.	94
Figura 67: Resultados da análise de sensibilidade da velocidade do vento (E = 40%) para um custo com os PVs de R\$ 4,00/W.	94
Figura 68: Resultados da análise de sensibilidade da velocidade do vento (E = 40%) para um custo com os PVs de R\$ 3,50/W.	95
Figura 69: Resultados da análise de sensibilidade da velocidade do vento (E = 40%) para um custo com os PVs de R\$ 3,00/W.	95
Figura 70: Resultados da análise de sensibilidade da velocidade do vento (E = 40%) para um custo com os PVs de R\$ 2,50/W.	96
Figura 71: Resultados da análise de sensibilidade da velocidade do vento (E = 30%) para um custo com os PVs de R\$ 4,50/W.	96
Figura 72: Resultados da análise de sensibilidade da velocidade do vento (E = 30%) para um custo com os PVs de R\$ 4,00/W.	97
Figura 73: Resultados da análise de sensibilidade da velocidade do vento (E = 30%) para um custo com os PVs de R\$ 3,50/W.	97
Figura 74: Resultados da análise de sensibilidade da velocidade do vento (E = 30%) para um custo com os PVs de R\$ 3,00/W.	98
Figura 75: Resultados da análise de sensibilidade da velocidade do vento (E = 20%) para um custo com os PVs de R\$ 4,50/W.	98
Figura 76: Resultados da análise de sensibilidade da velocidade do vento (E = 20%) para um custo com os PVs de R\$ 4,00/W.	99
Figura 77: Resultados da análise de sensibilidade da velocidade do vento (E = 20%) para um custo com os PVs de R\$ 3,50/W.	99
Figura 78: Resultados da análise de sensibilidade da velocidade do vento (E = 20%) para um custo com os PVs de R\$ 3,00/W.	100
Figura 79: Resultados de simulação do sistema em estudo, com valor inicial do custo dos PVs fixado em R\$ 10,00/W e custo da energia da rede de distribuição de R\$ 0,20/kWh.	101
Figura 80: Resultados de simulação do sistema em estudo, com custo dos PVs de R\$ 2,00/W e custo da energia da rede de distribuição de R\$ 0,20/kWh.	101
Figura 81: Valores do custo médio de energia do sistema em estudo - custo dos PVs: R\$ 2,00/W.	102

Figura 82: Resultados da análise de sensibilidade do potencial da usina de ondas (E = 40%) com custo da energia da rede de distribuição de R\$ 0,20/kWh.....	102
Figura 83: Resultados da análise de sensibilidade do potencial da usina de ondas (E = 30%) com custo da energia da rede de distribuição de R\$ 0,20/kWh.....	103
Figura 84: Resultados da análise de sensibilidade do potencial da usina de ondas (E = 20%) com custo da energia da rede de distribuição de R\$ 0,20/kWh.....	103
Figura 85: Resultados da análise de sensibilidade da velocidade do vento (E = 40%) com custo da energia da rede de distribuição de R\$ 0,20/kWh.	104
Figura 86: Resultados da análise de sensibilidade da velocidade do vento (E = 30%) com custo da energia da rede de distribuição de R\$ 0,20/kWh.	104
Figura 87: Resultados da análise de sensibilidade da velocidade do vento (E = 20%) com custo da energia da rede de distribuição de R\$ 0,20/kWh.	105
Figura 88: Resultados de simulação do sistema em estudo, com valor inicial do custo dos PVs fixado em R\$ 10,00/W e custo da energia da rede de distribuição de R\$ 0,10/kWh.	106
Figura 89: Resultados de simulação do sistema em estudo, com custo dos PVs de R\$ 2,00/W e custo da energia da rede de distribuição de R\$ 0,10/kWh.....	106
Figura 90: Valores do custo médio de energia do sistema em estudo - custo dos PVs: R\$ 1,00/W.	107
Figura 91: Resultados da análise de sensibilidade do potencial da usina de ondas (E = 40%) com custo da energia da rede de distribuição de R\$ 0,10/kWh.....	107
Figura 92: Resultados da análise de sensibilidade do potencial da usina de ondas (E = 30%) com custo da energia da rede de distribuição de R\$ 0,10/kWh.....	108
Figura 93: Resultados da análise de sensibilidade do potencial da usina de ondas (E = 20%) com custo da energia da rede de distribuição de R\$ 0,10/kWh.....	108
Figura 94: Resultados da análise de sensibilidade da velocidade do vento (E = 40%) com custo da energia da rede de distribuição de R\$ 0,10/kWh.	109
Figura 95: Resultados da análise de sensibilidade da velocidade do vento (E = 30%) com custo da energia da rede de distribuição de R\$ 0,10/kWh.	109
Figura 96: Resultados da análise de sensibilidade da velocidade do vento (E = 20%) com custo da energia da rede de distribuição de R\$ 0,10/kWh.	110
Figura 97: Sugestão de localização da usina de ondas.	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Empreendimentos em Operação no RS.....	21
Tabela 2: Empreendimentos em Construção no RS.....	21
Tabela 3: Empreendimentos Outorgados entre 1998 e 2004.....	21
Tabela 4: População dos municípios do litoral norte do RS.....	24
Tabela 5: Valores médios mensais de altura significativa, período de energia e potência.....	40
Tabela 6: Valores médios sazonais de altura significativa, período de energia e potência.....	40
Tabela 7: Características do aerogerador.....	62
Tabela 8: Valores médios mensais da velocidade do vento medidos a uma altura de 50 m, e valores médios mensais da velocidade do vento calculados para a altura de 100 m.....	69
Tabela 9: Velocidades médias do vento para as regiões de Mostardas e de Osório segundo as estações do ano.....	70
Tabela 10: Média sazonal da demanda do litoral norte segundo as estações do ano de 2011.	77
Tabela 11: Médias sazonais das alturas significativas (H_s), dos períodos de energia (T_e) e do potencial energético (P) das ondas do mar para o litoral norte do RS.....	79
Tabela 12: Resultados principais do limite de viabilidade da usina de ondas.....	110

LISTA DE SIGLAS

AC: *Alternating Current* (Corrente Alternada)

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

AWS: *Arquimedes Wave Swing*

CEEE-D: Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica

CIENTEC: Fundação de Ciência e Tecnologia

CNTP: Condições Normais de Temperatura e Pressão

COPPE: Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia

CPT: Condições Padrão de Teste

CPTEC: Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

DC: *Direct Current* (Corrente Contínua)

FURG: Fundação Universidade do Rio Grande

IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INPC: Índice Nacional de Preços ao Consumidor

INPE: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

INPH: Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias

IPH: Instituto de Pesquisas Hidráulicas

NASA: *National Aeronautics and Space Administration* (Administração Nacional da Aeronáutica e do Espaço)

NOAA: *National Oceanic and Atmospheric Administration* (Administração Nacional Oceânica e Atmosférica)

NREL: *U.S. National Renewable Energy Laboratory* (Laboratório Nacional de Energias Renováveis dos EU)

OWC: *Oscillating Water Column*

OWSC: *Oscillating Wave Surge Converter*

PROMEC: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

PV: *Photovoltaic* (Fotovoltaico)

SFCR: Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede

SI: Sistema Internacional de Unidades

SIN: Sistema Interligado Nacional

tep: tonelada equivalente de petróleo

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1. Objetivo do trabalho	22
1.2. Objetivos específicos	22
1.3. Hipótese	22
1.4. Metodologia geral e organização do trabalho.....	23
1.5. Área de estudo	24
2. ENERGIA DE ONDAS E POTENCIAIS DO RS E DO BRASIL.....	26
2.1. Energia de ondas oceânicas	26
2.1.1. Energia Potencial	29
2.1.2. Energia Cinética	30
2.1.3. Energia Total	31
2.1.4. Potência ou fluxo de energia	32
2.2. Tecnologias existentes	34
2.2.1. Dispositivos costeiros:	35
2.2.2. Dispositivos próximos da costa:	36
2.2.3. Dispositivos afastados da costa:	37
2.3. Estudos já realizados do potencial disponível no litoral do RS e no litoral do Brasil...	39
3. O PROGRAMA <i>HOMER</i>	43
3.1. A utilização e o funcionamento do programa.....	44
3.2. Equações utilizadas para cálculo da potência.....	46
3.2.1. Cálculo da potência de saída do PV	46
3.2.2. Cálculo da potência de saída da turbina eólica.....	47
3.2.3. Cálculo da potência de saída da turbina hidráulica	52
3.3. Modelagem econômica.....	53
3.4. Aplicação com o <i>HOMER</i>	57
4. EQUIPAMENTOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA	58
4.1. Sistema de energia projetado	58
4.1.1 Painéis Fotovoltaicos	59
4.1.2 Usina Eólica.....	61
4.1.3 Usina de aproveitamento de Ondas Oceânicas.....	64

5. RECURSOS ENERGÉTICOS E DEMANDA DO LITORAL NORTE.....	66
5.1. Recursos energéticos	66
5.1.1. Radiação Solar	66
5.1.2. Vento	68
5.1.3. Ondas Oceânicas.....	72
5.2. Demanda elétrica do litoral norte do RS	75
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	78
6.1. Resultados do potencial energético do recurso de ondas para o litoral do RS	78
6.2. Resultados das simulações computacionais	80
6.2.1. Resultados com custo da energia da rede de distribuição de R\$ 0,30/kWh	81
6.2.2. Resultados com custo da energia da rede de distribuição de R\$ 0,20/kWh	100
6.2.3. Resultados com custo da energia da rede de distribuição de R\$ 0,10/kWh	105
6.2.4. Principais resultados do limite de viabilidade da usina de ondas segundo o custo da energia da rede de distribuição	110
6.2.5. Sugestão de localização da usina de ondas.....	111
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	112
8. REFERÊNCIAS	114

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda de energia elétrica mundial, aliada às questões ambientais, e ao futuro esgotamento das reservas de petróleo, despertou o mundo no que diz respeito à busca por fontes de produção de energia que causem um menor impacto ambiental. Diversos estudos envolvendo as chamadas energias renováveis estão sendo realizados no intuito de desenvolvimento de tecnologias sustentáveis.

De modo geral, tecnologias energéticas sustentáveis são tecnologias cuidadosa e cientificamente desenvolvidas, modernas, com qualidade, e que realmente minimizam o impacto ambiental negativo, como desmatamento, emissões de gases nocivos e agressões à fauna. São tecnologias que possuem eficiência energética, que atingem o maior número de pessoas possível - o ideal seriam todas -, enfim, são tecnologias que propiciam um desenvolvimento econômico, ambiental e social equilibrado, de forma a garantir uma vida digna e em harmonia para todas as gerações humanas.

O termo energia limpa é utilizado para designar energias geradas a partir de tecnologias que não causam poluição, ou seja, que não geram resíduos e, principalmente, gases como dióxido de carbono (CO_2), óxido nitroso (N_2O) e metano (CH_4), que, segundo alguns especialistas¹, são grandes causadores do aquecimento global. Na prática, são tecnologias que geram menos poluição. Os exemplos mais comuns são as tecnologias de geração de energia solar, eólica e hidráulica.

Segundo Beluco *et al.* (2003), a utilização das energias renováveis torna-se ainda mais atraente do ponto de vista da *complementariedade*. As disponibilidades energéticas de uma ou mais fontes podem se complementar ao longo de uma região (*complementariedade* no espaço), ou podem apresentar períodos em que se complementam ao longo do tempo em uma mesma região (*complementariedade* no tempo). A palavra *complementariedade* (ou *complementaridade*) pode ser interpretada, portanto, como a capacidade para servir de complemento, e a expressão *complementariedade energética* como a capacidade de uma ou mais fontes de apresentarem disponibilidades energéticas complementares no tempo, no espaço ou em ambos.

¹ Conforme Assad (2012), a ação antrópica vem provocando o aquecimento da atmosfera terrestre. Porém, os modelos existentes ainda apresentam incertezas que não permitem afirmar categoricamente o valor absoluto do aumento da temperatura no planeta.

Em determinadas regiões, por exemplo, períodos de seca podem diminuir e até mesmo comprometer a energia gerada por hidrelétricas. Porém, nessas mesmas regiões, pode haver uma abundância de ventos. Portanto, a utilização da energia eólica pode suprir essa diminuição da oferta energética. Esses sistemas formados por mais de uma fonte de energia são chamados de sistemas híbridos de energia, e o seu estudo é extremamente importante devido a esse fato de que a falta de uma fonte pode ser suprida pela abundância de outra.

Segundo Twidell e Weir (2006), a energia renovável é obtida através de fluxos contínuos e inesgotáveis de energia que ocorrem no meio ambiente, e energia não renovável é a energia obtida de armazenamentos finitos que existem no meio ambiente e que é liberada através da atuação humana. A Figura 1 apresenta um esquema que ilustra tais definições.

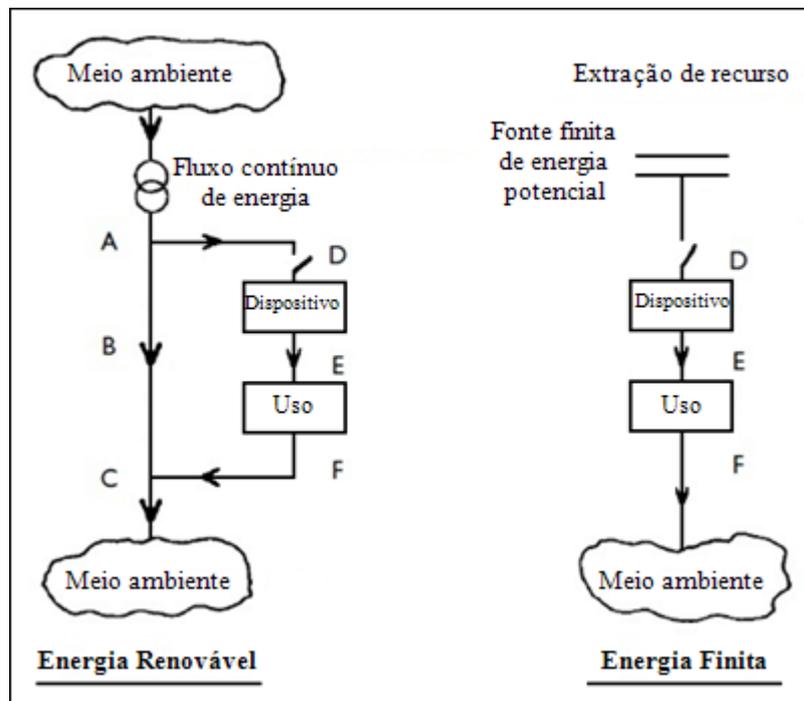


Figura 1: Diferenças entre os suprimentos renováveis e não renováveis.
ABC: fluxo de energia no meio ambiente; DEF: energia utilizada pelo homem.
Fonte: Adaptado de Twidell e Weir (2006)

Uma dessas fontes de energias alternativas (não convencionais) é a energia proveniente das ondas do mar, a qual é uma energia renovável e que utiliza uma tecnologia limpa, com um imenso potencial mundial ainda a ser explorado.

A energia das ondas oceânicas contribuiria em mais de 10% da eletricidade mundial produzida se a tecnologia que está sendo desenvolvida atualmente fosse largamente utilizada,

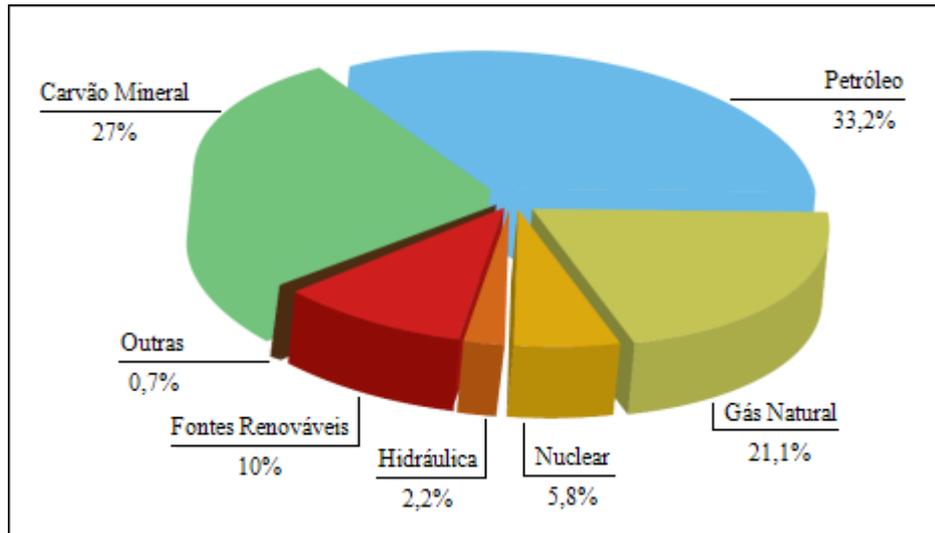


Figura 3: Percentuais da oferta de energia por fonte no Mundo em 2008.
Fonte: Brasil (2011)

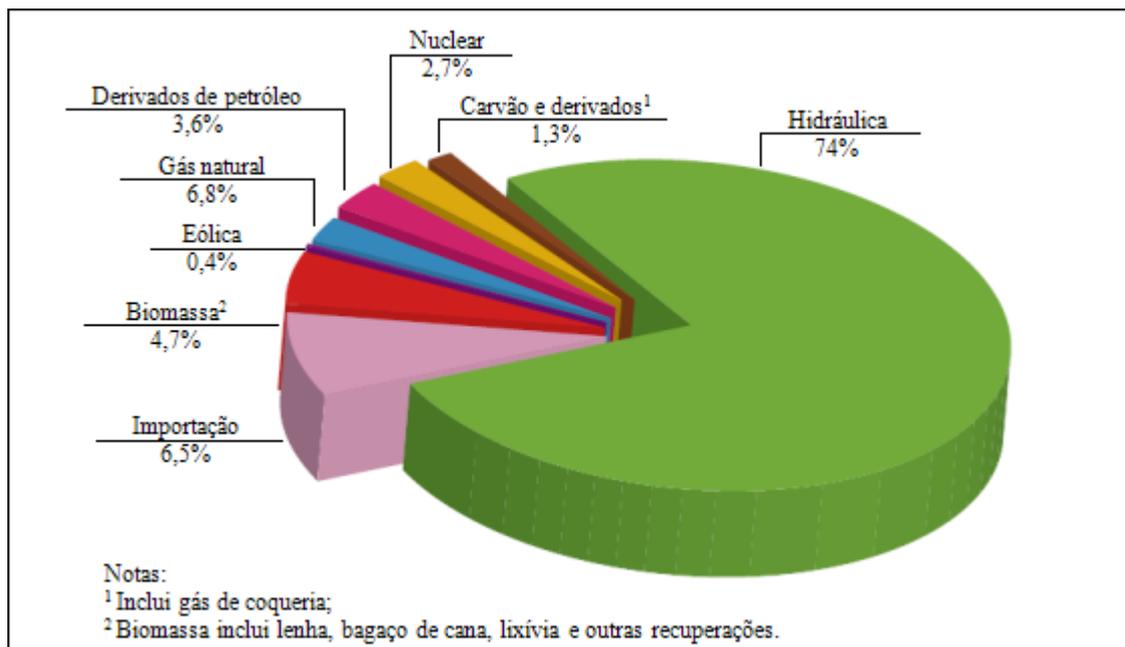


Figura 4: Oferta interna de energia elétrica por fonte no Brasil em 2010.
Fonte: Brasil (2011)

O Brasil é conhecido mundialmente por possuir uma matriz de geração elétrica de origem predominantemente renovável. A oferta interna de energia elétrica do país em 2010 totalizou 545,1 TWh, considerando importações líquidas de 35,9 TWh.

O Estado do Rio Grande do Sul, por sua vez, possui um total de 171 empreendimentos em operação, com uma potência instalada de 8.904.788 kW. Está prevista para os próximos anos uma adição de 3.190.957 kW na capacidade de geração do Estado,

proveniente de 13 empreendimentos atualmente em construção e mais 64 com sua outorga assinada. As Tabelas 1 a 3 a seguir apresentam esses dados detalhadamente (ANEEL, 2012a).

Tabela 1: Empreendimentos em Operação no RS.

Tipo	Quantidade	Potência (kW)	%
CGH	41	27.935	0,31
EOL	12	390.000	4,38
PCH	42	468.947	5,27
UHE	17	5.953.025	66,85
UTE	59	2.064.881	23,19
Total	171	8.904.788	100

Tabela 2: Empreendimentos em Construção no RS.

Tipo	Quantidade	Potência (kW)	%
EOL	5	102.000	52,46
PCH	7	88.626	45,58
UTE	1	3.825	1,97
Total	13	194.451	100

Tabela 3: Empreendimentos³ Outorgados entre 1998 e 2004.

Tipo	Quantidade	Potência (kW)	%
CGH	6	3.410	0,11
EOL	41	937.100	31,27
PCH	10	153.008	5,11
UHE	1	292.000	9,74
UTE	6	1.610.988	53,76
Total	64	2.996.506	100

Legenda:

CGH: Central Geradora Hidrelétrica (até 1.000 kW)

PCH: Pequena Central Hidrelétrica (de 1.000 até 30.000 kW)

UHE: Usina Hidrelétrica de Energia (acima de 30.000 kW)

EOL: Central Geradora Eolielétrica

UTE: Usina Termelétrica de Energia

³ Até Out/2012, a construção desses empreendimentos ainda não tinha sido iniciada.

1.1. Objetivo do trabalho

O objetivo deste trabalho é avaliar em nível de pré-viabilidade a geração de energia elétrica a partir de ondas oceânicas no litoral norte do RS, através da simulação, com o *software HOMER*, de um sistema híbrido de energia conectado ao Sistema Interligado Nacional (SIN) que garanta o abastecimento de energia para a região em estudo.

O foco deste trabalho está voltado mais à viabilidade de inserção da energia de ondas no sistema do que especificamente em uma tecnologia de conversão de energia de ondas.

1.2. Objetivos específicos

- Obter um modelo simplificado do sistema energético do litoral norte do RS, com o uso do *software HOMER*, aplicável para o desenvolvimento deste trabalho, com a inserção de energia obtida de ondas oceânicas;
- Estabelecer um limite (valores máximos) de custo total de investimento e um intervalo de eficiência para uma usina de ondas para que seja possível inserir energia elétrica obtida através de ondas oceânicas no sistema interligado da região;
- Demonstrar que é viável a geração de energia através de ondas oceânicas com a obtenção de resultados que se mostrem comparáveis a empreendimentos atualmente incentivados pelo governo;
- Simular cenários nos quais a utilização da energia solar fotovoltaica se torne viável, visando à otimização de um sistema híbrido de energia.

1.3. Hipótese

É possível e é viável gerar energia a partir de ondas oceânicas no litoral do Rio Grande do Sul.

O trabalho pretende mostrar que essa hipótese é verdadeira, avaliando, em nível de pré-viabilidade, a inserção de energia obtida de uma usina hipotética de ondas no sistema interligado que abastece a região considerada, e sugerindo em nível de anteprojeto um limite de investimento (valores prováveis máximos de investimento) e local para instalação dessa usina, assim como valores para o custo da energia gerada por todo o sistema híbrido de energia.

1.4. Metodologia geral e organização do trabalho

O trabalho de pesquisa foi totalmente baseado em simulações computacionais realizadas com o software *HOMER*, o qual é detalhado no Capítulo 3. As simulações foram efetuadas com o objetivo de identificar valores de custos de instalação e de eficiência de um dispositivo hipotético de conversão de energia para os quais se torna viável obter suprimentos de energia a partir de ondas oceânicas no litoral norte do RS.

É importante ressaltar que não houve preocupação em identificar alguma tecnologia entre as atualmente disponíveis, ou então em desenvolver uma tecnologia nova que se mostrasse apropriada às condições locais. O trabalho teve foco no estabelecimento de "condições de contorno" que devem ser satisfeitas para a escolha de uma tecnologia de conversão de energia de ondas.

O sistema híbrido de energia considerado neste estudo é composto pelas seguintes tecnologias: painéis fotovoltaicos, turbinas eólicas e usina de aproveitamento da energia de ondas oceânicas. Esses equipamentos de geração de energia estão detalhados no Capítulo 4. Também foi considerada a energia elétrica obtida do Sistema Interligado Nacional.

O sistema simulado reproduz a fazenda eólica do município de Osório, que atende parte da região do litoral norte do RS. Nesse sistema, houve a inserção de uma usina de aproveitamento energético baseada na conversão de energia de ondas oceânicas. Foram efetuadas simulações com várias combinações de variáveis de otimização, que permitiram obter a combinação ótima dessas variáveis. As "condições de contorno" para a viabilidade dessa usina de ondas foram obtidas a partir dos resultados ótimos para as variáveis de sensibilidade.

Foram utilizados os seguintes recursos energéticos neste estudo: radiação solar, vento e ondas do mar, os quais estão descritos detalhadamente no Capítulo 5. Devido aos poucos dados disponíveis na literatura para o caso dos ventos, e também à dificuldade de obtenção de dados através de empresas privadas, foi necessária a construção de uma série sintética para a velocidade do vento.

Os dados da demanda elétrica da área de estudo foram adquiridos junto à Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica (CEEE-D), através da Seção de Planejamento e Desempenho, e também estão detalhados no Capítulo 5.

1.5. Área de estudo

A área de estudo localiza-se na porção norte do litoral do RS, e será tratada neste estudo apenas como litoral norte. O litoral norte possui 365.026 habitantes segundo dados do Censo de 2010 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o que representa, aproximadamente, 3,4% da população do RS. Porém, nos meses de veraneio, que no Rio Grande do Sul se estende de dezembro a março, essa região litorânea pode atingir uma população aproximada de 3 milhões de habitantes, o que representa uma população quase 10 vezes maior. A Tabela 4 apresenta os municípios que integram o litoral norte e a população de cada um deles.

Tabela 4: População dos municípios do litoral norte do RS.

Município	População
1. Arroio do Sal	7.744
2. Balneário Pinhal	10.855
3. Capão da Canoa	42.047
4. Capivari do Sul	3.890
5. Caraá	7.313
6. Cidreira	12.654
7. Dom Pedro de Alcântara	2.550
8. Imbé	17.667
9. Itati	2.589
10. Mampituba	2.997
11. Maquiné	6.908
12. Morrinhos do Sul	3.185
13. Mostardas	12.130
14. Osório	40.941
15. Palmares do Sul	10.971
16. Riozinho	4.327
17. Rolante	19.493
18. Santo Antônio da Patrulha	39.679
19. Tavares	5.351
20. Terra de Areia	9.878
21. Torres	34.646
22. Tramandaí	41.655
23. Três Cachoeiras	10.239
24. Três Forquilhas	2.912
25. Xangri-lá	12.405
TOTAL	365.026

Fonte: IBGE (2012)

A Figura 5 apresenta a localização geográfica dos municípios do litoral norte.



Figura 5: Localização geográfica dos municípios da porção norte do litoral do RS.
Fonte: LABGEO (2012)

2. ENERGIA DE ONDAS E POTENCIAIS DO RS E DO BRASIL

2.1. Energia de ondas oceânicas

Com o aquecimento da superfície da terra, através da radiação solar, há o surgimento dos ventos, que transferem energia para a água através de tensões cisalhantes sobre a superfície do mar, causando a formação e crescimento das ondas (McCORMICK, 1981).

As partículas da água adquirem movimentos circulares/elípticos através de fenômenos de pressão e fricção exercidos pelo vento sobre a água dos oceanos, que à grande escala origina o que se denomina por ondas (AGUIAR, 2008 apud MARTINS, 2009).

Conforme Rodrigues (2005), a combinação de forças devido à gravidade, tensão sobre a superfície do mar e intensidade do vento são os principais fatores de origem das ondas do mar. A Figura 6 ilustra a formação de ondas através de uma tempestade. O tamanho da onda é determinado pela velocidade do vento e pela pista (distância ao longo da qual o vento estimula a formação das ondas) e pela profundidade e topografia do fundo do mar. Para distâncias muito longe da pista, as ondas possuem uma forma regular e o fenômeno é chamado *swell*.

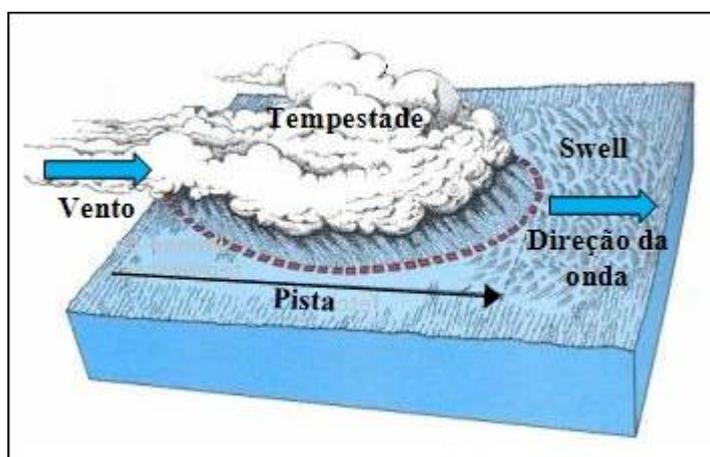


Figura 6: Formação de ondas oceânicas através de uma tempestade.
Fonte: Adaptado de Rodrigues (2005)

A quantidade de energia transferida do vento para a superfície do mar depende da intensidade do vento, do tempo de atuação desse vento e da área sobre a qual ele está atuando. Sendo assim, quanto maior for a velocidade, o tempo e a pista, maior será a onda resultante (TRUJILLO; THURMAN, 2011).

Os mecanismos de transferência de energia do vento para as ondas são complexos. Próximo à superfície, o fluxo turbulento do ar gera uma intensa variação das tensões cisalhantes e do campo de pressões. Quando essas oscilações entram em fase com as ondas já existentes, ocorre uma intensificação no processo de geração das ondas. O vento pode exercer uma ação ainda mais intensa quando as ondas atingem um determinado tamanho, e esse processo pode ainda ser maximizado quando a velocidade do vento e a celeridade da onda forem iguais (COSTA, 2004).

Uma vez criadas no alto mar, as ondas podem viajar milhares de quilômetros praticamente sem perdas de energia. A densidade de energia presente nas ondas em regiões costeiras diminui devido à interação com o fundo do mar (CRUZ; SARMENTO, 2004).

Segundo Trujillo e Thurman (2011), as perdas de energia ocorrem basicamente devido ao atrito da onda com o fundo do mar, quando a profundidade local se torna menor do que metade do comprimento da onda, passando de água profunda a água intermediária até chegar à água rasa. Durante esse trajeto, a onda começa a perder velocidade, seu comprimento passa a diminuir e sua altura a aumentar cada vez mais, tendo como consequência a quebra da onda (Figura 7).

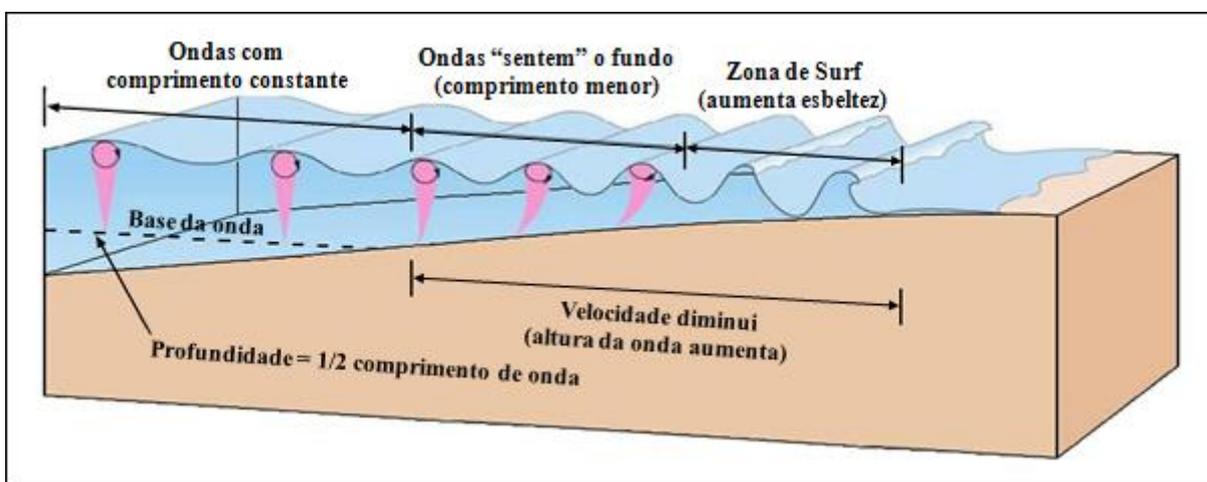


Figura 7: Interação entre as ondas e o fundo do mar com a aproximação à costa.
Fonte: Adaptado de Trujillo e Thurman (2011)

A Figura 8 apresenta as trajetórias das partículas da água segundo a classificação das ondas quanto à profundidade relativa, a qual é a relação entre a profundidade local (h) e o comprimento de onda (L).

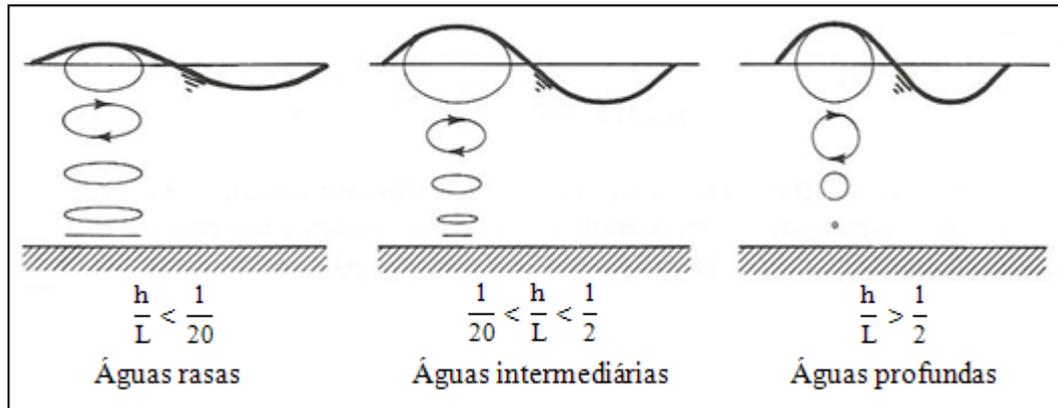


Figura 8: Classificação das ondas quanto à profundidade relativa.
Fonte: Dean e Dalrymple (1991)

As principais características da onda são:

- **Altura de onda (H):** distância vertical entre uma crista e um cavado sucessivos;
- **Comprimento de onda (L):** distância horizontal entre duas cristas consecutivas;
- **Período de onda (T):** intervalo de tempo necessário para uma crista percorrer uma distância igual a um comprimento de onda.

A Figura 9 apresenta a descrição de uma onda senoidal.

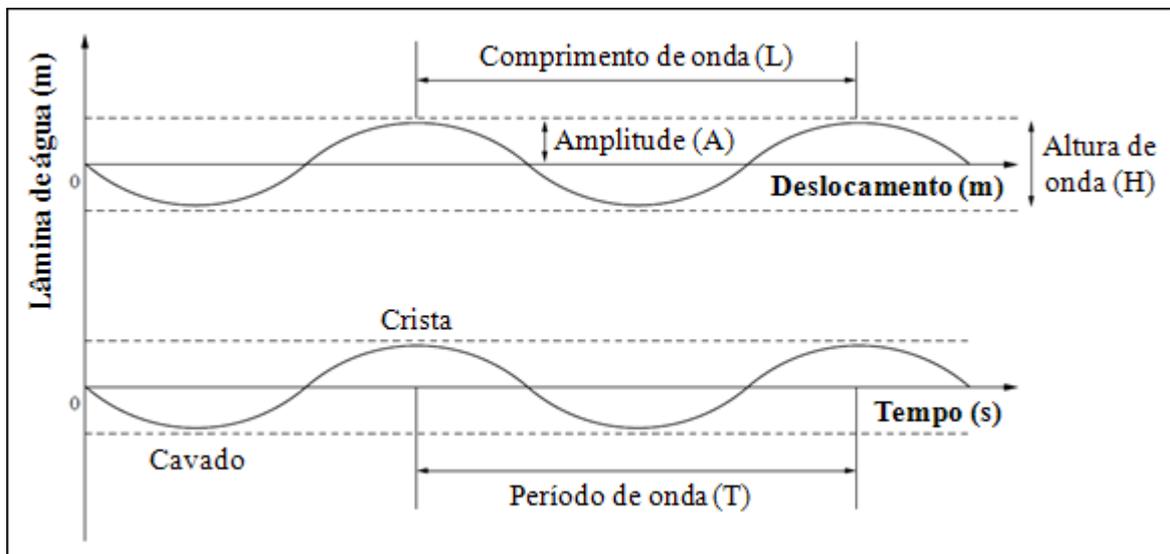


Figura 9: Descrição de uma onda senoidal.
Fonte: Adaptado de Rosa (2008)

Neste estudo serão consideradas as ondas de gravidade superficiais, as quais apresentam o maior conteúdo energético.

A energia total contida em uma onda divide-se em dois tipos: a *energia potencial*, resultante do deslocamento da superfície livre da onda, e a *energia cinética*, resultante do movimento das partículas da água através do fluido. A energia total é importante na determinação de como as ondas se modificam durante sua propagação em direção à costa, da energia necessária para geração de ondas, e da disponibilidade de energia para ser utilizada em dispositivos de conversão de energia das ondas (DEAN; DALRYMPLE, 1991).

2.1.1. Energia Potencial

Conforme Dean e Dalrymple (1991), a energia potencial das ondas é o resultado do deslocamento de uma massa da sua posição de equilíbrio contra um campo gravitacional. Quando a água encontra-se em repouso, sua energia potencial é mínima. Entretanto, a realização de trabalho sobre o sistema provocará o deslocamento das partículas da água e o consequente deslocamento da superfície, o que resulta em um aumento da energia potencial.

A Figura 10 apresenta um esquema para determinação da energia potencial média por unidade de área superficial de uma onda senoidal.

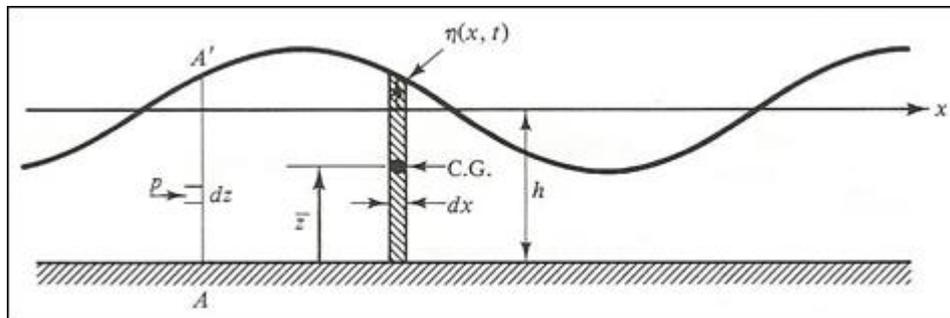


Figura 10: Esquema de definição para determinação da energia potencial.
Fonte: Dean e Dalrymple (1991)

A energia potencial média de uma pequena coluna de fluido com massa dm é dada por (DEAN; DALRYMPLE, 1991):

$$d(E_p) = dm g \bar{z} \quad (1)$$

Na Equação 1, \bar{z} é a altura do centro de gravidade de massa, que é dada através da seguinte equação (onde h é a profundidade local e η a elevação da superfície do mar):

$$\bar{z} = \frac{h + \eta}{2} \quad (2)$$

A massa diferencial por unidade de largura é dada pela Equação 3:

$$dm = \rho (h + \eta) dx \quad (3)$$

A elevação da superfície do mar é dada por (onde o número de onda $k = 2\pi/L$ e a frequência angular $\sigma = 2\pi/T$):

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t) \quad (4)$$

A energia potencial para uma onda progressiva de comprimento L e altura H é dada através da equação abaixo:

$$\begin{aligned} E_P &= \frac{1}{L} \int_x^{x+L} d(E_P) = \frac{1}{L} \int_x^{x+L} \rho g \frac{(h + \eta)^2}{2} dx \\ &= \frac{\rho g}{L} \int_x^{x+L} \left[\frac{1}{2} (h^2 + 2\eta h + \eta^2) \right] dx \\ &= \frac{\rho g}{L} \left(\frac{1}{2} h^2 L + h \int_x^{x+L} \eta dx + \frac{1}{2} \int_x^{x+L} \eta^2 dx \right) \end{aligned} \quad (5)$$

Substituindo η na equação anterior, realizando a devida integração (demonstração em CARVALHO, 2010), chega-se à seguinte equação para a energia potencial:

$$E_P = \frac{1}{16} \rho g H^2 \quad (6)$$

2.1.2. Energia Cinética

A energia cinética associada com uma pequena parcela de fluido de massa dm é dada por (DEAN; DALRYMPLE, 1991):

$$d(E_C) = dm \frac{u^2 + w^2}{2} = \rho \, dx \, dz \frac{u^2 + w^2}{2} \quad (7)$$

Para encontrar a energia cinética por unidade de área superficial, a equação anterior deve ser integrada sobre uma profundidade média e sobre um comprimento de onda. Chega-se, então, à seguinte equação:

$$E_C = \frac{1}{L} \int_x^{x+L} \int_{-h}^{\eta} \rho \frac{u^2 + w^2}{2} \, dz \, dx \quad (8)$$

As velocidades horizontal u e vertical w são dadas pelas equações abaixo:

$$u = \frac{H}{2} \sigma \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh kh} \sin(kx) \sin(\sigma t) \quad (9)$$

$$w = -\frac{H}{2} \sigma \frac{\sinh k(h+z)}{\sinh kh} \cos(kx) \sin(\sigma t) \quad (10)$$

Substituindo u e w na Equação 8, utilizando trigonometria, realizando a integração (demonstração em CARVALHO, 2010), e simplificando alguns campos, chega-se à seguinte equação para a energia cinética:

$$E_C = \frac{1}{16} \rho g H^2 \quad (11)$$

A energia cinética é igual em magnitude à energia potencial, o que é uma característica de sistemas conservativos (não dissipativos) em geral.

2.1.3. Energia Total

A energia total de uma onda por unidade de área superficial é dada pela soma das energias potencial e cinética, conforme a equação a seguir:

$$E = E_P + E_C = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad (12)$$

A energia total por onda por unidade de largura é dada por (onde L é o comprimento de onda):

$$E_L = \frac{1}{8} \rho g H^2 L \quad (13)$$

2.1.4. Potência ou fluxo de energia

Conforme Cornett (2008), a potência, ou fluxo de energia, transmitida por uma onda regular por unidade de largura de crista é dada por:

$$P = \frac{1}{8} \rho g H^2 C_g \quad (14)$$

C_g é a velocidade de grupo, definida como:

$$C_g = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right) \frac{L}{T} \quad (15)$$

O comprimento de onda, a profundidade e o período estão relacionados através da seguinte equação de dispersão:

$$L = T \sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kh)} \quad (16)$$

Em águas profundas ($h > L/2$), em que $C = L/T = 2C_g$ e $L = L_o = gT^2/2\pi$, a potência por unidade de largura de frente de onda é:

$$P_o = \frac{1}{32\pi} \rho g^2 H^2 T \quad (17)$$

O estado de mar real é geralmente descrito como uma soma de um grande número de ondas regulares, as quais possuem diferentes frequências, amplitudes e direções. Essa mistura de frequências, amplitudes e direções é frequentemente descrita pela função densidade

espectral de variância ou pelo espectro de onda 2D $S(f, \theta)$. Nesse caso, a potência transmitida por unidade de comprimento é definida como (CORNETT, 2008):

$$P = \rho g \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} C_g(f, h) S(f, \theta) df d\theta \quad (18)$$

A velocidade de grupo é dada por:

$$C_g = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right) \sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kh)} \quad (19)$$

A potência da onda por unidade de comprimento transmitida por ondas irregulares pode ser aproximada pela seguinte equação:

$$P \approx \frac{\rho g}{16} H_s^2 C_g(T_e, h) \quad (20)$$

O período de energia de um estado de mar pode ser definido em termos de momentos espectrais como:

$$T_e = \frac{m_{-1}}{m_0} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} f^{-1} S(f) df d\theta}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} S(f) df d\theta} \quad (21)$$

Segundo Twidell e Weir (2006), o período de energia T_e é o período das oscilações de potências dominantes e é dado pelo pico no espectro de potência.

A altura significante H_s é definida como (TWIDELL; WEIR, 2006):

$$H_s = 4 a_{\text{rms}} = 4 \left[\left(\sum_{i=1}^n h^2 \right) / n \right]^{1/2} \quad (22)$$

Na Equação 22, a_{rms} é a raiz quadrada da média dos deslocamentos da superfície da água a partir da posição média, calculada a partir de n medições em intervalos de tempo iguais.

Em águas profundas, a expressão aproximada para a potência por unidade de largura de frente de onda é dada por (TWIDELL; WEIR, 2006):

$$P = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_s^2 T_e \quad (23)$$

Substituindo-se a massa específica da água ρ e a aceleração da gravidade g na Equação 23 (1.025 kg/m^3 e $9,81 \text{ m/s}^2$, respectivamente), chega-se à seguinte equação para a potência das ondas oceânicas:

$$P_{\text{ondas}}(\text{kW/m}) = 0,4906 \cdot H_s^2 \cdot T_e \quad (24)$$

Onde:

P_{ondas} : potência transmitida pelas ondas oceânicas (kW/m);

H_s : altura significativa (m);

T_e : período de energia (s).

Pode ser verificada na Equação 24 a importância da altura da onda em seu potencial energético, visto que esse parâmetro se encontra elevado ao quadrado. Portanto, pequenas variações na altura da onda podem impor variações significativas na potência gerada.

2.2. Tecnologias existentes

As tecnologias disponíveis para geração de energia a partir de ondas oceânicas podem ser classificadas conforme sua distância à costa e quanto à tecnologia empregada.

➤ Classificação dos dispositivos quanto à distância à costa (WAVE NET, 2003):

- **Costeiros** (*onshore*): fixos ou incorporados à costa;
- **Próximos da costa** (*nearshore*): profundidades normalmente inferiores a 20m e dispositivos apoiados no fundo do mar;
- **Afastados da costa** (*offshore*): profundidades aproximadas a 50m e dispositivos flutuantes.

➤ **Classificação quanto à tecnologia (ASSIS, 2010):**

- Coluna de água oscilante;
- Corpos flutuantes;
- Dispositivos de galgamento;
- Conversor oscilante de translação de ondas;
- Dispositivos submersos de diferença de pressão;
- Dispositivos com câmara hiperbárica.

A seguir, serão apresentadas as tecnologias mencionadas acima segundo sua distância à costa. Salienta-se que essas tecnologias são apenas algumas das várias tecnologias que estão em desenvolvimento no mundo, e que nenhuma delas se encontra em um estado consolidado (de maturação), ou seja, todas ainda estão sendo testadas e pesquisadas.

2.2.1. Dispositivos costeiros:

- **Dispositivo de coluna de água oscilante - *Oscillating Water Column* - OWC** (Figura 11): quando uma onda entra na estrutura, o ar é forçado a passar por uma turbina devido ao aumento de pressão na câmara de ar. Quando a onda regressa ao mar, o ar passa novamente pela turbina, porém no sentido inverso devido à queda de pressão no interior da câmara de ar. Utilizam-se, normalmente, turbinas do tipo *Wells*. Dois exemplos dessa tecnologia são: a central piloto europeia da ilha de Pico, nos Açores, em Portugal, e a central LIMPET, na ilha de Islay, na Escócia.

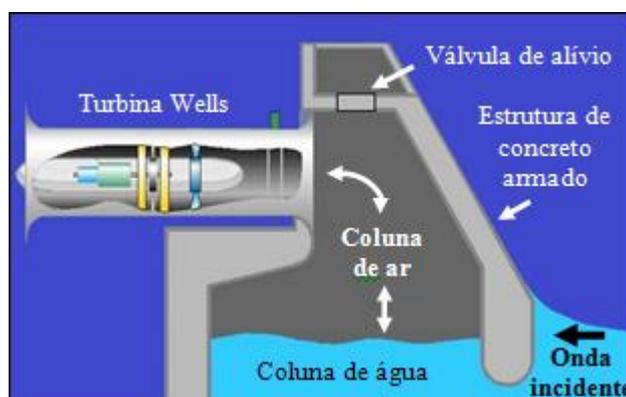


Figura 11: Esquema de funcionamento de uma coluna de água oscilante.

Fonte: Adaptado de Pico (2012)

- **Conversor de energia da COPPE/UFRJ** (Figura 12): dispositivo composto por flutuadores fixados em estruturas horizontais articuladas, que se movimentam como braços de alavanca. Esses braços multiplicam as forças oriundas dos flutuadores acionando bombas hidráulicas, que succionam e comprimem o fluido (água tratada e armazenada em um reservatório na própria instalação), o qual é enviado, através de uma tubulação, para um acumulador hidropneumático interligado a uma câmara hiperbárica. A água que abastece o acumulador é, então, liberada na forma de jato, acionando-se, assim, uma turbina Pelton conectada a um gerador elétrico.

O modelo desenvolvido no Brasil pelo Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE) está representado esquematicamente na Figura 12 através de duas unidades: unidade de conversão primária, a qual é constituída de unidades de bombeamento (a energia das ondas é utilizada no movimento alternado das bombas), e unidade de geração elétrica (ROSA, 2008).

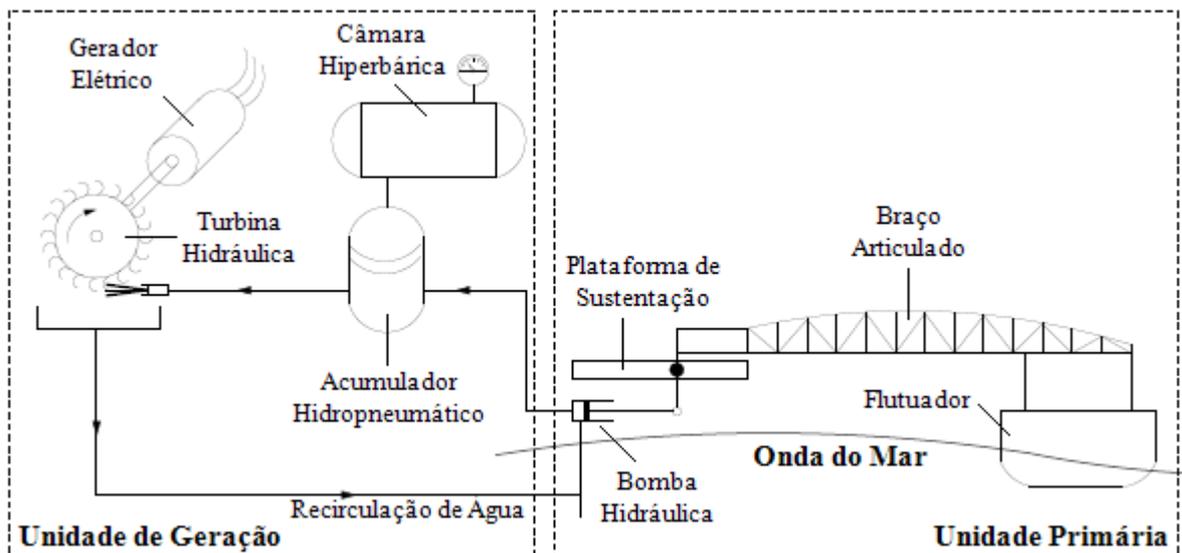


Figura 12: Conversor de energia das ondas desenvolvido pelo Laboratório de Tecnologia Submarina (LTS) da COPPE - princípio de funcionamento.

Fonte: Adaptado de Rosa (2008)

2.2.2. Dispositivos próximos da costa:

- **OSPREY 1** (Figura 13): desenvolvido na Escócia, inicialmente, como sistema de OWC, composto por uma estrutura metálica de parede dupla, que deveria ser rebocada até o local de instalação, onde seria fundeada através do enchimento das paredes ocas com

materiais densos. O projeto foi interrompido devido a um acidente na fase de fundeamento. Nos anos seguintes, o projeto foi retomado com a possibilidade de inclusão de uma turbina eólica.



Figura 13: Dispositivo *OSPREY 1* sendo rebocado - Escócia.
Fonte: *Science Photo* (2012)

- **Conversor oscilante de translação - *Oscillating Wave Surge Converter - OWSC*** (Figura 14): coletores instalados perto da superfície do mar, montados sobre um braço colocado sobre um eixo perto do fundo do mar. A oscilação do braço, provocada pelo movimento das partículas, ocasiona um movimento de translação que é aproveitado para geração de energia.

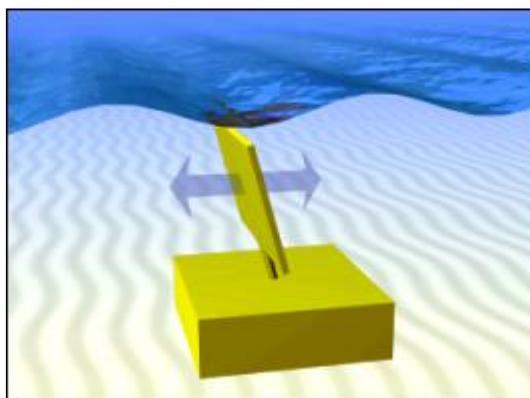


Figura 14: Conversor oscilante de translação de ondas.
Fonte: *Aquaret* (2012)

2.2.3. Dispositivos afastados da costa:

- ***Archimedes Wave Swing - AWS*** (Figura 15): dispositivo cilíndrico, de absorção pontual, desenvolvido na Holanda, completamente submerso, com corpo superior oco

(flutuador) que oscila verticalmente sobre uma base fixa também oca. O interior dos dois corpos é preenchido por ar sob pressão. Na ausência de ondas, a pressão do ar interior produz uma força ascendente sobre o flutuador. Durante a passagem de ondas, a pressão exterior provoca a oscilação vertical do flutuador sobre a base num processo em que o ar interior atua como uma mola pneumática. A energia mecânica gerada é convertida em energia elétrica.

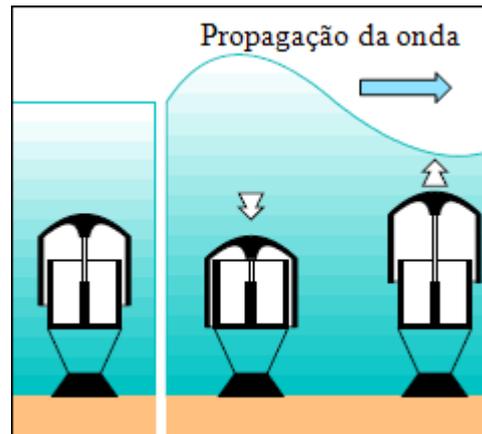


Figura 15: Esquema de funcionamento do dispositivo AWS.
Fonte: Wave Energy Center (2004)

- **Pelamis** (Figura 16): estrutura flutuante composta por vários cilindros horizontais, ligados entre si por articulações, e dispostos segundo a direção de incidência das ondas. O movimento das articulações, provocado pela ondulação, é resistido por cilindros hidráulicos que bombeiam óleo em alta pressão para motores hidráulicos, os quais acionam geradores elétricos. É uma tecnologia desenvolvida na Escócia, e já foi testada em Portugal.

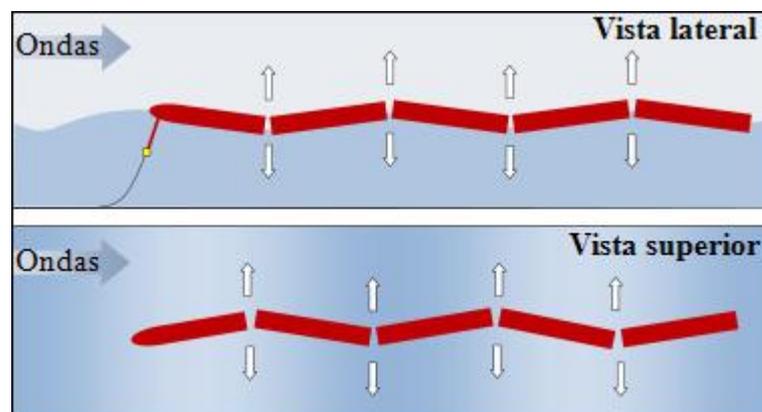


Figura 16: Vistas lateral e superior do dispositivo Pelamis.
Fonte: Adaptado de Pelamis (2012)

- **Wave Dragon** (Figura 17): dispositivo flutuante para aplicação em alto mar, desenvolvido na Dinamarca, composto por uma estrutura metálica. A água é acumulada em um grande reservatório sobrelevado (com nível médio acima do nível médio do mar) através do galgamento das ondas sobre rampas do dispositivo. Ao ser devolvida ao mar, a água passa através de turbinas hidráulicas Kaplan de baixa queda, que acionam geradores elétricos.

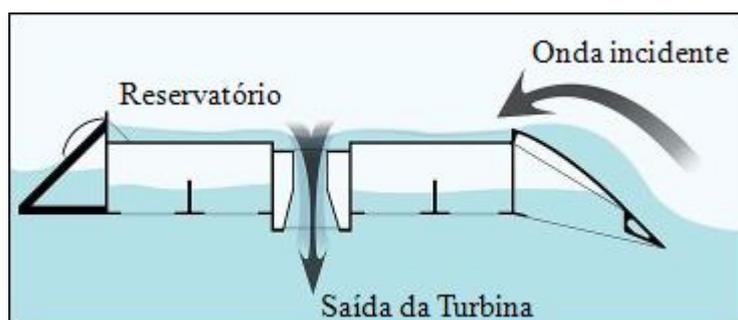


Figura 17: Esquema de funcionamento do dispositivo Wave Dragon.
Fonte: Adaptado de Wave Dragon (2012)

2.3. Estudos já realizados do potencial disponível no litoral do RS e no litoral do Brasil

Este trabalho possui como base a dissertação desenvolvida pelo Engenheiro Mecânico Leandro Eduardo de Assis, o qual realizou um estudo de avaliação e aproveitamento da energia de ondas oceânicas no litoral do estado do RS, o qual está localizado no extremo Sul do Brasil, no Hemisfério Sul.

Os dados utilizados no estudo de Assis (2010) possuem origem em um monitoramento do clima ondulatório da região de Rio Grande realizado por Strauch (1999), mais especificamente nas proximidades da desembocadura da Lagoa dos Patos, no período de outubro de 1996 a junho de 1999, através do fundeio de um ondógrafo direcional (bóia) do tipo Waverider nas coordenadas 32°10'S e 51°58'W e na batimetria de 15 m.

Os dados coletados pelo ondógrafo eram enviados via rádio para uma antena e repassados para um receptor que transcodificava o sinal e o enviava para um computador destinado à aquisição dos dados, os quais, então, recebiam um tratamento estatístico gerando as seguintes informações relativas às ondas da região: direção de propagação, altura significativa, período de pico e energia de pico.

Conforme Strauch *et al.* (2009), a pesquisa realizada entre 1996 e 1999 teve o objetivo de subsidiar o projeto de recuperação do molhe leste da barra, e foi realizada através

de uma parceria entre a Fundação Universidade do Rio Grande (FURG), e o Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias (INPH).

Através da Equação 24, e dos seguintes parâmetros descritivos do clima ondulatório da região de Rio Grande: altura significativa (H_s) e período de energia (T_e), foi possível a avaliação do potencial energético do litoral do RS. Os resultados encontrados foram os seguintes (ASSIS, 2010):

- O mês de maio foi o que apresentou o maior resultado do recurso energético de ondas, ou seja, uma média de 14,2 kW por metro de frente de onda. O mês de janeiro apresentou a menor média: 4,02 kW/m. A Tabela 5 apresenta os valores médios mensais encontrados para altura significativa, período de energia e potência.

Tabela 5: Valores médios mensais de altura significativa, período de energia e potência.

Meses	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
H_s (m)	1,23	1,73	1,72	1,97	2,06	1,71	1,33	1,73	1,45	1,63	1,70	1,60
T_e (s)	5,30	5,90	6,20	6,20	6,70	6,54	6,00	6,33	5,90	5,90	5,60	5,60
P (kW/m)	4,02	8,82	9,17	12,00	14,20	9,60	5,30	9,50	6,20	7,90	8,10	7,17

Fonte: Assis (2010)

- Uma análise realizada por estação do ano⁴ revelou que o outono possui a maior média de recurso energético: 11,35 kW/m. A primavera apresentou o menor resultado, ou seja, uma média de 7,40 kW/m. Esses resultados podem ser visualizados na Tabela 6.

Tabela 6: Valores médios sazonais de altura significativa, período de energia e potência.

Estação	Primavera	Verão	Outono	Inverno
H_s (m)	1,61	1,62	1,88	1,60
T_e (s)	5,71	5,80	6,40	6,30
P (kW/m)	7,40	7,70	11,35	8,06

Fonte: Assis (2010)

⁴ Conforme dados do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), vinculado ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), os horários e as datas de início das estações do ano para 2012 no país foram:

Outono: 02:14 do dia 20 de março;

Inverno: 20:09 do dia 20 de junho;

Primavera: 11:49 do dia 22 de setembro;

Verão: 08:11 do dia 21 de dezembro.

- A média anual da potência do recurso energético encontrada foi de **8,5 kW/m**, o que demonstra que o litoral do RS é uma área potencial de exploração de energia de ondas. Esse resultado supera valores obtidos em algumas localidades na costa do Brasil, como é o caso do Porto de Pecém, na costa do Ceará, onde recentemente foi construída uma usina (protótipo) de aproveitamento de energia de ondas.

O gráfico da Figura 18 apresenta o valor médio anual e os valores médios sazonais da potência das ondas do mar para o litoral do RS referentes ao período de 1996 a 1999.

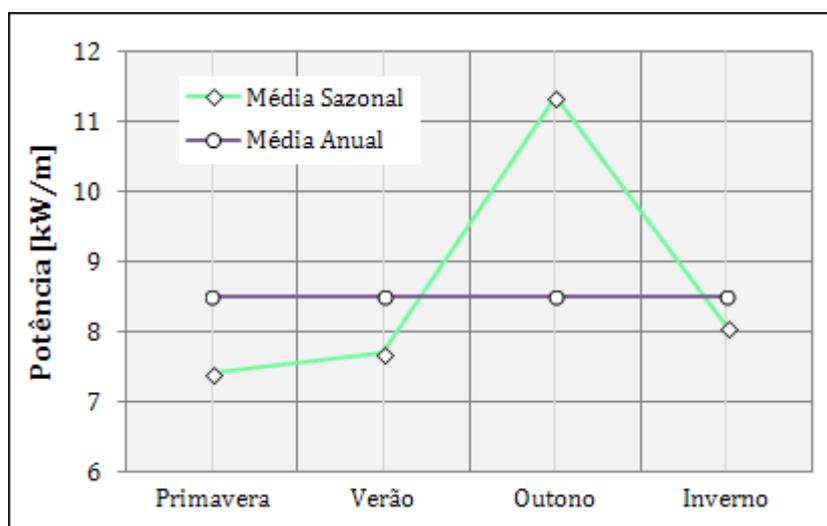


Figura 18: Médias anual e sazonais do potencial energético de ondas para o litoral do RS.
Fonte: Assis (2010)

Outro estudo, desenvolvido por Carvalho (2010), o qual realizou uma climatologia da energia de ondas para o litoral brasileiro através de modelagem numérica com a utilização do modelo de ondas WAVEWATCH III (WW3), apontou o litoral do RS como uma região com potencial ainda maior do que o encontrado no estudo de Assis. O novo resultado encontrado para a média anual da potência do recurso de ondas foi o seguinte: **15 kW/m** para todo o litoral do RS. A Figura 19 apresenta as médias mensais para o litoral do RS encontradas por Carvalho.

A potência anual do recurso energético de ondas oceânicas para todo o litoral brasileiro, também conforme Carvalho (2010), pode ser verificada na Figura 20. Conforme pode ser observado nessa figura, as regiões oceânicas do RS e do Sul de Santa Catarina foram a que apresentaram o maior potencial energético de ondas oceânicas do Brasil. Porém, o autor aponta a região que se estende de Sergipe a leste do Rio Grande do Norte, no Nordeste

brasileiro, como a mais adequada para instalação de conversores de energia de ondas do tipo *offshore*, devido à proximidade do litoral dessa área com a quebra da plataforma continental (área com profundidades elevadas).

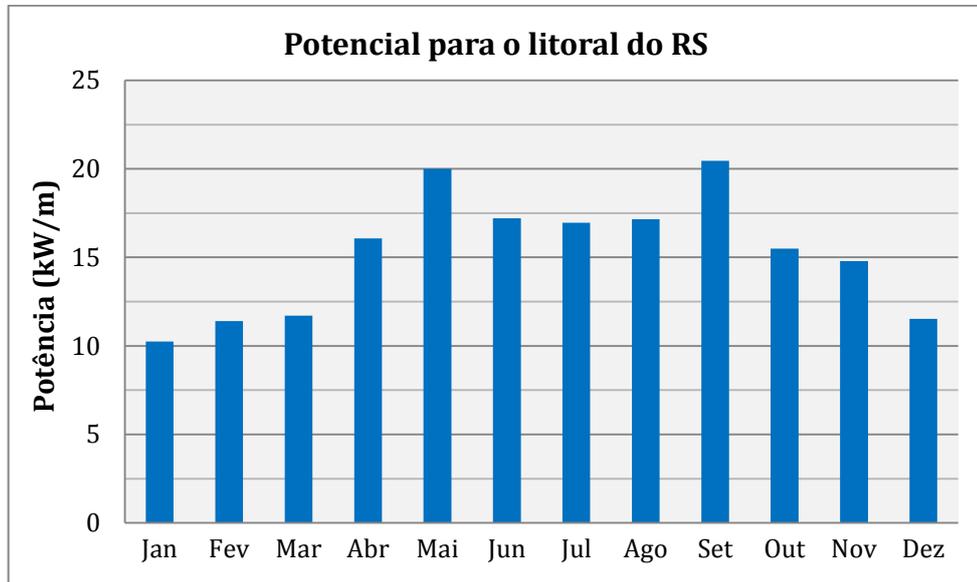


Figura 19: Médias mensais do potencial energético de ondas para o litoral do RS.
Fonte: Adaptado de Carvalho (2010)

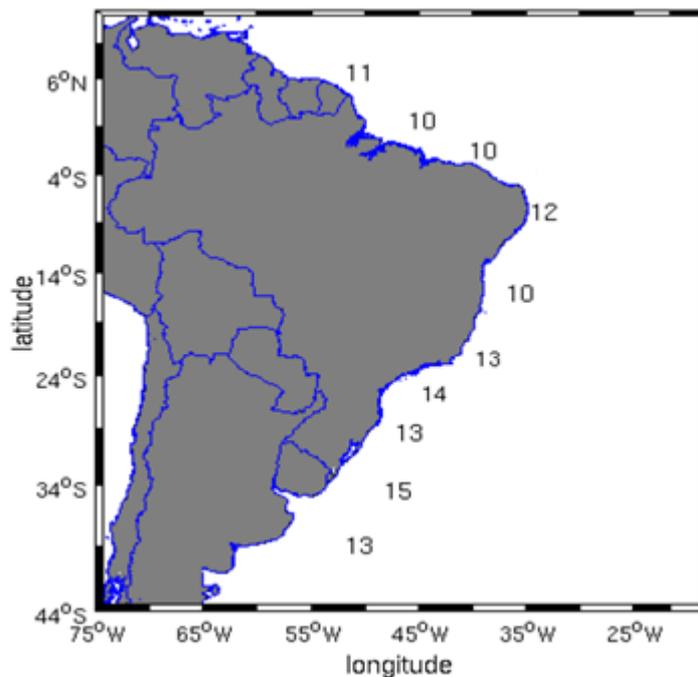


Figura 20: Média anual do potencial energético de ondas para o litoral brasileiro (em kW/m).
Fonte: Carvalho (2010)

3. O PROGRAMA *HOMER*

O *HOMER* é um modelo computacional desenvolvido pelo *U.S. National Renewable Energy Laboratory - NREL* (Laboratório Nacional de Energias Renováveis dos EUA). É utilizado para auxiliar no projeto de pequenas centrais de energia e para facilitar a comparação das tecnologias de geração de energia através de uma série de aplicações. O *HOMER* modela o comportamento físico de um sistema de energia e o seu custo de ciclo de vida, o qual compreende o custo de instalação e operação do sistema ao longo de sua vida útil. O programa permite ao usuário comparar diversas opções de projeto baseadas em suas características técnicas e econômicas, e também auxilia o projetista a entender e a quantificar os efeitos de incertezas ou de mudanças nos dados de entrada (LAMBERT *et al.*, 2006).

Um sistema de uma pequena central de energia é um sistema que gera energia, e possivelmente calor, para atender uma localidade próxima. Esse sistema pode englobar qualquer combinação de tecnologia que gere e armazene energia, e pode ser um sistema interligado à rede de distribuição ou autônomo, isto é, separado de qualquer rede de transmissão elétrica. Alguns exemplos desses sistemas estão listados a seguir através de algumas combinações de tecnologias:

- Painéis fotovoltaicos e baterias atendendo uma localidade distante;
- Turbinas eólicas e geradores a diesel servindo uma localidade isolada;
- Microturbina a gás natural, conectada à rede, fornecendo eletricidade e calor para uma fábrica.

Quando um sistema de energia é projetado, muitas decisões sobre a configuração do sistema devem ser tomadas, tais como (LILIENTHAL *et al.*, 2011):

- Os tipos de componentes que devem ser incluídos no projeto do sistema (painéis fotovoltaicos, turbinas eólicas, geradores, baterias);
- A quantidade e o tamanho de cada componente que deve ser adotado.

O grande número de opções de tecnologia e a variação tanto nos custos dessas tecnologias, quanto na disponibilidade de recursos energéticos, tornam essas decisões bastante difíceis. Os algoritmos de análise de otimização e de sensibilidade do *HOMER* tornam mais fácil a avaliação das possíveis configurações do sistema, que podem ser muitas.

3.1. A utilização e o funcionamento do programa

Para usar o *HOMER*, é necessário alimentar o modelo com dados de entrada, os quais descrevem as opções de tecnologia, os custos de componentes e a disponibilidade de recursos energéticos. O programa utiliza essas entradas para simular diferentes configurações de sistema, ou combinações de componentes, e gera resultados que podem ser visualizados através de uma lista de possíveis configurações, as quais são ordenadas pelo custo presente líquido (LILIENTHAL *et al.*, 2011).

O *HOMER* executa três principais funções:

- **Simulação;**
- **Otimização;**
- **Análise de sensibilidade.**

No processo de simulação, o *HOMER* modela a performance de uma configuração de um sistema de uma micro central de energia em particular a cada hora do ano para determinar sua viabilidade técnica e seu custo de ciclo de vida.

No processo de otimização, o *HOMER* simula muitas configurações diferentes de sistemas na procura por aquela que satisfaça todas as restrições técnicas com o menor custo de ciclo de vida.

No processo de análise de sensibilidade, o *HOMER* executa múltiplas otimizações sob uma série de premissas/suposições para avaliar os efeitos de incertezas ou mudanças nos dados de entrada do modelo.

A otimização determina o valor ótimo das variáveis sobre as quais o projetista tem controle como a combinação de componentes que constituem o sistema e o tamanho ou quantidade de cada um deles. A análise de sensibilidade ajuda a avaliar os efeitos de incertezas ou mudanças nas variáveis sobre as quais o modelador não tem controle, tais como a média da velocidade do vento ou o preço futuro dos combustíveis.

A Figura 21 ilustra a relação entre simulação, otimização e análise de sensibilidade. A região de otimização envolve a região de simulação para representar o fato de que uma simples otimização consiste de múltiplas simulações. Similarmente, a região da análise de sensibilidade engloba a região de otimização, pois uma simples análise de sensibilidade consiste de múltiplas otimizações (LAMBERT *et al.*, 2006).

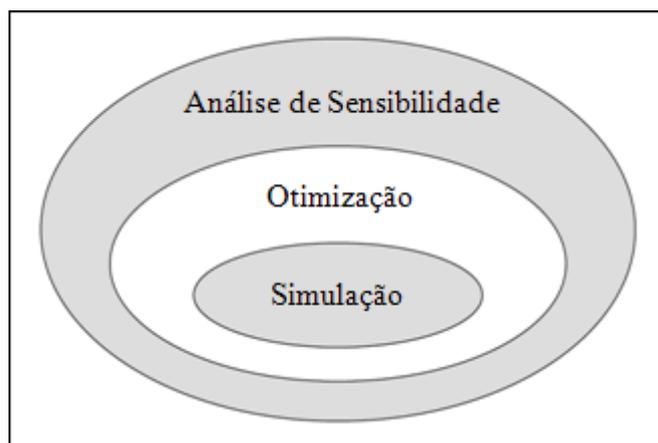


Figura 21: Relação conceitual entre simulação, otimização e análise de sensibilidade.
Fonte: Lambert *et al.* (2006)

O *HOMER* também exibe os resultados de simulação em uma grande variedade de tabelas e gráficos, através dos quais é possível comparar e avaliar as configurações quanto aos seus aspectos econômicos e técnicos.

Conforme Lilienthal *et al.* (2011), as análises de sensibilidade do modelo podem ser utilizadas para se verificar o efeito que mudanças em fatores como disponibilidade de recursos e condições econômicas poderiam ter sobre o custo-benefício de diferentes configurações de sistema. Para realizar uma análise de sensibilidade, é preciso fornecer ao *HOMER* valores de sensibilidade que descrevam uma série de disponibilidade de recursos e de custos de componentes. O programa simula cada configuração de sistema com a série de valores dada. Os resultados de uma análise de sensibilidade podem ser usados na identificação dos fatores que possuem o maior impacto sobre o projeto e a operação de um sistema de energia.

O *HOMER* simula a operação de um sistema efetuando cálculos do balanço de energia para cada uma das 8.760 horas do ano. Para cada hora, ele compara a demanda elétrica e térmica com a energia que o sistema pode fornecer naquela hora, e calcula os fluxos de energia que entram e saem em cada componente do sistema. Para sistemas que incluem baterias, ou geradores movidos a combustível, o programa também decide como operar os geradores em cada hora e se carrega ou descarrega as baterias.

O programa realiza esses cálculos de balanço de energia para cada configuração de sistema desejado. Ele, então, determina se uma configuração é viável, ou seja, se ela pode atender a demanda elétrica nas condições que foram especificadas pelo usuário, e estima o

custo de instalação e operação do sistema durante a vida útil do projeto. Os cálculos de custo do sistema contabilizam custo de capital, custo de reposição, custos de operação e manutenção, custos com combustível.

Analisar e projetar um sistema de uma micro central de energia pode ser desafiador devido ao grande número de opções de projeto e das incertezas dos parâmetros chaves, como o tamanho da carga e o preço futuro do combustível. As fontes de energia renováveis acrescentam maior complexidade, pois a potência de saída pode ser intermitente, sazonal, e não despachável, e a disponibilidade dos recursos renováveis podem ser incertos. O *HOMER* foi projetado para superar esses desafios.

3.2. Equações utilizadas para cálculo da potência

A seguir, serão apresentadas as principais fórmulas utilizadas pelo programa *HOMER* para o cálculo da potência gerada a partir de cada recurso energético. Salienta-se que foi dada maior ênfase para as fórmulas da potência contida nos ventos, tendo em vista a maior dificuldade para obtenção das informações relacionadas ao vento.

3.2.1. Cálculo da potência de saída do PV

O *HOMER* utiliza a seguinte equação para calcular a potência de saída do PV⁵ (*HOMER*, 2011):

$$P_{PV} = Y_{PV} \cdot f_{PV} \cdot \left(\frac{\bar{G}_T}{\bar{G}_{T, CPT}} \right) \cdot [1 + \alpha_P (T_C - T_{C, CPT})] \quad (25)$$

Onde:

P_{PV} : potência de saída do painel fotovoltaico [kW];

Y_{PV} : capacidade nominal do painel fotovoltaico, ou potência de saída em condições padrão de teste⁶ [kW];

f_{PV} : fator de desclassificação do painel fotovoltaico [%];

⁵ Será utilizada a abreviação em inglês PV (*photovoltaic*) para painel fotovoltaico.

⁶ **Condições Padrão de Teste (CPT):** os fabricantes de módulos fotovoltaicos analisam a potência de saída de seus equipamentos em condições padrão de teste, ou seja, radiação de 1 kW/m² e temperatura da célula a 25°C. As condições padrão de teste normalmente não refletem condições operacionais, visto que as temperaturas atingidas com radiação concentrada em uma célula tendem a ser muito maiores do que 25°C (*HOMER*, 2011).

\bar{G}_T : radiação solar incidente sobre o painel fotovoltaico no intervalo de tempo corrente [kW/m²];

$\bar{G}_{T, CPT}$: radiação incidente em condições padrão de teste [1 kW/m²];

α_P : coeficiente de variação da energia com a temperatura [%/°C];

T_C : temperatura da célula fotovoltaica no intervalo de tempo corrente [°C];

$T_{C, CPT}$: temperatura da célula fotovoltaica em condições padrão de teste [25°C].

Se for escolhida na janela de entradas do painel fotovoltaico a opção para não modelar o efeito da temperatura sobre o painel, o *HOMER* assume que o coeficiente de variação da energia com a temperatura é zero, e a equação acima se torna simplificada:

$$P_{PV} = Y_{PV} \cdot f_{PV} \cdot \left(\frac{\bar{G}_T}{\bar{G}_{T, CPT}} \right) \quad (26)$$

3.2.2. Cálculo da potência de saída da turbina eólica

Cálculo da potência contida nos ventos

Segundo Fadigas (2011), a potência contida nos ventos é função da massa específica do ar, da área de captação e da velocidade do vento ao cubo. Essa velocidade se refere ao vento não perturbado, ou àquele que se aproxima das pás do rotor antes de atingi-lo. De acordo com o sistema internacional de unidades (SI), a unidade de potência é o Watt (W), que é igual a 1 Joule por segundo (J/s). A potência contida nos ventos é dada pela Equação 27.

$$P_{\text{vento}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (27)$$

Onde:

P_{vento} : potência eólica ou potência contida nos ventos (W);

ρ : massa específica do ar (kg/m³);

A : área de captação (m²);

V : velocidade do vento (m/s).

Porém, ao encontrar um obstáculo ao seu fluxo (nesse caso, as pás do rotor), o vento tem o seu perfil modificado, isto é, na passagem pelo aerogerador, somente parte da potência

do vento é transformada em potência mecânica no eixo da turbina, a qual é o resultado de um torque e rotação do eixo. A lei da continuidade do fluxo estabelece que o fluxo permanente é sempre o mesmo para um volume de controle, portanto, como a velocidade do vento diminui após sua passagem pela turbina, a área ocupada pelo fluxo de ar aumenta. A eficiência contida num rotor é dada pelo coeficiente de potência C_p , conhecido como fator de Betz ou coeficiente de Betz, o qual atinge um valor máximo de 59,3%. Na prática, a potência elétrica gerada por uma turbina eólica é indicada pela sua curva de potência (FADIGAS, 2011).

Para calcular a potência gerada por uma turbina eólica em uma determinada hora, o *HOMER* segue um processo constituído por três etapas (*HOMER*, 2011):

- O valor da velocidade do vento de uma determinada hora é retirado dos dados do recurso eólico e ajustado para a altura do cubo através da utilização do perfil logarítmico de velocidades ou do perfil exponencial (Lei da Potência).
- A curva de potência da turbina eólica é utilizada para calcular a potência gerada em condições padrão de temperatura e pressão.
- O valor encontrado para a potência gerada é então multiplicado pela taxa de massa específica do ar, a qual é calculada através do gráfico da Figura 23.

Cálculo da velocidade do vento na altura do cubo da turbina

O *HOMER* calcula a velocidade do vento na altura do cubo da turbina eólica usando os valores de velocidade do vento utilizados na janela de recurso eólico e também as informações da turbina eólica especificadas na janela de informações da turbina.

Se for utilizada a lei logarítmica, o programa calcula a velocidade do vento na altura do cubo usando a seguinte equação (*HOMER*, 2011):

$$U_{\text{cubo}} = U_{\text{anem}} \cdot \frac{\ln (Z_{\text{cubo}} / Z_0)}{\ln (Z_{\text{anem}} / Z_0)} \quad (28)$$

Onde:

U_{cubo} : velocidade do vento na altura do cubo da turbina eólica (m/s);

U_{anem} : velocidade do vento na altura do anemômetro (m/s);

Z_{cubo} : altura do cubo da turbina eólica (m);

Z_{anem} : altura do anemômetro (m);

Z_0 : comprimento de rugosidade da superfície local (m).

Caso seja aplicada a Lei da Potência, a velocidade do vento na altura do cubo é calculada pelo *HOMER* da seguinte forma (onde α é o expoente da Lei da Potência):

$$U_{\text{cubo}} = U_{\text{anem}} \cdot \left(\frac{Z_{\text{cubo}}}{Z_{\text{anem}}} \right)^{\alpha} \quad (29)$$

Conforme Fadigas (2011), o modelo mais simples é representado pela Lei da Potência, o qual é resultado de estudos da camada limite sobre uma placa plana. Porém, esse modelo não tem uma precisão muito apurada.

Já o modelo matemático baseado na lei logarítmica é mais complexo e realístico, pois considera que o escoamento na atmosfera é altamente turbulento (TROEN, 1989 apud SILVA, 1999). Neste estudo, utilizou-se a lei logarítmica.

Cálculo da potência gerada pela turbina eólica em condições padrão de massa específica do ar

Uma vez determinada a velocidade do vento na altura do cubo, o *HOMER* utiliza a curva de potência da turbina eólica (Figura 22) para calcular a potência esperada para aquela turbina eólica naquela velocidade de vento em condições padrão de temperatura e pressão.

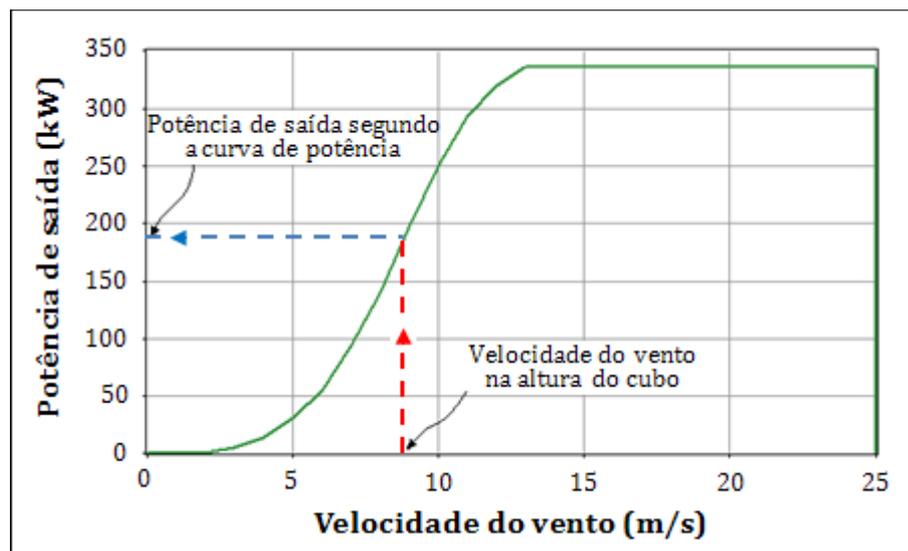


Figura 22: Exemplo de curva de potência de uma turbina eólica e demonstração de como é encontrada a potência de saída da turbina.

Fonte: Adaptado de *HOMER* (2011)

Correção da massa específica do ar

A curva de potência normalmente especifica o desempenho da turbina eólica em condições normais de temperatura e pressão (CNTTP). Para ajustar às atuais condições, o *HOMER* multiplica o valor da potência encontrada através da curva da turbina pela taxa de massa específica do ar, de acordo com a equação abaixo (*HOMER*, 2011):

$$P_{TE} = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right) \cdot P_{TE, CNTP} \quad (30)$$

Onde:

P_{TE} : potência de saída da turbina eólica (kW);

ρ : massa específica real do ar (kg/m³);

ρ_0 : massa específica do ar nas condições padrão de temperatura e pressão (1,225 kg/m³);

$P_{TE, CNTP}$: potência de saída da turbina eólica em condições padrão de temperatura e pressão (kW).

A altitude (elevação acima da superfície média do mar) tem efeito sobre a massa específica do ar, a qual tem influência sobre a potência gerada pela turbina. O *HOMER*, portanto, considera a altitude no cálculo da potência de saída da turbina eólica.

De acordo com a lei dos gases ideais, a massa específica do ar é dada pela seguinte equação:

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (31)$$

Onde:

P: pressão (Pa);

R: constante do gás ar (287 J/kgK);

T: temperatura em Kelvin (K = °C + 273,15).

A medida que o *HOMER* utiliza é a taxa de massa específica do ar, a qual é a massa específica real do ar dividida pela massa específica do ar nas condições padrão (nível do mar, 15°C). Para o cálculo da potência de saída da turbina eólica em uma determinada altitude, o programa multiplica a potência de saída obtida pela curva de potência da turbina pela taxa de

massa específica do ar. Usando a lei dos gases ideias, a taxa de massa específica do ar pode ser expressa conforme segue:

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{P}{P_0} \left(\frac{T_0}{T} \right) \quad (32)$$

Onde:

ρ_0 : massa específica do ar nas condições padrão de temperatura e pressão (1,225 kg/m³);

P_0 : pressão padrão (101.325 Pa);

T_0 : temperatura padrão (288,16 K);

A altitude afeta tanto a pressão quanto a temperatura. O *US Standard Atmosphere* usa o pressuposto de que até uma altitude de 11.000 m a temperatura decresce linearmente com a altitude de acordo com a equação a seguir:

$$T = T_0 - Bz \quad (33)$$

Onde:

B: taxa de variação térmica (0,00650 K/m);

z: altitude (m).

Usando o pressuposto de que a temperatura decresce linearmente com a altitude, a pressão pode ser demonstrada como dependente da altitude de acordo com a seguinte equação (onde a aceleração gravitacional $g = 9,81 \text{ m/s}^2$):

$$P = P_0 \left(1 - \frac{Bz}{T_0} \right)^{g/RB} \quad (34)$$

Substituindo as Equações 33 e 34 para cálculo da T e P na equação que define a taxa de massa específica do ar, chega-se a seguinte a seguir para a taxa de massa específica do ar:

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \left(1 - \frac{Bz}{T_0} \right)^{g/RB} \cdot \left(\frac{T_0}{T_0 - Bz} \right) \quad (35)$$

No lado direito da Equação 35, somente z , a altitude, não é constante. Então, com as hipóteses utilizadas, a taxa de massa específica do ar é função somente da altitude. Essa equação é utilizada para a produção do gráfico da taxa de massa específica do ar versus a altitude (Figura 23).

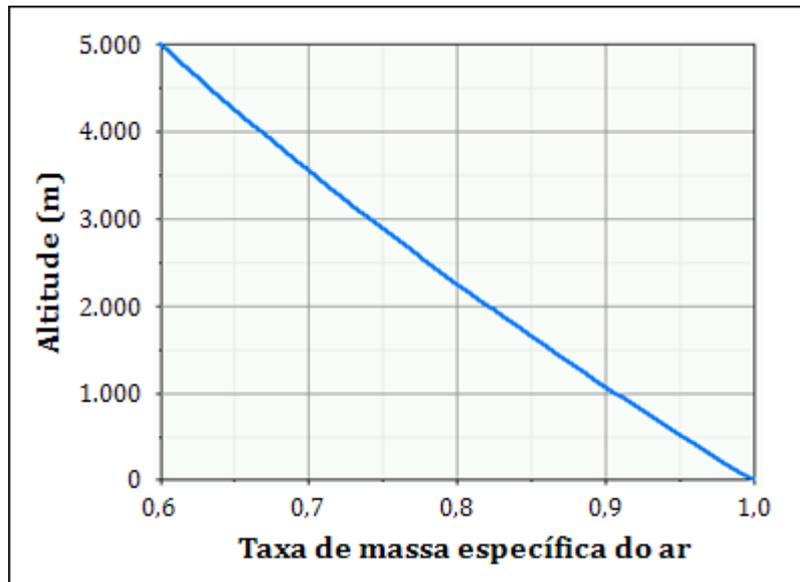


Figura 23: Taxa de massa específica do ar segundo a altitude local.
Fonte: Adaptado de HOMER (2011)

Segundo o gráfico da Figura 23, para uma altitude de 2.000 m, a taxa de massa específica do ar gira em torno de 0,82, ou seja, o ar nessa altitude possui 82% da massa específica do ar nas condições padrão de temperatura e pressão.

3.2.3. Cálculo da potência de saída da turbina hidráulica

Para cada intervalo de tempo, o *HOMER* calcula a potência elétrica de saída da turbina hidráulica usando a seguinte equação (*HOMER*, 2011):

$$P_{\text{hidro}} = \eta_{\text{hidro}} \cdot \rho_{\text{água}} \cdot g \cdot h \cdot Q \quad (36)$$

Onde:

P_{hidro} : potência de saída da turbina hidráulica (W);

η_{hidro} : eficiência da turbina hidráulica (%);

$\rho_{\text{água}}$: massa específica da água (1000 kg/m³);

g : aceleração da gravidade (9,81 m/s²);

h: altura vertical, altura de queda ou carga hidráulica (m);

Q: vazão da turbina hidráulica (m³/s).

As vazões utilizadas nessa equação foram encontradas através da Equação 43, na qual se encontram os seguintes parâmetros de ondas oceânicas: H_s e T_e . A demonstração da adaptação da Equação 43 se encontra no Capítulo 5, no item 5.1.3. (recurso ondas oceânicas).

3.3. Modelagem econômica

A economia possui um papel fundamental tanto no processo de simulação do *HOMER*, no qual o programa opera o sistema de modo a minimizar o custo total presente líquido, quanto no seu processo de otimização, no qual ele procura pela configuração de sistema com o menor custo total presente líquido. Esta seção descreve o motivo pelo qual o custo de ciclo de vida é a medida apropriada para se comparar os aspectos econômicos de diferentes configurações de sistema, por que o *HOMER* usa o custo total presente líquido como a característica econômica de medida, e como o *HOMER* calcula o custo total presente líquido (LAMBERT *et al.*, 2006).

As fontes renováveis e não renováveis de energia normalmente têm características de custos radicalmente diferentes. As fontes renováveis tendem a ter altos custos de capital inicial e baixos custos de operação, enquanto que as fontes convencionais não renováveis tendem a ter baixos custos de capital inicial e altos custos operacionais. No seu processo de otimização, o *HOMER* deve comparar frequentemente as características econômicas de um amplo conjunto de configurações de sistemas compreendendo quantidades variadas de fontes renováveis e não renováveis de energia. Para que se mantenha o equilíbrio, tais comparações devem levar em conta tanto os custos de capital quanto os de operação. A análise do custo do ciclo de vida realiza esse processo incluindo todos os custos que ocorrem durante a vida útil do sistema.

O *HOMER* usa o custo total presente líquido para representar o custo do ciclo de vida de um sistema. O custo total presente líquido condensa todos os custos e receitas que ocorrem durante o tempo de vida do projeto em um montante fixo em dólares atualizados, com fluxos de caixa futuros descontados para o presente usando a taxa de desconto. O modelador especifica a taxa de desconto e o tempo de vida útil do projeto. O custo total presente líquido inclui os custos iniciais de construção, reposição de componentes, manutenção, combustível,

mais o custo de compra de energia da rede de distribuição e custos variados tais como as externalidades resultantes das emissões de poluentes. As receitas incluem o valor da venda de energia para a rede, além de qualquer valor residual que ocorra no final da vida útil do projeto. Com o custo total presente líquido, os custos são positivos e as receitas são negativas. Isto é o oposto do valor presente líquido. Como resultado, o custo presente líquido é diferente do valor presente líquido apenas no sinal.

O *HOMER* assume que todos os preços aumentam a uma mesma taxa ao longo do tempo de vida útil do projeto. Com essa suposição, quando os fluxos de caixa futuros são descontados para o presente, a inflação é retirada da análise através da simples utilização da taxa de juros real (ajustada pela inflação) em vez da utilização da taxa de juros nominal. O usuário do *HOMER*, portanto, entra com a taxa de juros real, a qual é aproximadamente igual à taxa de juros nominal menos a taxa de inflação. Todos os custos no *HOMER* são custos reais, o que significa que eles são definidos em termos de dólares constantes.

Para cada componente do sistema, o modelador especifica o custo do capital inicial, o qual ocorre no ano zero, o custo de reposição, que ocorre a cada momento em que o componente precisa de reposição, ou seja, no final de sua vida útil, e o custo de operação e manutenção, que ocorre a cada ano da vida útil do projeto. O usuário especifica a vida útil da maioria dos componentes em anos. Um custo de reposição de componente pode ser diferente do seu custo de capital inicial por algumas razões. Por exemplo, um modelador pode assumir que a nacelle (ver Figura 28) de uma turbina eólica precisará de reposição após 15 anos, mas que a torre e a fundação da estrutura terão duração igual à vida útil do projeto. Nesse caso, o custo de reposição seria consideravelmente menor do que o custo de capital inicial. Agências bancárias ou programas de redução de taxas bancárias podem financiar alguns ou todos os custos de capital inicial de um PV, mas nenhum custo de reposição. Para esse caso, o custo de reposição pode ser maior do que o custo de capital inicial. Ao analisar o aperfeiçoamento de algum sistema existente a diesel, o custo de capital inicial do motor a diesel seria zero, mas o custo de reposição não seria.

Para calcular o valor residual de cada componente ao final da vida útil do projeto, o *HOMER* usa a seguinte equação (LAMBERT *et al.*, 2006):

$$S = C_{\text{rep}} \frac{R_{\text{rem}}}{R_{\text{comp}}} \quad (37)$$

Onde:

S: valor residual;

C_{rep} : custo de reposição do equipamento;

R_{rem} : tempo remanescente de vida do componente;

R_{comp} : tempo de vida útil do componente.

Por exemplo, se o tempo de vida útil do projeto é de 20 anos e se o tempo de vida útil do PV é também de 20 anos, o valor residual para o conjunto PV no final da vida útil do projeto será zero, porque ele não possui vida remanescente. Por outro lado, se a vida útil do PV é de 30 anos, no final dos 20 anos de vida útil do projeto seu valor residual será de um terço do seu custo de reposição.

Para cada componente, o *HOMER* combina os custos de capital, de reposição, de manutenção, e de combustível, juntamente com o valor residual e qualquer outro custo ou receita, para encontrar o custo anual do componente. Esse é o custo hipotético anual que se ocorresse a cada ano do tempo de vida útil do projeto produziria um custo presente líquido equivalente àquele de todos os custos individuais e receitas associadas com o componente ao longo do tempo de vida útil do projeto. O *HOMER* soma os custos anuais de cada componente, com quaisquer custos diversos, tais como multas devido a emissões de poluentes, para encontrar o custo anual total do sistema. Esse valor é muito importante, pois o programa o utiliza para calcular as duas principais características de medida econômica para o sistema: o custo total presente líquido e o custo médio de energia.

O *HOMER* usa a seguinte equação para calcular o custo total presente líquido (LAMBERT *et al.*, 2006):

$$C_{CTPL} = \frac{C_{anual, total}}{FRC(i, R_{projeto})} \quad (38)$$

Onde:

C_{CTPL} : custo total presente líquido;

$C_{anual, total}$: custo total anual;

i : taxa de juros real anual (taxa de desconto);

$R_{projeto}$: tempo de vida útil do projeto;

FRC: fator de recuperação de capital.

O FRC é dado pela seguinte equação (onde N é o número de anos):

$$\text{FRC}(i,N) = \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \quad (39)$$

O *HOMER* utiliza a seguinte equação para calcular o custo médio de energia (LAMBERT *et al.*, 2006):

$$\text{CE} = \frac{C_{\text{anual, total}}}{E_{\text{principal}} + E_{\text{adiável}} + E_{\text{rede, vendas}}} \quad (40)$$

Onde:

CE: custo médio de energia;

$C_{\text{anual, total}}$: custo total anual;

$E_{\text{principal}}$: carga principal que o sistema atende ao ano;

$E_{\text{adiável}}$: carga adiável que o sistema atende ao ano;

$E_{\text{rede, vendas}}$: quantidade de energia vendida para a rede de distribuição ao ano.

O denominador da Equação 40 é uma expressão da quantidade total de energia útil que o sistema produz ao ano. O custo médio de energia é, portanto, o custo médio por kWh da energia elétrica útil produzida pelo sistema.

Embora o custo médio de energia seja frequentemente uma medida conveniente com a qual se compara os custos de diferentes sistemas, o *HOMER* usa o custo total presente líquido como sua medida principal de característica econômica. Em seu processo de otimização, por exemplo, o *HOMER* faz um ranqueamento das configurações de sistema de acordo com o custo total presente líquido ao invés de utilizar o custo médio de energia. Isso porque a definição de custo médio de energia é questionável, enquanto que a do custo total presente líquido não é.

Durante o desenvolvimento da fórmula que o *HOMER* usa para o cálculo do custo médio de energia, os autores decidiram dividir pela quantidade de carga elétrica que o sistema de fato atende do que pela demanda elétrica total, a qual pode ser diferente se o usuário permitir alguma carga não atendida. Decidiu-se também negligenciar a energia térmica, mas incluir as vendas para a rede como produção de energia útil. Cada uma dessas decisões é, de

certa forma, arbitrária, fazendo com que a definição de custo médio de energia também seja, de certa forma, arbitrária. Devido ao fato de que o custo total presente líquido não sofre nenhuma definição ambígua, é preferível utilizá-lo como medida principal de característica econômica.

3.4. Aplicação com o *HOMER*

Este trabalho teve como material base o artigo publicado recentemente por Jones S. Silva, Alice R. Cardoso e Alexandre Beluco na revista internacional *Photoenergy*. Em tal artigo, utilizou-se o *HOMER* para encontrar uma solução para uma família de classe média que queria ter independência de energia elétrica em sua residência. Primeiramente, estabeleceu-se o conceito de “energia zero”, ou seja, que toda energia disponível fosse igual à energia consumida. A solução concebida para atender a demanda da residência em questão foi um sistema híbrido conectado à rede de distribuição elétrica formado por painéis fotovoltaicos, uma microturbina eólica e um gerador a diesel, com a possibilidade de armazenamento de energia através de baterias e também de aquecimento de água e do ambiente interno da casa. Como uma restrição, a família solicitou que o sistema tivesse um pequeno impacto no estilo de vida familiar e na estética do local. O trabalho visou à avaliação das consequências da redução dos custos de módulos fotovoltaicos. Os resultados demonstraram que, para o sistema híbrido projetado, uma redução de 50% no custo dos módulos fotovoltaicos permitiria que todas as soluções que incluíssem os painéis se tornassem viáveis (SILVA *et al.*, 2012).

4. EQUIPAMENTOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA

4.1. Sistema de energia projetado

Neste estudo, utilizaram-se os seguintes componentes (equipamentos) para a composição do projeto do sistema de energia:

- Sistemas fotovoltaicos conectados à rede;
- Usina eólica;
- Usina de aproveitamento de ondas oceânicas.

O sistema foi projetado considerando conexão com o Sistema Interligado Nacional.

Na Figura 24, encontra-se o esquema do projeto do sistema híbrido de energia utilizado nas simulações do *HOMER*. Salienta-se que a usina de ondas está representada pelo botão de uma usina hidrelétrica (botão *Hydro*).

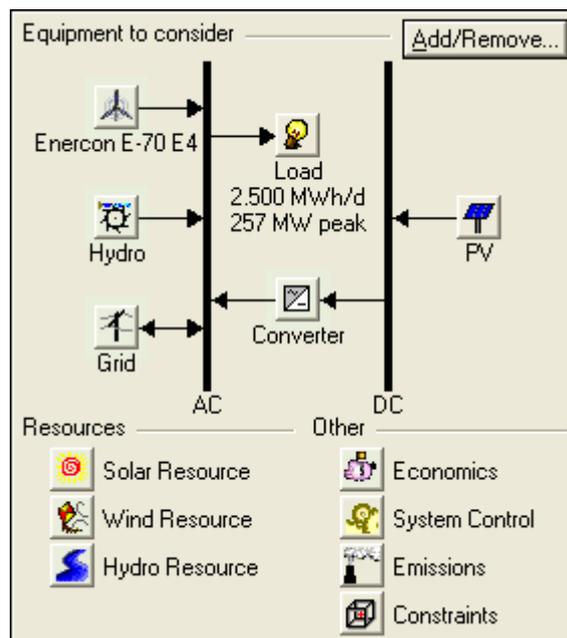


Figura 24: Esquema do sistema de energia adotado.
Fonte: *HOMER* (2011)

No esquema acima, o botão *Load* representa a demanda elétrica do litoral norte. Os botões *Enercon E-70 E4* e *Hydro* representam a fazenda eólica de Osório e a usina de aproveitamento de ondas do mar, respectivamente, e estão conectados a um barramento AC (corrente alternada). O botão *PV* representa painéis fotovoltaicos ligados a um barramento DC

(corrente contínua). Para a conexão do barramento DC com o barramento AC utilizou-se o botão *Converter*, o qual representa conversores que transformam a corrente contínua em corrente alternada.

O sistema ainda é alimentado pela rede de distribuição, representada pelo botão *Grid*, cuja energia elétrica é proveniente de hidrelétricas, termoelétricas, usinas eólicas, etc.

Os botões *Solar Resource*, *Wind Resource* e *Hydro Resource* representam os recursos energéticos utilizados nesse sistema, ou seja, radiação solar, vento e vazão (função das ondas do mar, conforme será explicado no Capítulo 5, item 5.1.3.), respectivamente.

4.1.1 Painéis Fotovoltaicos

Conforme Krenzinger (2012), o sistema fotovoltaico conectado à rede (SFCR) não utiliza armazenamento de energia, pois toda a geração é entregue diretamente na rede de distribuição, representando uma fonte complementar ao sistema elétrico de grande porte ao qual está conectado. Todo o arranjo de painéis fotovoltaicos é conectado em inversores, e a saída desses inversores é conectada diretamente na rede de distribuição (Figura 25). Para que a rede não seja afetada, os inversores devem satisfazer as exigências de qualidade e segurança.

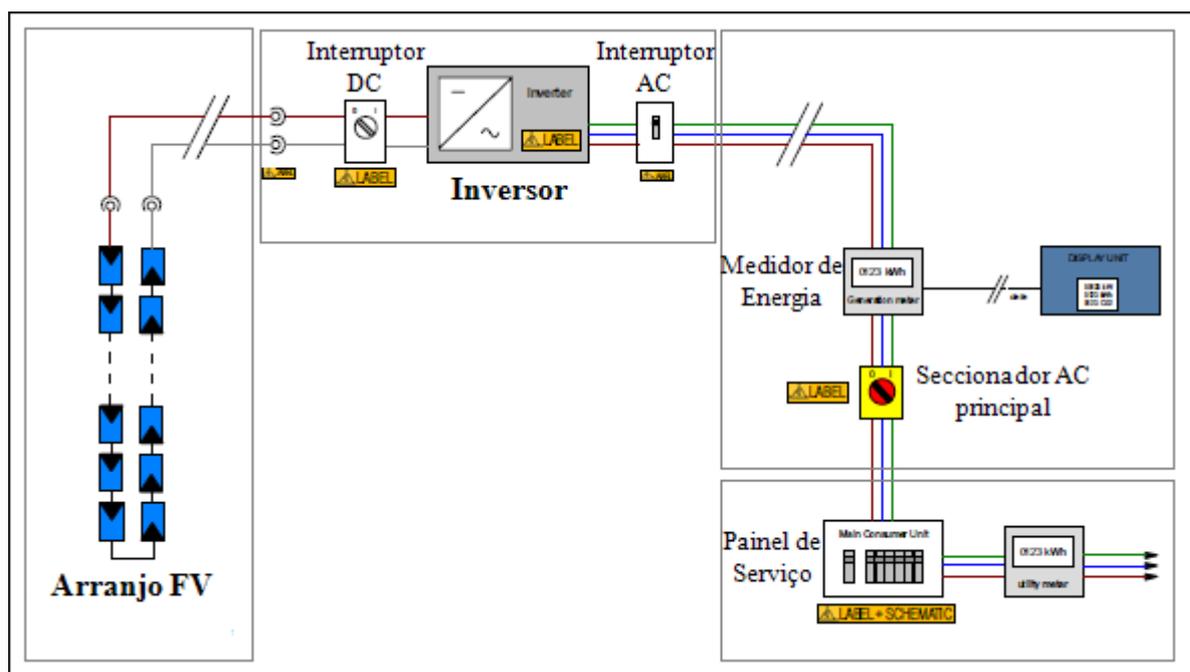


Figura 25: Sistema fotovoltaico conectado à rede.
Fonte: Adaptado de *Photovoltaics in Buildings* (2006)

Na figura anterior (Figura 25) encontra-se uma ilustração esquemática dos componentes de uma instalação de um SFCR. Como os aspectos de dimensionamento são particulares para cada sistema, essa figura não deve ser utilizada para o projeto de uma determinada instalação, embora seja um bom exemplo de um diagrama de um sistema fotovoltaico (KREZNINGER, 2012).

Conforme Krenzinger (2012), a eficiência de células de silício monocristalino, fabricadas pelo processo de Czochralski, e muito utilizadas em sistemas fotovoltaicos, atinge uma faixa de 15 a 18%.

Uma série de fatores é responsável pela limitação da eficiência da conversão da energia solar em energia elétrica através do efeito fotovoltaico em uma célula. Os principais são: perdas por reflexão na superfície, perdas por seletividade (apenas parte dos fótons disponíveis pode ser aproveitada, ou seja, as células de silício são insensíveis à luz fora da banda visível e infravermelho próximo), perdas pela utilização parcial dos fótons na criação dos pares elétron-lacunas, perdas pelo não aproveitamento de todos os pares elétron-lacuna e pela recuperação somente parcial da energia desses portadores, perdas pelos efeitos de resistência série e paralela, perdas devidas aos contatos (KREZNINGER, 2012).

Devido à baixa eficiência das células fotovoltaicas, à falta de produção em escala e à necessidade de utilização de muita energia na fabricação das células, os custos de implantação de sistemas fotovoltaicos ainda são muito altos. Portanto, este estudo também pretende encontrar valores de viabilidade de sistemas fotovoltaicos conectados à rede de distribuição tomando-se em consideração a compra de um grande lote e uma futura produção em escala dos módulos.

Como o *HOMER* não solicita a definição de uma tecnologia de mercado para a inserção de módulos fotovoltaicos no esquema, utilizaram-se painéis genéricos no programa.

Simulou-se um cenário no qual 20.000 famílias do litoral norte do RS receberiam incentivos das prefeituras locais. Em cada residência seriam instalados painéis fotovoltaicos de 500 W de potência, o que resultaria em uma potência total instalada de 10 MW para PVs no sistema de energia. O custo de aquisição para os PVs foi de US\$ 4.923,00/kW (R\$ 10,00/W), o custo de reposição foi de US\$ 4.431,00/kW, e o custo de operação e manutenção (O&M) foi de US\$ 98,50/kW. O tempo de vida útil de cada PV foi estimado em 25 anos.

Neste estudo, o custo com os inversores foram incluídos no custo com os painéis fotovoltaicos visando simplificação das simulações. O custo de **R\$ 10,00/W** utilizado para os PVs teve como referência o investimento realizado na Usina de Tauá e o custo da futura usina solar que será implantada em Porto Alegre, conforme informações a seguir:

- A primeira usina solar do Brasil foi instalada em 2011 na cidade de Tauá, a 344 km da cidade de Fortaleza, no estado do Ceará (CE). O custo da usina foi de R\$ 10 milhões (o valor atualizado⁷ perfaz **R\$ 10,65/W**). A Usina Solar Tauá completou um ano de operação com produção de energia superior à média mundial. A planta frequentemente alcançou fatores de capacidade acima de 20%, superando o esperado de 17%, e produziu em um ano 1.554,6 MWh de energia ativa (MPX, 2012).

- Uma usina solar com 0,55 MW de potência será construída na cidade de Porto Alegre/RS através do projeto denominado “Inserção da Geração Solar Fotovoltaica Urbana Conectada à Rede em Porto Alegre”. O investimento na usina será na ordem de R\$ 5,7 milhões (**R\$ 10,36/W**). O empreendimento será construído no centro da capital do estado, ao longo da linha do Aeromóvel e sobre parte dos telhados da Usina do Gasômetro e da Fundação de Ciência e Tecnologia - CIENTEC (JORNAL DA ENERGIA, 2012).

Salienta-se que neste estudo todas as conversões da moeda Real para a moeda Dólar foram realizadas no dia 31.10.2012 através do site do Banco Central do Brasil (2,0313 Reais do Brasil = 1 Dólar dos EUA).

4.1.2 Usina Eólica

Foram reproduzidos os Parques Eólicos de Osório/RS nas simulações computacionais. Para tanto, utilizou-se a mesma tecnologia e o mesmo número de turbinas eólicas de Osório, ou seja, a mesma potência instalada. A seguir, encontra-se uma descrição das características da fazenda eólica em questão.

Parques Eólicos de Osório

O empreendimento é composto por 03 parques: Osório, Sangradouro e Índios. Cada parque possui 25 aerogeradores de 2 MW de potência cada, o que significa uma capacidade instalada de 50 MW por parque. Ao todo são 75 aerogeradores que totalizam uma potência

⁷ Atualização pelo Índice Nacional de Preços ao Consumidor (INPC), através do Site Cálculo Exato.

instalada de 150 MW. Essas máquinas são capazes de produzir cerca de 425 GWh de energia por ano, o suficiente para uma demanda energética anual de aproximadamente 650 mil pessoas. O custo do empreendimento em 2007 foi de R\$ 670.000.000,00 (VENTOS DO SUL, 2011). A Figura 26 apresenta alguns dos aerogeradores da usina eólica de Osório.



Figura 26: Vista parcial dos Parques Eólicos de Osório.
Fonte: Wobben (2012)

Na Tabela 7, encontram-se as principais características dos aerogeradores implantados nos Parques Eólicos de Osório. Ao lado (Figura 27), encontra-se uma foto de uma das turbinas eólicas utilizadas.

Tabela 7: Características do aerogerador.

AEROGERADOR	
Fabricante	ENERCON
Modelo	E-70 E4
Altura do rotor	100 m
Velocidade do rotor	10 - 22 rpm
Diâmetro do rotor	70 m
Peso total do aerogerador	915 ton
Área de varredura	3.960 m ²
Número de pás	3
Potência Nominal	2 MW
Altitude média	20 msnm

Fonte: Ventos do Sul (2011)



Figura 27: Aerogerador utilizado nos Parques Eólicos de Osório.
Fonte: Sul (2009)

A figura 28 ilustra a configuração básica de uma turbina eólica de eixo horizontal.

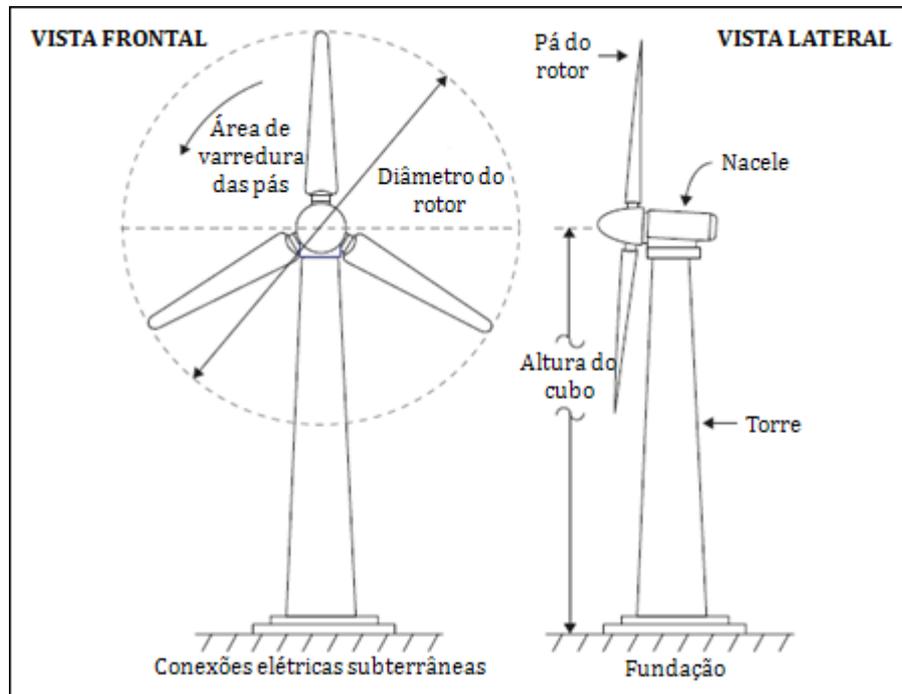


Figura 28: Configuração básica de uma turbina eólica de eixo horizontal.
Fonte: RETScreen International (2005)

Também foi necessária a utilização da curva de potência (Figura 29) das turbinas eólicas instaladas em Osório, a qual é fornecida pela fabricante ENERCON. Como a potência máxima da curva de potência original fornecida pela fabricante é de 2,3 MW, modificou-se esse valor para 2 MW, que foi de fato a potência utilizada nas turbinas de Osório.

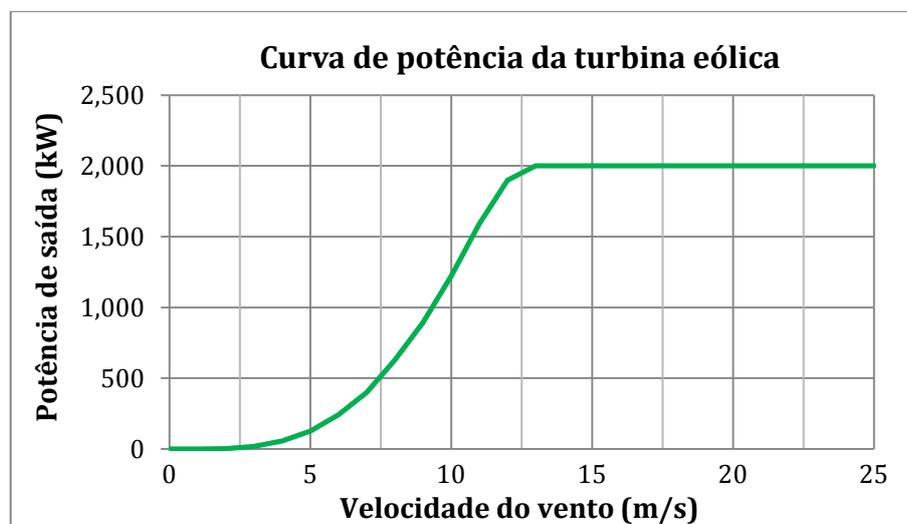


Figura 29: Curva de potência da turbina eólica modelo E-70 E4 segundo catálogo da fabricante ENERCON (potência máxima modificada para 2 MW).

Realizou-se um levantamento geral sobre os custos atuais dos empreendimentos que foram instalados recentemente e que estão sendo instalados no RS. Chegou ao seguinte custo, em dólar, para cada uma das turbinas: US\$ 3.938.365,00 (**R\$ 4,00/W**), US\$ 3.544.528,00 e US\$ 78.767,00 para capital, reposição e operação e manutenção (O&M), respectivamente. O tempo de vida útil para cada aerogerador foi estimado em 25 anos.

4.1.3 Usina de aproveitamento de Ondas Oceânicas

O programa *HOMER*, atualmente, não oferece a opção de componente para uma usina de aproveitamento de ondas do mar. A solução encontrada para a realização das simulações foi a utilização de um botão para uma usina hidrelétrica. As vazões utilizadas foram calculadas em função dos dados do recurso de ondas, ou seja, em função das alturas significativas (H_s) e dos períodos de energia (T_e). Esses cálculos serão demonstrados no Capítulo 5, no item 5.1.3. (recurso ondas oceânicas).

Escolheu-se apenas como uma referência a tecnologia desenvolvida pela COPPE/UFRJ para a usina de aproveitamento de ondas do mar deste estudo. Essa tecnologia está sendo testada no porto de Pecém, no município de São Gonçalo do Amarante/CE, e seu funcionamento foi descrito no capítulo 2, no item 2.2 (tecnologias existentes).

Usina de ondas do Porto de Pecém

A primeira geração de energia no Brasil a partir das ondas oceânicas foi obtida através de um protótipo de 50 kW de potência (Figura 30) instalado no Porto de Pecém, no município de São Gonçalo do Amarante, no estado do Ceará (CE). O protótipo foi desenvolvido através de um Programa de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) intitulado “*Implantação de Protótipo de Conversor de Ondas Onshore nas Condições de Mar do Nordeste do Brasil*”. O projeto teve a Tractebel Energia S.A. como empresa proponente e a Fundação Coordenação de Projetos, Pesquisas e Estudos Tecnológicos (COPPETEC) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ) como instituição executora. O projeto tem um custo total de R\$ 14,4 milhões e duração de 36 meses. A geração de energia elétrica através das ondas do mar aconteceu durante 10 minutos do dia 24/06/2012 e alimentou sistemas auxiliares da própria usina

(iluminação e ar-condicionado). Os testes e as operações ainda estão em andamento, a fim de que a usina seja capaz de gerar energia elétrica por mais tempo (ANEEL, 2012b).



Figura 30: Usina (protótipo) de conversão das ondas oceânicas desenvolvida pela COPPE/UFRJ e implantada no Porto de Pecém, no município de São Gonçalo do Amarante/CE.
Fonte: O GLOBO CIÊNCIA (2012)

Para uma melhor comparação com a fazenda eólica de Osório, decidiu-se realizar as simulações com uma usina que tivesse a mesma potência instalada dos Parques Eólicos de Osório, ou seja, uma usina de ondas com uma potência de 150 MW. Utilizou-se um comprimento de 12 km para a usina de ondas.

Através da potência média das ondas oceânicas do litoral do RS encontrada neste estudo, que é de 12 kW/m (Figura 41), e do comprimento de 12 km definido para a usina, chegou-se a um valor aproximado para a potência instalada da usina de ondas: 144 MW.

Foi estabelecida uma faixa de valores para os custos de investimento da usina de ondas depois de vários testes, com a finalidade de encontrar entre essa faixa um limite que apontasse os valores máximos de investimento em uma usina de tamanha dimensão. Os custos iniciais escolhidos depois de tais testes foram: US\$ 200.000.000,00; US\$ 180.000.000,00 e US\$ 4.000.000,00 para os custos de capital inicial, reposição e O&M, respectivamente. Os valores máximos utilizados, também após vários testes, foram: US\$ 1.200.000.000,00; 1.080.000.000,00 e 24.000.000,00 para os custos de capital inicial, reposição e O&M, respectivamente. Esses custos foram definidos para um custo com a energia da rede no valor de R\$ 0,30/kWh. A vida útil estimada para a usina de ondas foi de 25 anos.

5. RECURSOS ENERGÉTICOS E DEMANDA DO LITORAL NORTE

5.1. Recursos energéticos

Os recursos energéticos utilizados neste estudo foram: radiação solar, vento e ondas do mar. Esses recursos serão detalhados a seguir.

Foram utilizados 8.760 valores para cada recurso energético no programa *HOMER*, que representam valores horários durante um período de 1 ano, ou seja:

$$24\text{h/dia} * 365 \text{ dias/ano} = 8.760\text{h/ano}$$

5.1.1. Radiação Solar

Utilizaram-se 8.760 valores de radiação solar disponibilizados automaticamente pelo programa *HOMER* através da internet segundo a latitude local. Para acesso a esses valores, foram necessários apenas os seguintes dados de um ponto da área de interesse: latitude, longitude e fuso horário. Escolheu-se a cidade de Osório, que está localizada no fuso horário GMT -03:00, e que possui as seguintes coordenadas geográficas: **latitude 29°53'S e longitude: 50°16'O**.

Considerou-se, portanto, nas simulações computacionais, que toda a região do litoral norte possui a mesma radiação solar.

Os dados fornecidos pelo programa são provenientes de um banco de dados do *U.S. National Renewable Energy Laboratory - NREL* (Laboratório Nacional de Energias Renováveis dos EUA). Esse banco de dados é alimentado com informações coletadas pela *National Aeronautics and Space Administration - NASA* (Administração Nacional da Aeronáutica e do Espaço dos EUA).

A Figura 31 apresenta um diagrama com a série horária dos dados de radiação solar incidente sobre uma superfície plana (segundo a latitude local) para cada hora do ano para a região em estudo obtida diretamente através do programa *HOMER*. Verifica-se nitidamente no gráfico que o verão e a primavera são as estações que apresentam a maior incidência de radiação solar, enquanto que o outono e o inverno são as estações com menor incidência da radiação solar. A zona escura do diagrama (cor preta) indica, em grande parte, ausência de radiação solar, ou seja, o período da noite.

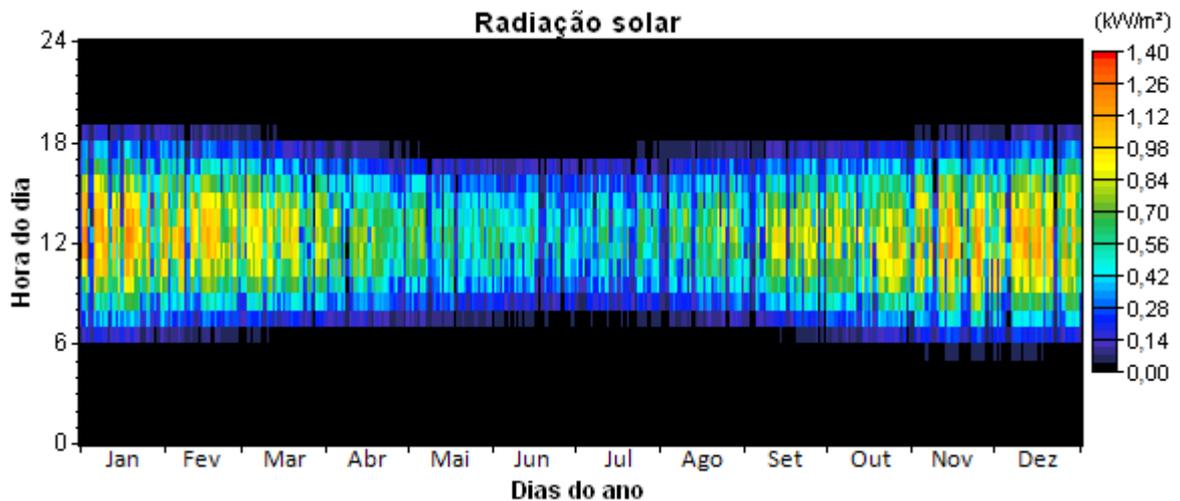


Figura 31: Radiação solar incidente sobre uma superfície plana, segundo a latitude local para cada hora do ano, obtida diretamente através do programa *HOMER*.

A Figura 32 apresenta um gráfico com um perfil da radiação solar média mensal para o litoral norte, bem como os valores máximos e mínimos de radiação solar registrados em cada mês calculados através do programa *HOMER*. Na última coluna desse gráfico, podem ser verificados a média anual da radiação solar, que atingiu um valor aproximado de 0,21 kW/m², e o valor máximo anual aproximado de 1,27 kW/m².

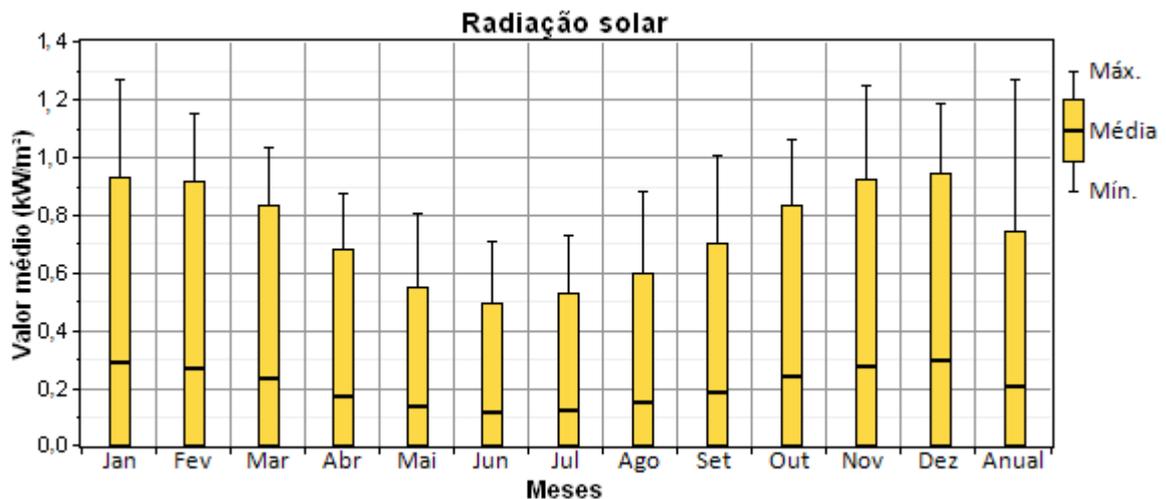


Figura 32: Médias mensais da radiação solar incidente sobre uma superfície plana, segundo a latitude local, calculadas através do programa *HOMER*.

Outra opção que também poderia ter sido utilizada como fonte de dados de radiação solar para a área de estudo seria o Atlas Solarimétrico do Brasil, o qual possui mapas mensais de isolinhas de radiação solar para todo o país, construídos através da organização,

classificação e padronização de dados medidos e publicados por diversos autores e instituições ao longo das últimas décadas (ATLAS SOLARIMÉTRICO DO BRASIL, 2000). Com os dados mensais da radiação solar, seria possível sintetizar uma série anual de dados através do *HOMER*. Optou-se por utilizar os dados da *NASA* neste estudo pela simplicidade de aquisição: são obtidos pela internet através do próprio programa *HOMER*.

5.1.2. Vento

A série de 8.760 valores de velocidades do vento necessária foi sintetizada pelo programa *HOMER* a partir de velocidades médias mensais encontradas para a cidade de Mostardas e também a partir de um fator de forma k da distribuição de *Weibull*.

As velocidades do vento utilizadas neste estudo são provenientes do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) de Stevan Ruschel da Silveira, o qual estudou a importância da geração descentralizada de energia através de uma análise do potencial eólico da região de Mostardas. Os dados utilizados por Silveira foram cedidos pela empresa EPI Energia Projetos e Investimentos Ltda. O local exato da torre de medições não foi divulgado pela empresa por questões de direitos de propriedades dos dados, mas foram medições anemométricas realizadas próximas ao município de Mostardas (SILVEIRA, 2011). Por questões de simplificação neste estudo, considerou-se que esses dados foram medidos no Município de Mostardas.

Como os valores de medição das velocidades de vento encontrados para Mostardas foram obtidos a uma altura de 50 m, optou-se por elevar essas velocidades para a altura de 100 m, que é a altura do cubo dos aerogeradores de Osório, para que os valores de velocidade do vento a uma altura de 100 m fossem apresentados diretamente nos gráficos e nas tabelas do *HOMER*. Esse cálculo foi realizado através da Equação 28 (lei logarítmica).

Os valores tanto das velocidades de vento para Mostardas a uma altura de 50 m, quanto das velocidades calculadas para uma altura de 100 m, encontram-se na Tabela 8. Salienta-se que esse cálculo prévio não seria necessário, tendo em vista que o próprio *HOMER* realiza essa transformação de velocidades.

Tabela 8: Valores médios mensais da velocidade do vento medidos a uma altura de 50 m, e valores médios mensais da velocidade do vento calculados para a altura de 100 m.

Mês	Velocidade do vento (m/s)	
	50m	100m
Jan	7,358	7,957
Fev	6,355	6,872
Mar	6,993	7,562
Abr	6,228	6,735
Mai	5,715	6,180
Jun	6,805	7,359
Jul	7,080	7,656
Ago	7,074	7,650
Set	7,341	7,938
Out	7,561	8,176
Nov	8,287	8,961
Dez	7,688	8,314
Média	7,040	7,613

Fonte: Silveira (2011)

Utilizou-se, também, um fator de forma k da distribuição de *Weibull* no valor de 1,89 encontrado através de medições realizadas pela empresa Ventos do Sul para a área onde se localizam os Parques Eólicos de Osório.

Outra fonte de dados de vento para a área de estudo seria o Atlas Eólico do RS, o qual possui informações sobre os regimes dos ventos no estado. Para a geração dos mapas eólicos do RS foram utilizadas técnicas modernas e metodologia adequada, e teve-se como base medições realizadas entre 2000 e 2002. As informações dos mapas permitiram identificar os potenciais de aproveitamento da energia eólica para o RS. A elaboração de estudos preliminares de viabilidade técnica e econômica, e a identificação de locais adequados para as medições com vistas à implantação de fazendas eólicas, tornaram-se possíveis com a criação do Atlas em questão (ATLAS EÓLICO DO RS, 2002).

Porém, como o Atlas Eólico do RS possui apenas velocidades médias do vento segundo as estações do ano, decidiu-se utilizar os dados de medições de Mostardas tendo em vista que são dados com medições mensais.

Na Tabela 9, encontram-se as velocidades médias encontradas no TCC de Steven (ajustadas para a altura de 100 m) agrupadas por estação do ano, e também as velocidades

médias sazonais da velocidade do vento para uma altura de 100 m encontradas no Atlas Eólico do RS para a região sobre a qual se encontra o município de Osório.

Tabela 9: Velocidades médias do vento para as regiões de Mostardas e de Osório segundo as estações do ano.

Estação do ano	Verão	Outono	Inverno	Primavera	Média
V (m/s) - Mostardas	7,57	6,83	7,69	8,41	7,63
V (m/s) - Osório	7,20	6,60	7,30	8,50	7,40

Fonte: Silveira (2011) e Atlas Eólico do RS (2002)

Para uma melhor visualização da representatividade dos dados de Mostardas, realizou-se uma comparação através de gráfico desses valores de velocidade do vento com os valores de vento do Atlas Eólico do RS para a cidade de Osório (Figura 33). Chegou-se à conclusão de que os dados eram bastante similares.

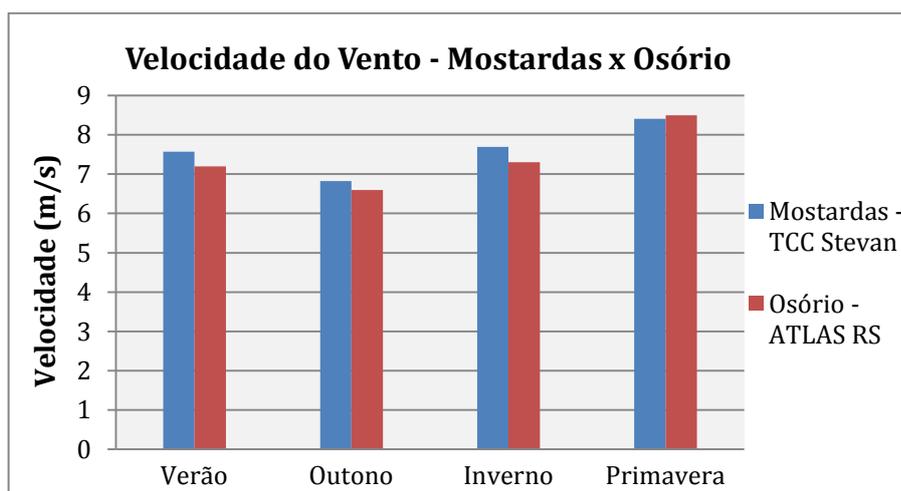


Figura 33: Comparação sazonal da velocidade média do vento medida em Mostardas (ajustada para a altura de 100 m) com a velocidade média do vento para uma altura de 100 m encontrada para a cidade de Osório através do Atlas Eólico do RS.

Com os dados de Mostardas, com o fator de forma k da distribuição de *Weibull*, e com outros parâmetros médios de vento fornecidos pelo próprio *HOMER*, foi possível a obtenção da série sintética anual para a velocidade do vento.

A Figura 34 apresenta um diagrama com a série sintética dos dados de vento para cada hora do ano para a região de Mostardas obtida através do programa *HOMER*. É possível observar, nesse gráfico, a grande oscilação da velocidade do vento ao longo das 24h do dia.

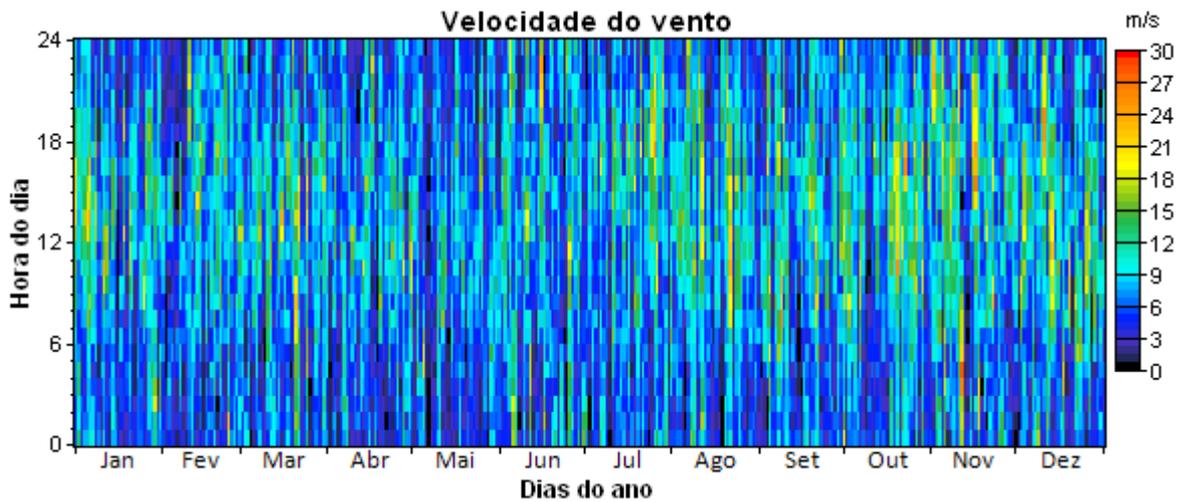


Figura 34: Série horária anual sintética da velocidade do vento para a região de Mostardas, para uma altura de 100m, obtida através do programa *HOMER*.
Fonte: Silveira (2011)

A Figura 35 apresenta um gráfico com um perfil da velocidade média mensal do vento para a região de Mostardas, bem como os valores máximos e mínimos da velocidade do vento registrados em cada mês. Na última coluna desse gráfico, podem ser verificados a média anual da velocidade do vento, que atingiu um valor aproximado de 7,6 m/s, e o valor máximo anual aproximado de 28,1 m/s.

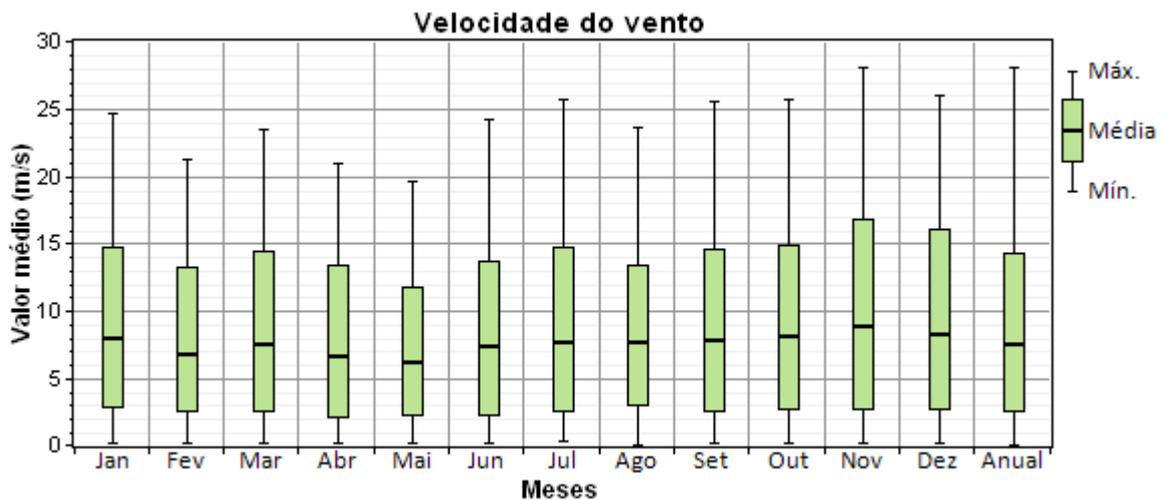


Figura 35: Médias mensais da velocidade do vento, obtidas através da série horária sintética para uma altura de 100m, calculadas através do programa *HOMER*.

5.1.3. Ondas Oceânicas

Utilizou-se uma série anual de 2.920 valores de altura significativa (H_s) e também uma série anual de 2.920 valores de períodos significativos (T_s) referentes à região onde se localiza a cidade de Tramandaí/RS. Esses dados foram fornecidos pelo Dr. Luiz Emílio de Sá Brito de Almeida, professor do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da UFRGS, e foram adquiridos em 2009 através do site do *National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA* (Administração Nacional Oceânica e Atmosférica).

Como cada série possuía um intervalo de 03 horas, houve a necessidade de triplicação de dados para a formação das 2 séries completas, ou seja, para a formação de 8.760 dados de alturas significativas (H_s) e para a formação de 8.760 dados de períodos significativos (T_s). Como os dados das séries anuais adquiridas pelo NOAA são dados de ondas medidos em regiões de águas profundas, e levando-se em consideração a Lei de Conservação de energia, chegou-se a conclusão de que a série completa formada apresentaria um erro muito pequeno, e que seria possível sua utilização.

Através dos períodos significativos (T_s) foi possível encontrar os períodos de pico (T_p), os quais foram calculados segundo a relação a seguir (Equação 41), recomendada pelo *U.S. Army Coastal Engineering Research Center* (Centro de Pesquisas em Engenharia Costeira do Exército dos EUA) segundo diversas investigações de registros de ondas (SORENSEN, 2006):

$$T_s = 0,95 \cdot T_p \quad (41)$$

Conforme Cornett (2008), o período de energia (T_e) é raramente especificado. Portanto, neste trabalho, considerou-se a seguinte relação:

$$T_e = T_p \quad (42)$$

Como ainda não existe opção no programa *HOMER* para tecnologias de conversão de energia de ondas, um dos desafios deste trabalho foi encontrar 8.760 dados de vazões para que as simulações fossem possíveis. Para tanto, foi realizada uma comparação entre a potência gerada pelas ondas do mar e a potência de um rio hipotético, visto que o programa possui a opção para uma usina hidrelétrica.

Realizou-se, então, uma comparação entre as fórmulas para o cálculo da potência gerada através das ondas oceânicas e da potência gerada por uma turbina hidráulica, conforme será demonstrado a seguir.

Como a potência das ondas oceânicas (Equação 24) resulta em kW/m, e a potência hidráulica (Equação 36) em W, multiplicou-se a Equação 24 por 1000. Foi necessário, ainda, acrescentar uma variável L na Equação 24, representando o comprimento da usina de ondas, para que as duas fórmulas tivessem as mesmas unidades resultantes (W).

A Equação 42 abaixo, que representa a equação 24 com as modificações citadas acima, fornece a potência média gerada por uma usina de ondas segundo um determinado comprimento.

$$P = 490,6 \cdot H_s^2 \cdot T_e \cdot L \quad (42)$$

Onde:

P: potência (W);

H_s : altura significativa (m);

T_e : período de energia (s).

L: comprimento da usina de conversão da energia das ondas (m).

Realizou-se, então, a comparação entre a potência gerada por uma usina de ondas oceânicas com comprimento L (Equação 42) e a potência gerada por uma turbina hidráulica (Equação 36) conforme demonstrado a seguir:

$$P_{\text{ondas}} = P_{\text{hidráulica}}$$

$$490,6 \cdot H_s^2 \cdot T_e \cdot L = \eta \cdot \rho \cdot g \cdot h \cdot Q$$

$$Q = \frac{490,6 \cdot H_s^2 \cdot T_e \cdot L}{\eta \cdot \rho \cdot g \cdot h} \quad (43)$$

Onde:

Q: vazão da turbina hidráulica (m³/s);

H_s : altura significativa (m);

T_e : período de energia (s);

- L: comprimento da usina de ondas (m);
- η : eficiência da turbina hidráulica (%);
- ρ : massa específica da água (1.000 kg/m³);
- g: aceleração da gravidade (9,81 m/s²);
- h: altura vertical ou altura de queda (m).

Utilizou-se a Equação 43 para calcular as vazões dadas por um rio hipotético, as quais são calculadas em função das alturas significativas e dos períodos de energia das ondas da região de Tramandaí.

Fixou-se o valor de 100 m, de forma arbitrária, para a altura vertical entre a linha d'água do reservatório e o eixo da turbina imaginária, e utilizou-se uma eficiência da turbina de 100% na Equação 43 para o cálculo das vazões. Esse valor de eficiência não deve ser confundido com os valores de eficiência (20 a 40%) utilizados no botão da usina hidrelétrica do *HOMER* para o cálculo da potência de saída da usina de ondas e que serão mostrados nos resultados obtidos deste trabalho.

No gráfico da Figura 36, é possível verificar a série horária dos dados de vazão obtidos pela Equação 43 para cada hora do ano de 2009. Nota-se que ao longo das 24h do dia há certa constância nos valores de vazão (linhas verticais), o que representa, em termos energéticos, que não há grandes variações na energia das ondas ao longo do dia.

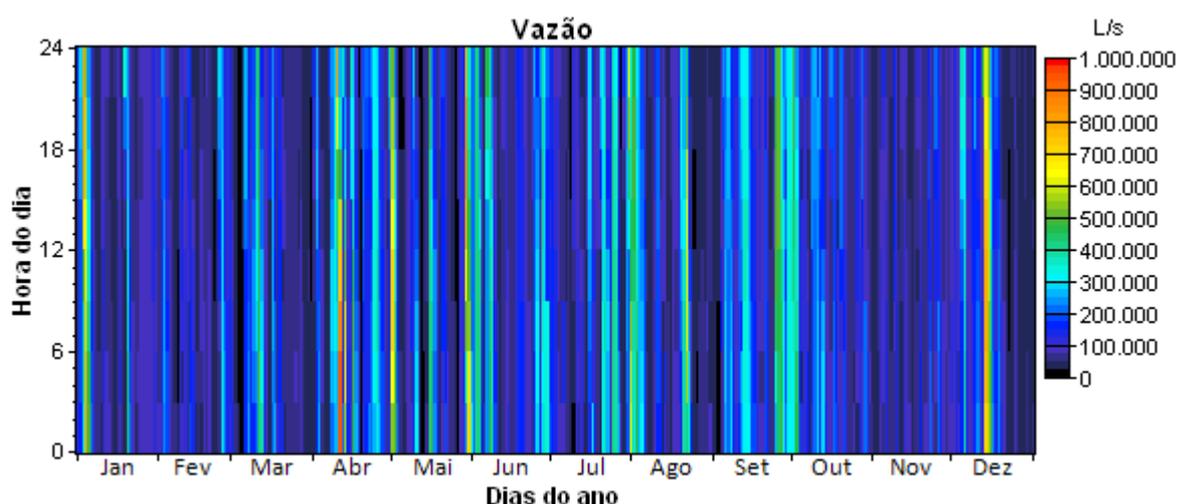


Figura 36: Série horária das vazões obtidas através da altura significativa (H_s) e do período de energia (T_e) das ondas oceânicas da região de Tramandaí/RS para o ano de 2009.

A Figura 37 apresenta um gráfico com um perfil das vazões médias mensais para a região de Tramandaí. Nesse mesmo gráfico, são apresentadas, também, as vazões máximas e mínimas para cada mês. Na última coluna do gráfico, encontra-se a média anual da vazão, que atingiu o valor aproximado de 147.112 l/s. O valor máximo da vazão para a série de dados chegou a 941.388 l/s aproximadamente.

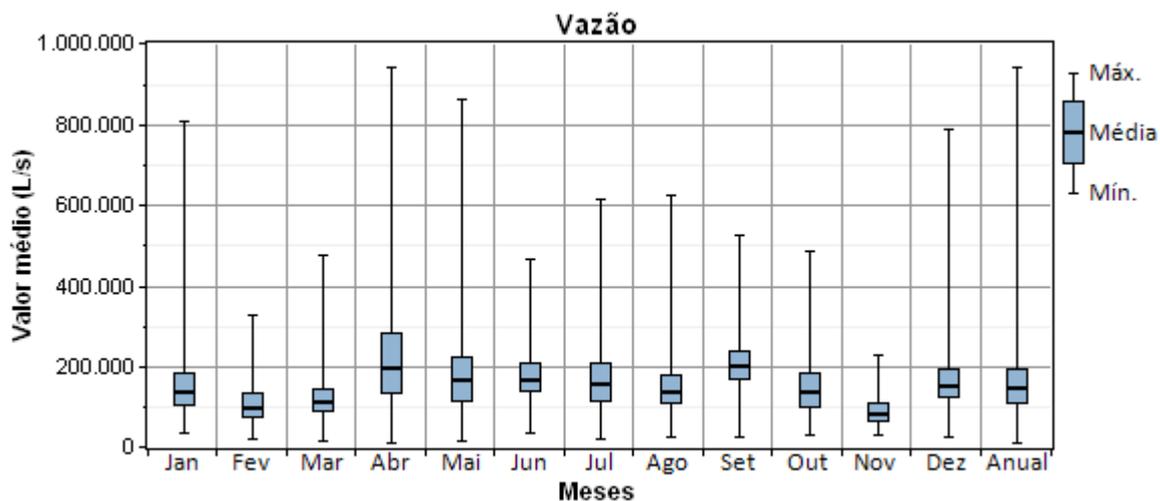


Figura 37: Vazões médias, máximas e mínimas mensais obtidas através da altura significativa (H_s) e do período de energia (T_e) das ondas oceânicas da região de Tramandaí/RS.

5.2. Demanda elétrica do litoral norte do RS

Através de contato com a CEEE, foi possível a aquisição da demanda de energia elétrica total dos municípios do litoral norte do RS para o ano de 2011. Não foi possível a aquisição por município, como planejado inicialmente, devido à complexidade da distribuição de energia na área de estudo.

O gráfico da Figura 38 apresenta um diagrama com a série de dados referente à demanda do litoral norte, ou seja, os valores da demanda do ano de 2011 para cada hora do dia. Em tal gráfico, é possível verificar que os meses de verão são os que apresentam a maior demanda, principalmente entre os horários das 20h às 24h. Também é bastante claro que o período compreendido entre a meia noite e as 8h da manhã representa o horário com a menor demanda energética.

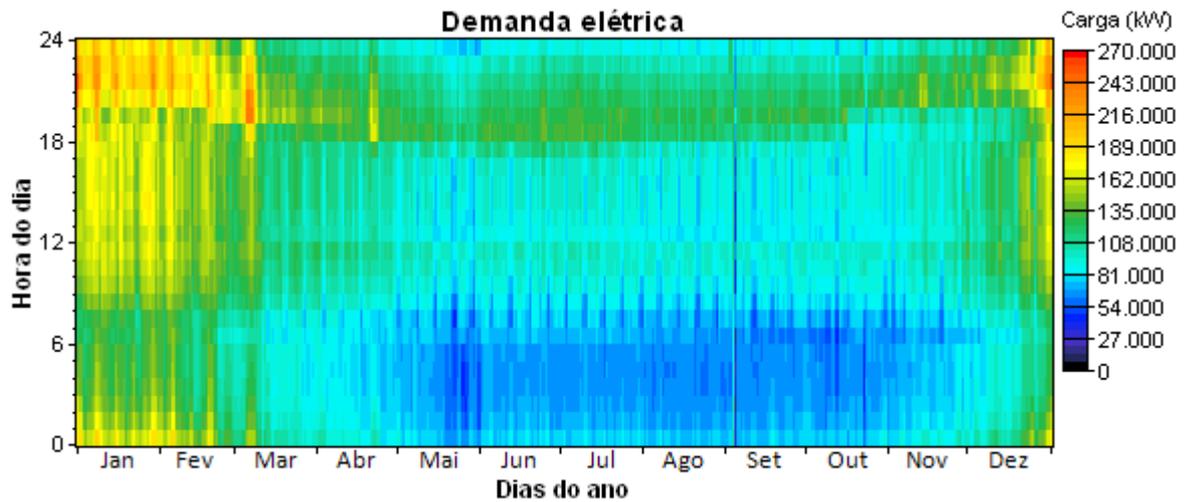


Figura 38: Demanda elétrica horária do litoral norte do RS para o ano de 2011.
Fonte: CEEE (2012)

O gráfico da Figura 39 apresenta um perfil da demanda média mensal para o litoral norte do RS, bem como as demandas máximas e mínimas mensais. A demanda (potência) média anual para a região, segundo a última coluna do gráfico em questão, é de aproximadamente 105 MW, e a potência de pico é de aproximadamente 259 MW. O consumo médio diário de energia na região é de aproximadamente 2.500 MWh/d.

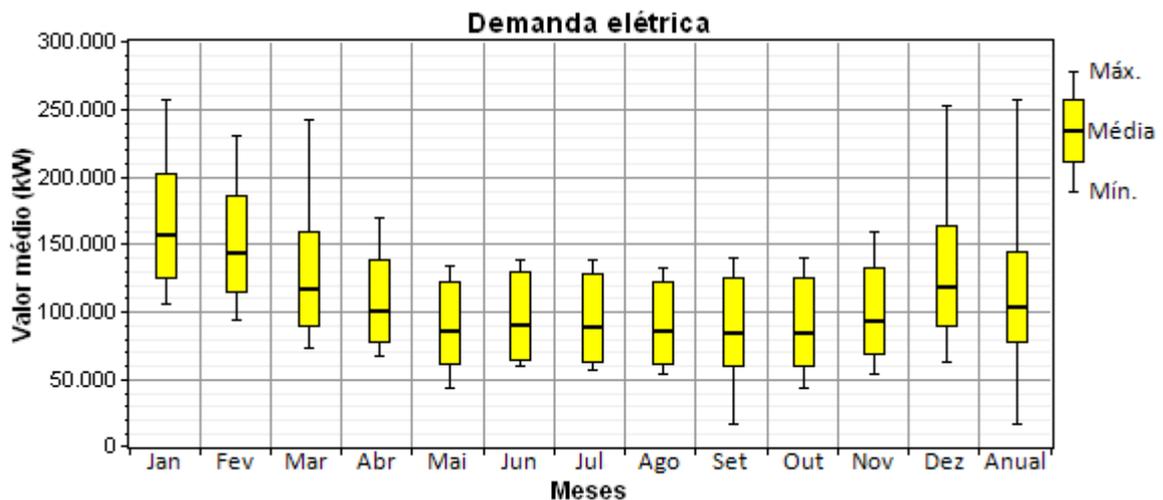


Figura 39: Médias mensais da demanda elétrica do litoral norte do RS para o ano de 2011.
Fonte: CEEE (2012)

A Tabela 10 a seguir possui as médias da demanda elétrica do litoral norte segundo as estações do ano. Como era de se esperar, o verão (principal período de deslocamento da

população para as praias do litoral norte) foi a estação que apresentou o maior valor: média de 144 MW, e o inverno foi a que apresentou o menor valor: média de 88 MW. Já o outono e a primavera tiveram demandas praticamente iguais.

Tabela 10: Média sazonal da demanda do litoral norte segundo as estações do ano de 2011.

Estações	Verão	Outono	Inverno	Primavera	Média
Demanda (MW)	144	95	88	94	105

Fonte: CEEE (2012)

Os resultados da Tabela 10 podem ser visualizados de uma forma melhor no gráfico da Figura 40.

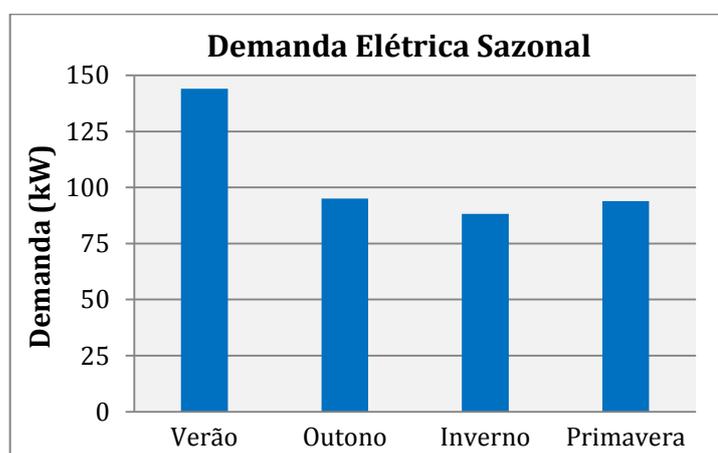


Figura 40: Demanda elétrica do litoral norte segundo as estações do ano de 2011.

Fonte: CEEE (2012)

O interessante no gráfico acima é que a demanda de energia elétrica do verão não chegou ao dobro da demanda de energia elétrica do inverno. É importante lembrar, novamente, que no período de veraneio a população do litoral norte pode aumentar em até 10 vezes. Porém, no verão, a utilização de água fria nos chuveiros, que é um dos grandes consumidores de energia elétrica, é muito comum. Nessa estação, geralmente grande parte do movimento das pessoas em direção às praias do litoral norte ocorre somente nos finais de semana e nos períodos formados pelos finais de semana e feriados, chamados informalmente de *feriadões*, o que também explica a dimensão da potência consumida na área de estudo.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Resultados do potencial energético do recurso de ondas para o litoral do RS

A Figura 41 apresenta as médias mensais do potencial energético das ondas oceânicas calculadas segundo os dados de Tramandaí/RS. O valor médio anual da potência para o recurso de ondas encontrado foi de **12 kW/m**.

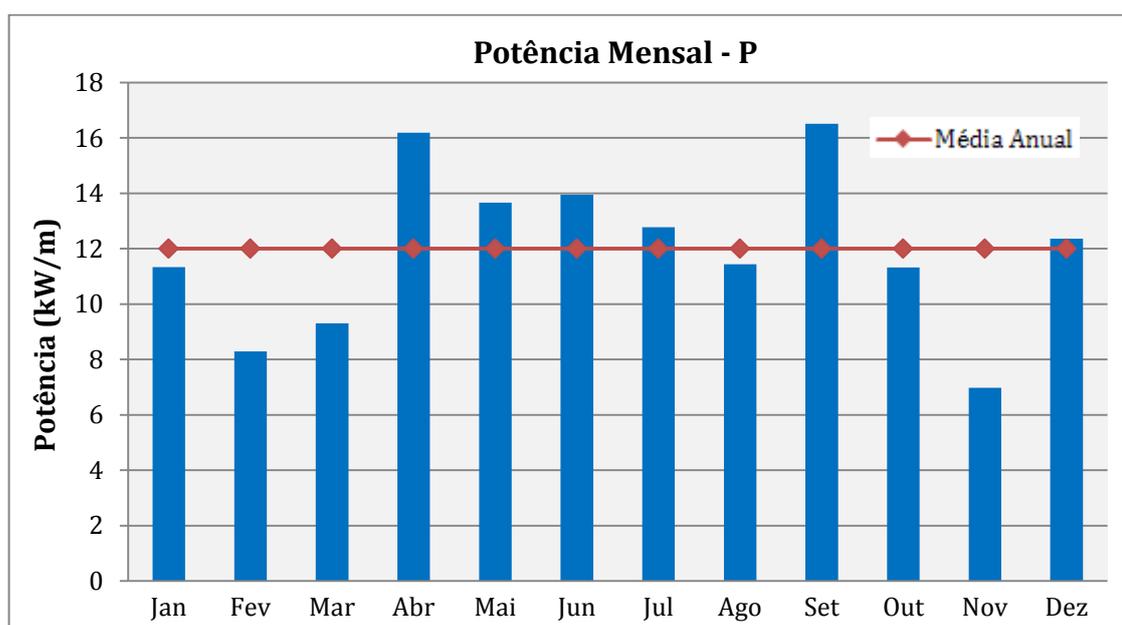


Figura 41: Médias mensais do potencial energético das ondas do mar para o litoral norte do RS. Fonte: NOAA (2009)

O valor médio anual da potência das ondas encontrado neste estudo (12 kW/m) é maior do que o valor encontrado no estudo de Assis (2008), o qual foi de aproximadamente 8,5 kW/m. Essa diferença já era esperada, pois os dados de ondas utilizados por Assis não são provenientes de águas profundas, podendo haver certa interferência das ondas com o fundo do mar. Outro fato é que pode ter havido, também no estudo de Assis, interferência devido à proximidade dos molhes de Rio Grande com o local em que os dados foram coletados.

Apesar do resultado encontrado para o potencial energético das ondas possuir como origem dados da região de Tramandaí, pode-se afirmar que, com base em estudos anteriores, a costa de todo o litoral do RS, formada por uma grande planície, apresenta uma grande similaridade em seu potencial energético. Segundo Strauch *et al.* (2009), o comportamento do clima de ondas de Rio Grande e Tramandaí é bastante similar.

Realizou-se um agrupamento dos dados de altura significativa (H_s) e de período de energia (T_e) por estação do ano e calculou-se a média desses valores, os quais se encontram na Tabela 11. Nessa mesma tabela, encontram-se os valores médios de potência em kW/m calculados através da Equação 24 e também agrupados por estação do ano.

Tabela 11: Médias sazonais das alturas significativas (H_s), dos períodos de energia (T_e) e do potencial energético (P) das ondas do mar para o litoral norte do RS.

Estações	Verão	Outono	Inverno	Primavera	Média
H_s (m)	1,46	1,51	1,59	1,66	1,55
T_e (s)	7,65	9,50	8,78	7,97	8,48
P (kW/m)	9,60	13,29	12,70	12,46	12

Fonte: NOAA (2009)

Na tabela acima, é possível verificar que o verão é a estação que possui o menor potencial energético de ondas oceânicas (9,6 kW/m) e que o outono é a estação com o maior potencial (13,29 kW/m). Tanto o inverno, quanto a primavera, apresentaram praticamente os mesmos potenciais, ou seja, 12,7 kW/m e 12,46 kW/m, respectivamente.

Através da Tabela 11, construíram-se os gráficos das Figuras 42, 43 e 44, que auxiliam na verificação visual da variação do potencial energético sazonal que é função principalmente da variação da altura significativa (H_s) da onda, o que é comprovado pela Equação 24, tendo em vista que a altura significativa se encontra elevada ao quadrado.

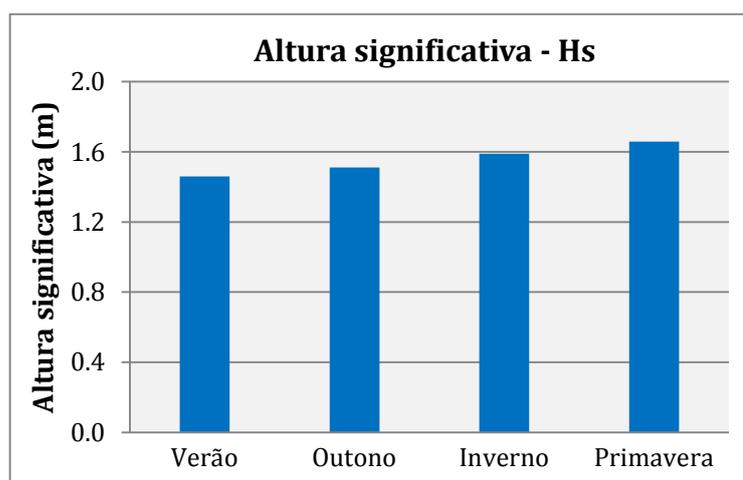


Figura 42: Médias sazonais da altura significativa das ondas do mar para o litoral norte do RS.
Fonte: NOAA (2009)

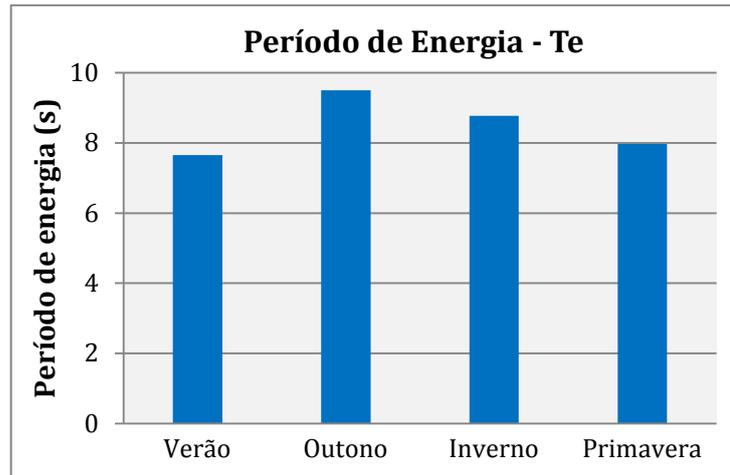


Figura 43: Médias sazonais do período de energia das ondas do mar para o litoral norte do RS.
Fonte: NOAA (2009)

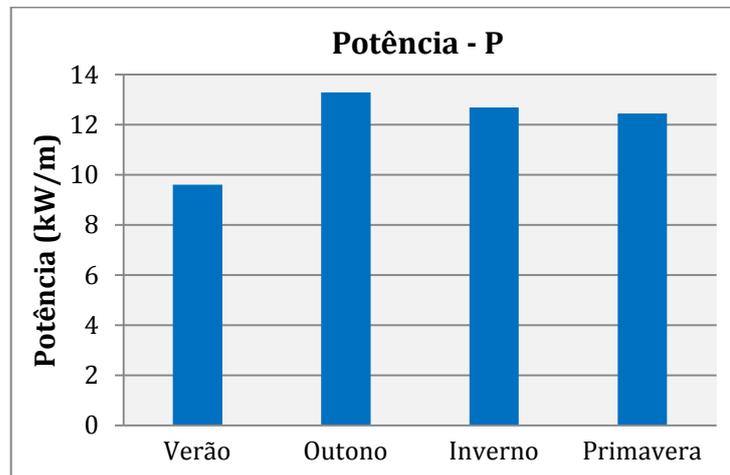


Figura 44: Médias sazonais do potencial energético das ondas do mar para o litoral norte do RS.
Fonte: NOAA (2009)

6.2. Resultados das simulações computacionais

Em todos os gráficos dos resultados obtidos através das simulações com o *HOMER* foi utilizada uma vida útil de 25 anos para a usina de conversão de energia das ondas oceânicas e um comprimento de 12 km de frente de onda para essa mesma usina, conforme mencionado anteriormente.

O sistema em estudo possui disponibilidade de radiação solar com média anual de 0,21 kW/m² (Figuras 31 e 31), disponibilidade eólica com média de velocidade de vento de 7,62 m/s (Figuras 34 e 35), disponibilidade de potencial médio anual do recurso de ondas de 12 kW/m de frente de onda (Figura 41), e demanda média de 2.500 MWh/dia (Figuras 38 e

39),. Salienta-se que parte da energia que atende à demanda do sistema em estudo provém da rede de distribuição elétrica.

Como o custo com a energia elétrica da rede de distribuição depende dos recursos energéticos disponíveis no país a cada momento, ou seja, é muito variável, as simulações foram realizadas com 3 custos distintos de energia: US\$ 0,15; US\$ 0,10 e US\$ 0,05 (R\$ 0,30; R\$ 0,20 e R\$ 0,10; respectivamente). Para não tornar esta dissertação muito longa, optou-se por apresentar todos os resultados obtidos com o custo de energia de R\$ 0,30 (Figuras 45 a 78), e os principais resultados com os custos de energia de R\$ 0,20 e R\$ 0,10.

6.2.1. Resultados com custo da energia da rede de distribuição de R\$ 0,30/kWh

Gráficos Eficiência da Usina de Ondas x Capital da Usina de ondas

Utilizou-se a eficiência como variável de sensibilidade para verificação de sua influência no custo da usina de ondas (Figura 45 a 49). A faixa de valores de eficiência da usina de ondas utilizada foi de 20 a 40% (eixo vertical dos gráficos). A eficiência inicial de 20% teve como referência a tecnologia de conversão de energia de ondas que está sendo testada no Porto de Pecém, que possui 20% de eficiência aproximadamente, e o valor máximo de 40% foi estabelecido com base em um caso futuro, em que alguma tecnologia de conversão de energia de ondas atingisse um estado de maturação, como é o caso das modernas tecnologias eólicas, que podem atingir até 40% de eficiência atualmente.

Variaram-se, também, os valores com o custo dos PVs. Essa variação foi realizada a fim de se encontrar um custo mínimo de PV que os tornassem viáveis economicamente. Os valores utilizados foram: R\$ 10,00; R\$ 4,50; R\$ 4,00; R\$ 3,50 e R\$ 3,00/W (US\$ 4,92; US\$ 2,22; US\$ 1,97; US\$ 1,72 e US\$ 1,48/W; respectivamente). Na realidade, foram utilizados vários outros valores intermediários de custos com PVs nas simulações. Entretanto, escolheram-se apenas os valores que influenciavam na viabilidade de inserção dos PVs no sistema em estudo.

Os valores mínimos e máximos iniciais utilizados nas simulações para o custo da usina de ondas foram de US\$ 200.000.000,00 e US\$ 1.200.000.000,00 (eixo horizontal dos gráficos). Esses valores foram arbitrados.

No gráfico da Figuras 45, a região azul representa o sistema Rede/Vento/Ondas no qual a usina de ondas é economicamente viável. A solução ótima não incluiu os PVs nos 2 sistemas do gráfico, indicando que o valor inicial utilizado para o custo dos PVs, fixado em R\$ 10,00/W, é muito alto. Observa-se claramente o limite de viabilidade (divisão entre os 2 sistemas do gráfico) para aplicação em uma tecnologia de conversão de energia das ondas. Salienta-se que esse limite se comporta quase como uma reta. Nesse mesmo gráfico, verifica-se que à medida que a eficiência da usina de ondas aumenta, o valor máximo para investimento na própria usina também aumenta, o que está totalmente coerente, já que para valores mais altos de eficiência há uma maior produção de energia.

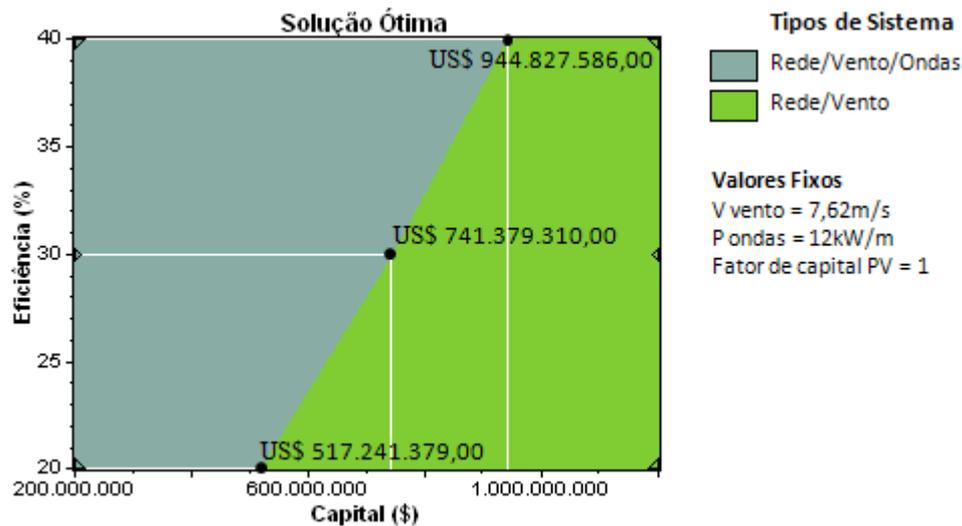


Figura 45: Resultados de simulação do sistema em estudo, com valor inicial do custo dos painéis fotovoltaicos (PVs) fixado em R\$ 10,00/W.

Os valores máximos (limite) de custo de implantação de uma usina de ondas segundo as eficiências de 40, 30 e 20% indicados na Figura 45 encontram-se a seguir:

- **40%: US\$ 944.827.586,00 = R\$ 1.919.228.275,00 (R\$ 12,80/W);**
- **30%: US\$ 741.379.310,00 = R\$ 1.505.963.792,00 (R\$ 10,00/W);**
- **20%: US\$ 517.241.379,00 = R\$ 1.050.672.413,00 (R\$ 7,00/W).**

O limite de viabilidade da usina de ondas representa os valores máximos que podem ser investidos na usina de ondas. Para valores acima desse limite, a usina de ondas não é mais viável economicamente.

É importante ressaltar que o programa *HOMER* apresenta um detalhamento de informações muito mais rico do que o apresentado no gráfico da Figura 45. Um exemplo desse detalhe encontra-se na Figura 46, que apresenta todas as configurações (combinações)

de sistemas simulados no *HOMER* ordenados pelo Custo Total Presente Líquido (CTPL) para o seguinte ponto da Figura 45: **Eficiência da usina de ondas de 40% x Capital da usina de ondas de US\$ 944.827.586,00**. Para gerar o gráfico da Figura 46, bastou apenas um clique sobre o ponto em questão no próprio programa *HOMER*. Como o foco deste trabalho é a apresentação da solução ótima (sistema mais viável economicamente), esse detalhamento não será mostrado nos demais resultados deste estudo.

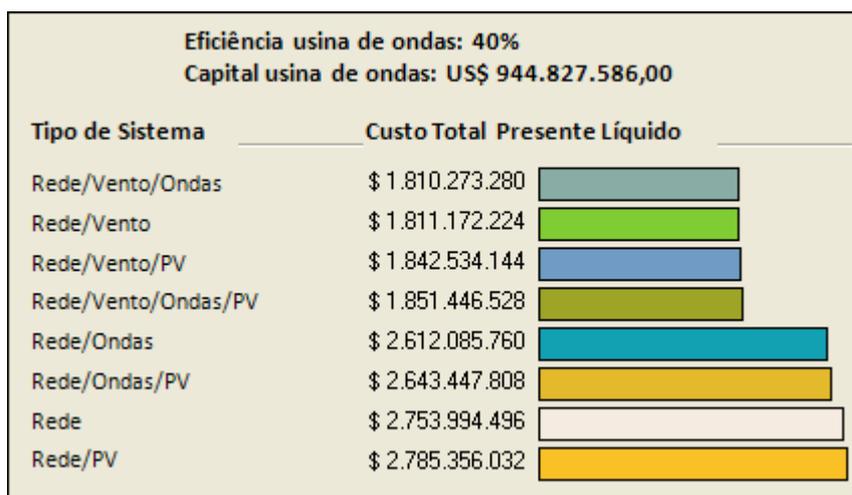


Figura 46: Combinação dos sistemas possíveis, ordenados pelo CTPL, referente ao seguinte ponto da Figura 45: eficiência da usina de ondas de 40% e custo de US\$ 944.827.586,00.

Na Figura 47 (custo com PVs de R\$ 4,50/W), os PVs tornam-se viáveis na região onde a usina de ondas não é mais viável, o que ainda indica um valor alto frente à disponibilidade do recurso de ondas. Nas Figuras 48 e 49 (custos com PVs de R\$ 4,00 e R\$ 3,50/W, respectivamente), os PVs passam a compor parcialmente o sistema híbrido formado, também, pela usina de ondas, até tornarem-se totalmente viáveis (Figura 50), quando o valor do custo dos PVs é reduzido para 30% do valor inicial, ou seja, quando o valor atinge **R\$ 3,00/W**. O limite de viabilidade para a usina de ondas apresentado nas figuras 47 a 50 é o mesmo limite da Figura 45.

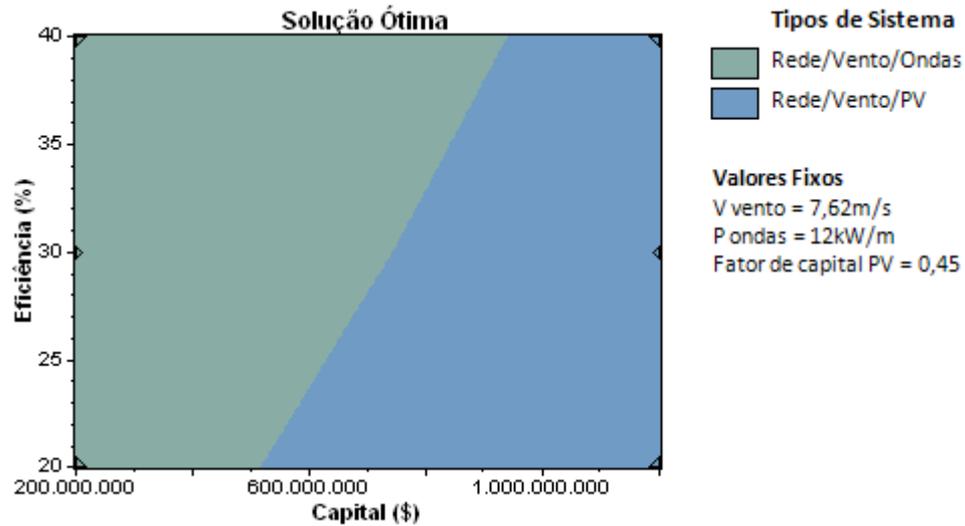


Figura 47: Resultados de simulação do sistema em estudo - custo dos PVs: R\$ 4,50/W.

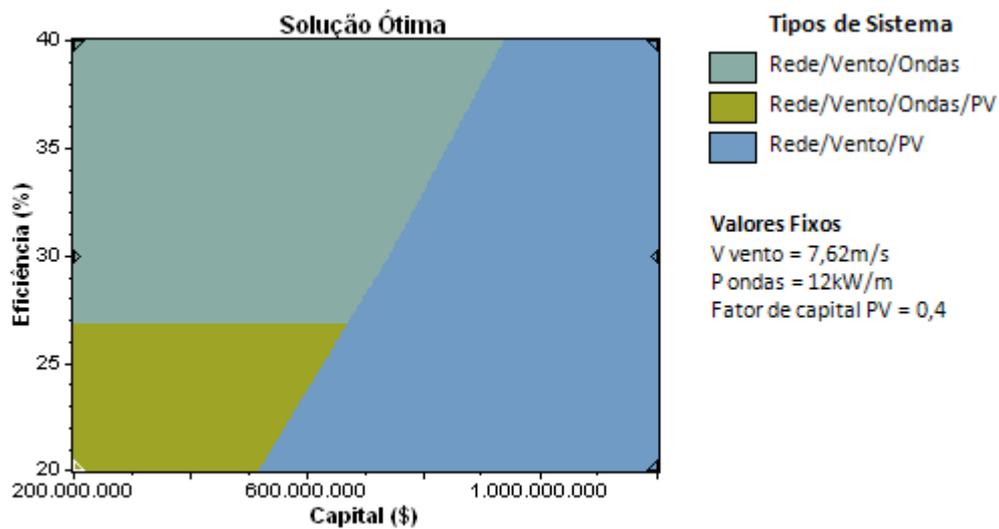


Figura 48: Resultados de simulação do sistema em estudo - com custo dos PVs: R\$ 4,00/W.

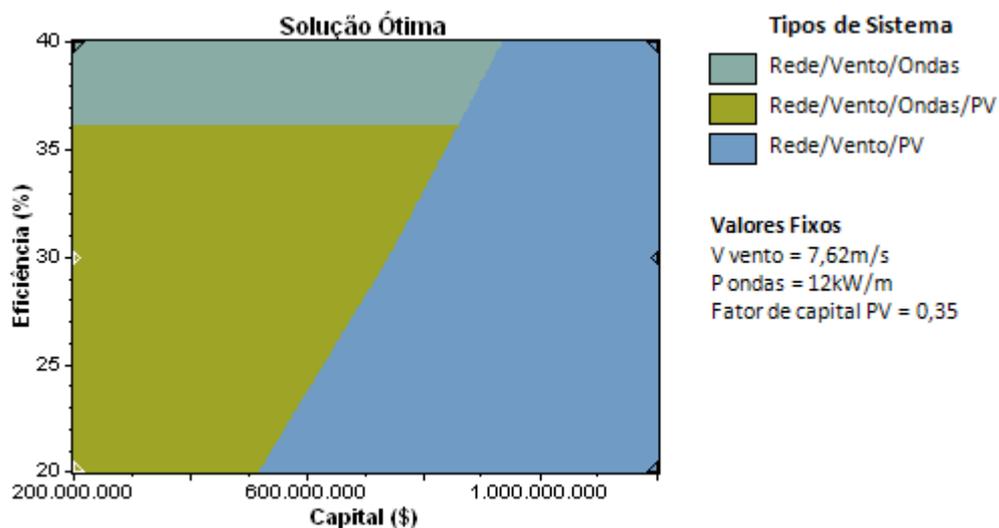


Figura 49: Resultados de simulação do sistema em estudo - custo dos PVs: R\$ 3,50/W.

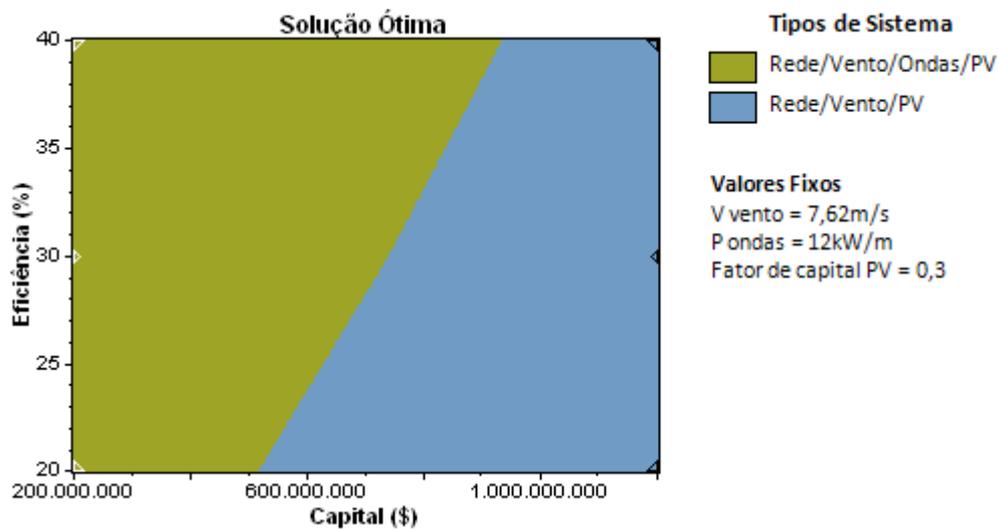


Figura 50: Resultados de simulação do sistema em estudo - custo dos PVs: R\$ 3,00/W.

Na Figura 51, apresenta-se um gráfico com o custo médio da energia gerada por todo o sistema híbrido de energia para qualquer ponto Eficiência x Capital da solução ótima apresentada na Figura 50.

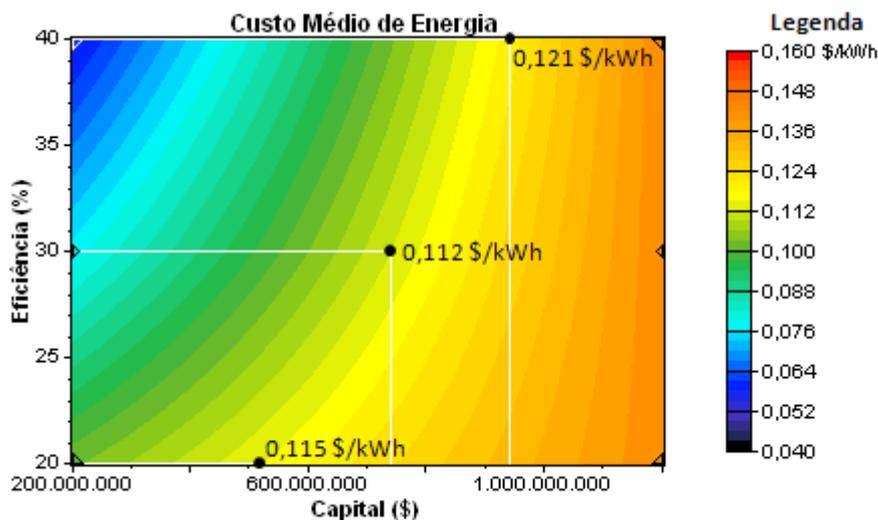


Figura 51: Valores do custo médio de energia do sistema em estudo - custo dos PVs: R\$ 3,00/W.

Os 3 pontos de custo médio de energia da Figura 51 foram plotados exatamente nos pontos que indicam os valores máximos de investimento da usina de ondas que foram apresentados na Figura 45. Esses 3 valores encontram-se a seguir:

- Eficiência de 40%: 0,121 \$/kWh = 0,246 R\$/kWh;
- Eficiência de 30%: 0,112 \$/kWh = 0,228 R\$/kWh;
- Eficiência de 20%: 0,115 \$/kWh = 0,234 R\$/kWh.

Gráficos Potencial (Vazão) da Usina de Ondas x Capital da Usina de ondas

Como o valor da potência média anual de 12 kW/m encontrado neste estudo pode apresentar algum erro em virtude do local de coleta das informações do recurso de ondas, ou até mesmo devido ao fato de que os dados de onda utilizados são somente do ano de 2009, decidiu-se realizar uma análise de sensibilidade para a potência média anual da usina de ondas para verificação da influência dessa variação sobre o custo da usina de ondas. A faixa de valores utilizados de potência média anual da usina de ondas foi de 10 a 15 kW/m de frente de onda, e está representada pelas vazões no eixo vertical dos gráficos, as quais foram calculadas em função dos parâmetros de onda H_s e T_e , conforme discutido anteriormente.

Os valores mínimos e máximos iniciais utilizados nas simulações para o custo da usina de ondas foram mantidos os mesmos: US\$ 200.000.000,00 e US\$ 1.200.000.000,00.

Além da análise de sensibilidade sobre o potencial da usina de ondas, variou-se a eficiência da usina de ondas, a qual foi fixada em 40, 30 e 20%. Essa variação foi realizada com o propósito principal de se verificar a influência da eficiência sobre o custo de investimento da usina.

Realizou-se, também, uma variação dos valores com o custo dos PVs, que foram fixados em R\$ 10,00; R\$ 4,50; R\$ 4,00; R\$ 3,50 e R\$ 3,00/W (US\$ 4,92; US\$ 2,22; US\$ 1,97; US\$ 1,72 e US\$ 1,48/W; respectivamente). Essa variação foi realizada a fim de se encontrar um custo mínimo de viabilidade econômica para os PVs.

As Figuras 52 a 54 apresentam as soluções ótimas da análise de sensibilidade sobre o potencial da usina de ondas para uma usina com eficiência (E) de 40, 30 e 20%, respectivamente. Novamente, as soluções ótimas não incluem os PVs nos 2 sistemas presentes nos 3 gráficos indicando que o valor inicial utilizado para o custo dos PVs, fixado em R\$ 10,00/W, é muito alto. Observa-se claramente o limite de viabilidade para aplicação na usina de ondas (divisão entre os 2 sistemas do gráfico). Verifica-se que à medida que a eficiência da usina de ondas diminui, a linha que define a área de viabilidade da usina se desloca para à esquerda, o que indica claramente que se deve investir menos em uma usina que possui uma produção de energia elétrica menor. Nesses mesmos gráficos, traçaram-se retas que indicam a potência média anual da usina de ondas.

Os resultados apresentados nas Figuras 55 a 62 mostram a influência conjunta do potencial disponível e dos custos sobre a viabilidade da usina de ondas.

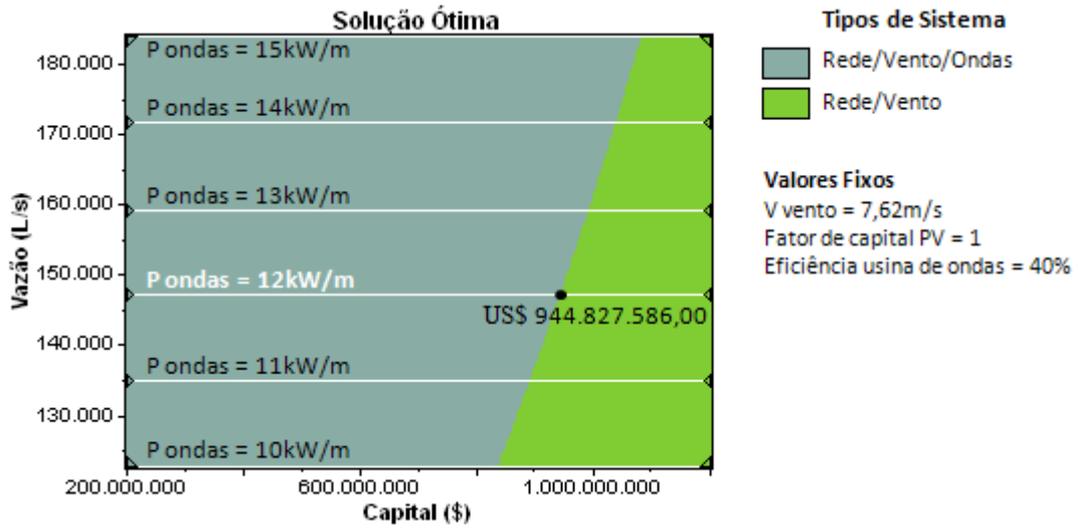


Figura 52: Resultados da análise de sensibilidade da potência da usina de ondas (E = 40%).

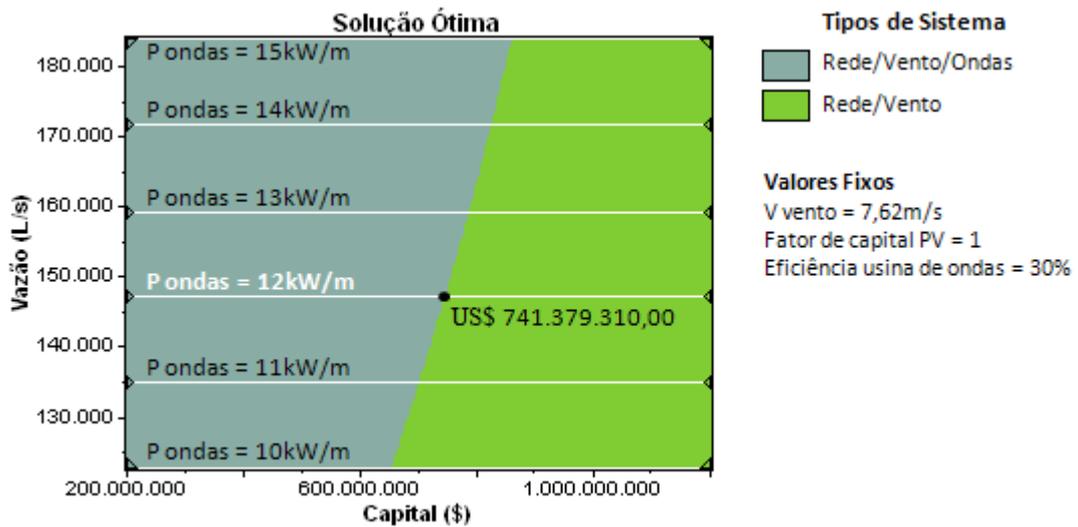


Figura 53: Resultados da análise de sensibilidade da potência da usina de ondas (E = 30%).

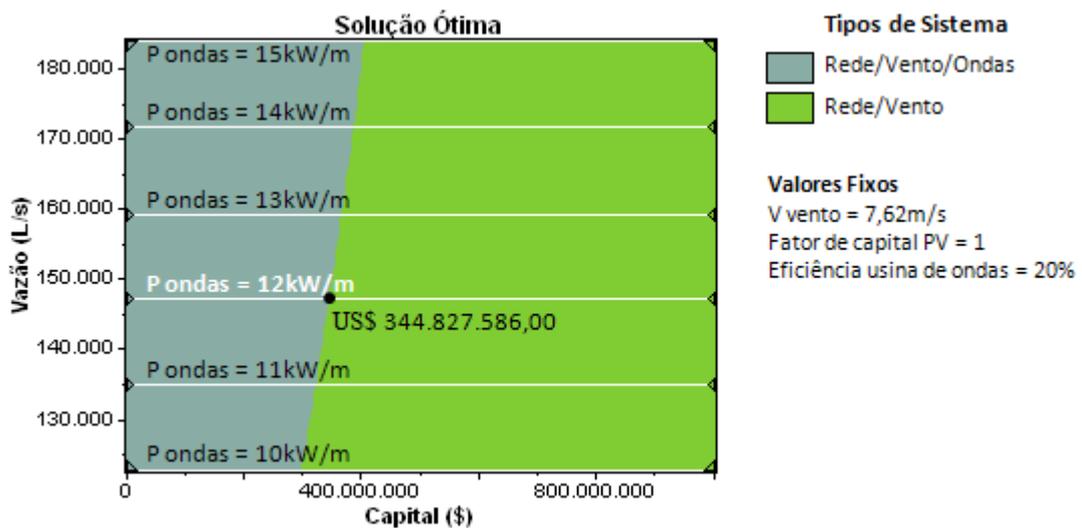


Figura 54: Resultados da análise de sensibilidade da potência da usina de ondas (E = 20%).

Os valores máximos de investimento da usina de US\$ 944.827.586,21, US\$ 741.379.310,34 e US\$ 517.241.379,31 indicados nos 3 gráficos anteriores (Figuras 52 a 54) são os mesmos valores apresentados na Figura 45.

As Figuras 55 e 56 apresentam a solução ótima para uma usina de ondas com eficiência (E) de 40% e custo dos PVs de R\$ 4,50 e R\$ 3,00/W, respectivamente. Na Figura 55, os PVs somente são viáveis na região à direita, onde a usina de ondas não é mais viável, indicando que o valor com o custo dos PVs ainda é alto frente à disponibilidade do recurso de ondas. A redução do custo com os PVs para **R\$ 3,00/W** (Figura 56), permite com que os PVs participem de todos os 2 sistema da solução ótima.

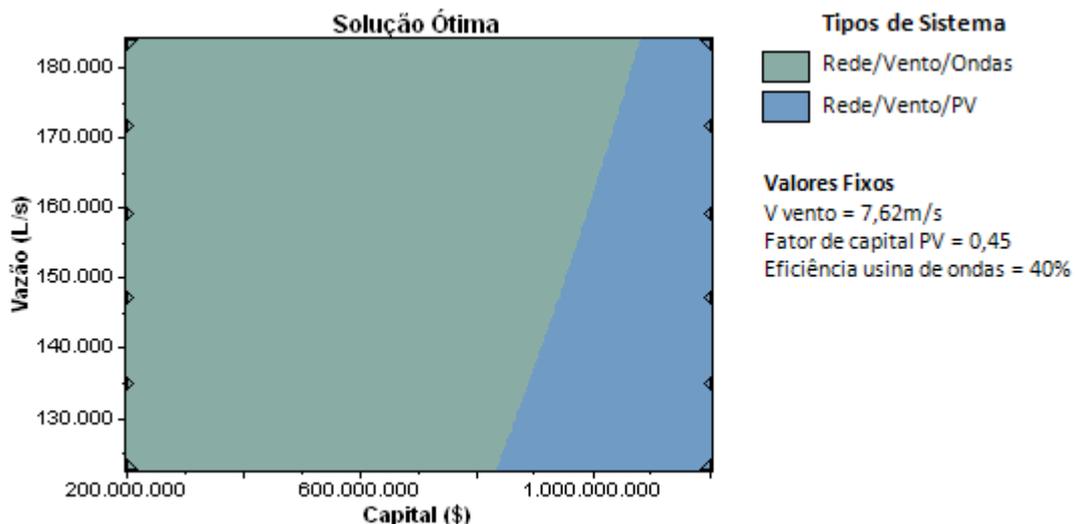


Figura 55: Resultados da análise de sensibilidade da potência da usina de ondas (E = 40%) para um custo com os PVs de R\$ 4,50/W.

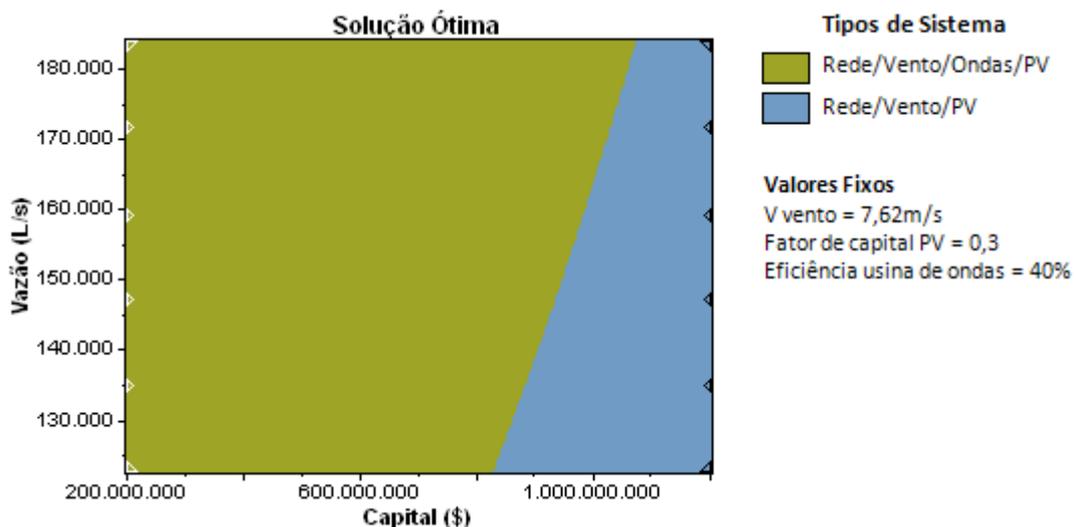


Figura 56: Resultados da análise de sensibilidade da potência da usina de ondas (E = 40%) para um custo com os PVs de R\$ 3,00/W.

O limite de viabilidade da usina de ondas apresentado nos 2 gráficos das figuras anteriores é o mesmo da Figura 52.

As Figuras 57 a 59 apresentam a solução ótima para uma usina de ondas com eficiência (E) de 30% e custo com os PVs de R\$ 4,50; R\$ 3,50 e R\$ 3,00/W, respectivamente.

Na Figura 57, os PVs somente são viáveis na região à direita, onde a usina de ondas não é mais viável, indicando que o valor com o custo dos PVs (R\$ 4,50/W) ainda é alto frente à disponibilidade do recurso de ondas. Na Figura 58, com redução do custo dos PVs para R\$ 3,50/W, os PVs passam a compor quase a totalidade da região formada pelos 2 sistemas da solução ótima.

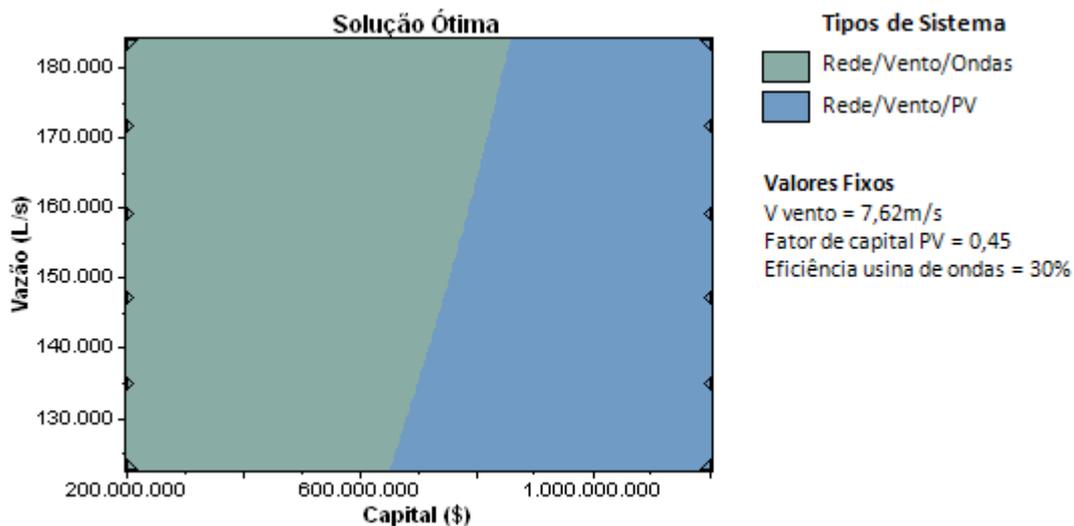


Figura 57: Resultados da análise de sensibilidade da potência da usina de ondas (E = 30%) para um custo com os PVs de R\$ 4,50/W.

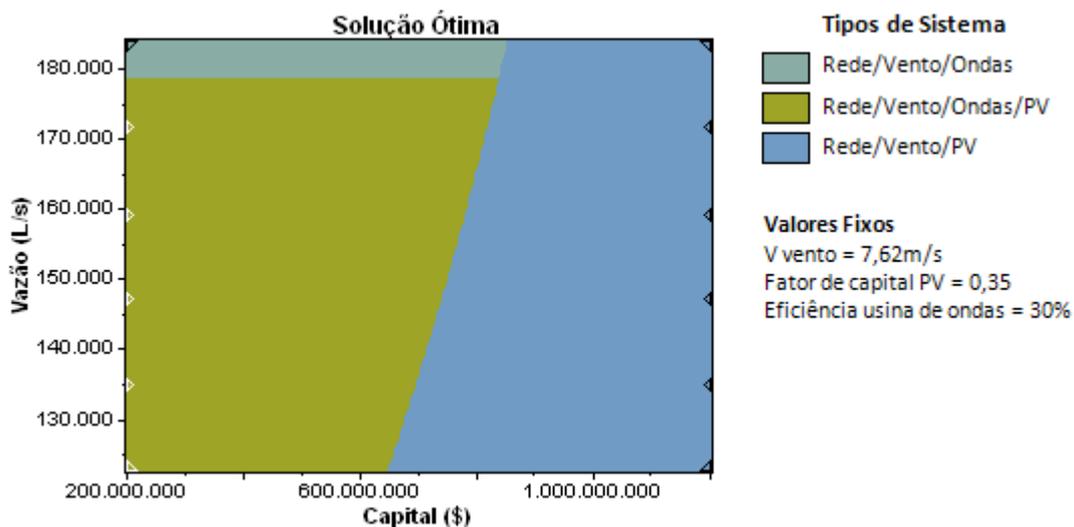


Figura 58: Resultados da análise de sensibilidade da potência da usina de ondas (E = 30%) para um custo com os PVs de R\$ 3,50/W.

A redução do custo com os PVs para **R\$ 3,00/W** (Figura 59), permite com que os PVs participem de todos os 2 sistemas da solução ótima. O limite de viabilidade da usina de ondas apresentado nesses 3 gráficos é o mesmo da Figura 53.

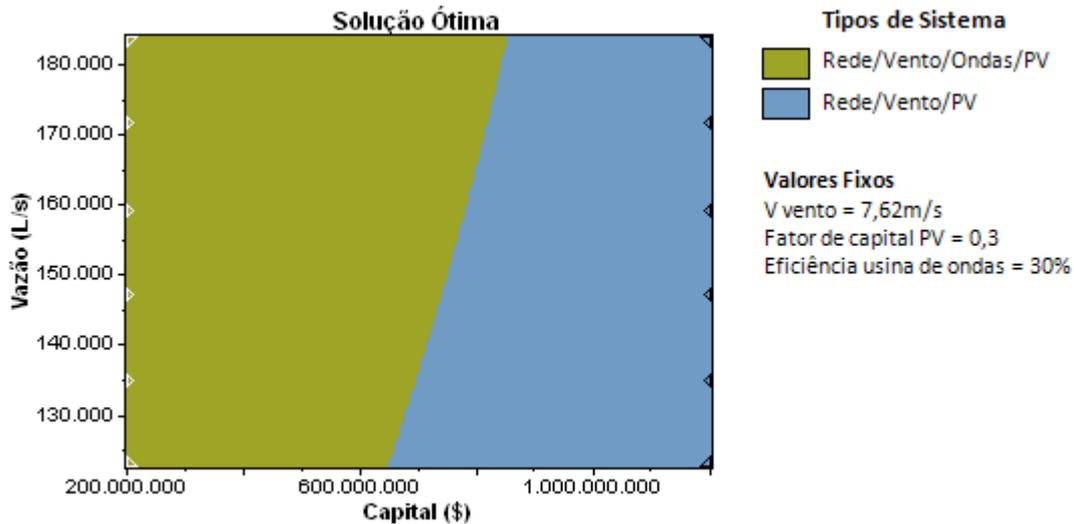


Figura 59: Resultados da análise de sensibilidade da potência da usina de ondas ($E = 30\%$) para um custo com os PVs de R\$ 3,00/W.

As Figuras 60 a 62 apresentam a solução ótima para uma usina de ondas com eficiência (E) de 20% e custo com os PVs de R\$ 4,50; R\$ 4,00 e R\$ 3,50/W, respectivamente.

Na Figura 60, os PVs somente são viáveis na região à direita, onde a usina de ondas não é mais viável, indicando que o valor com o custo dos PVs (R\$ 4,50/W) ainda é alto frente à disponibilidade do recurso de ondas.

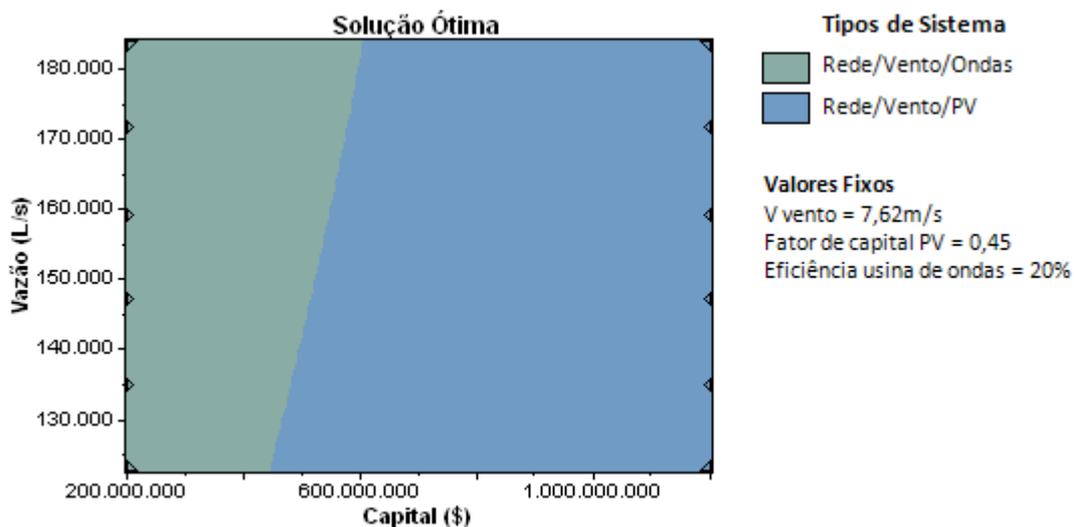


Figura 60: Resultados da análise de sensibilidade da potência da usina de ondas ($E = 20\%$) para um custo com os PVs de R\$ 4,50/W.

Na Figura 61, com redução do custo dos PVs para R\$ 4,00/W, os PVs passam a compor também grande parte da região formada pelo sistema que inclui a usina de ondas. A redução do custo com os PVs para **R\$ 3,50/W** (Figura 62), permite com que os PVs participem completamente de todos os 2 sistemas da solução ótima. O limite de viabilidade da usina de ondas apresentado nesses 3 gráficos é o mesmo da Figura 54.

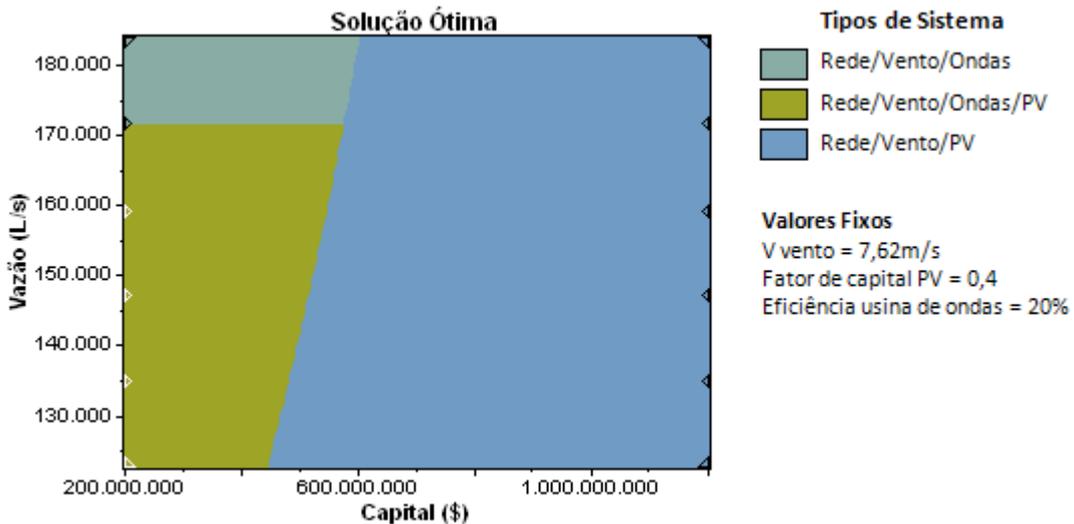


Figura 61: Resultados da análise de sensibilidade da potência da usina de ondas (E = 20%) para um custo com os PVs de R\$ 4,00/W.

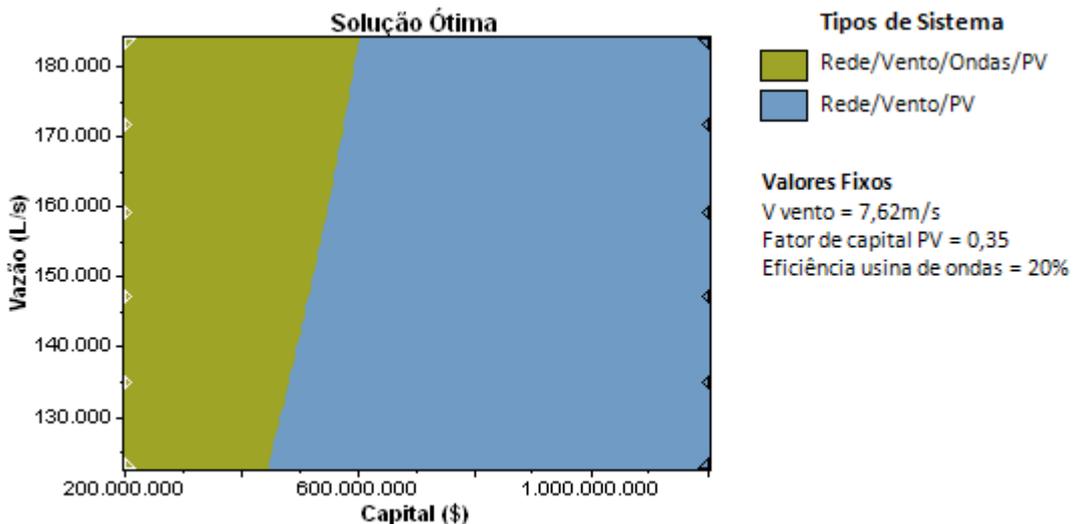


Figura 62: Resultados da análise de sensibilidade da potência da usina de ondas (E = 20%) para um custo com os PVs de R\$ 3,50/W.

Gráficos Velocidade do Vento x Capital da Usina de ondas

Decidiu-se realizar, também, uma análise de sensibilidade sobre a velocidade média anual do vento com a finalidade de se verificar a influência do aumento e da diminuição da velocidade média anual do vento sobre o custo da usina de ondas. Para tanto, utilizou-se a seguinte faixa para a velocidade do vento: 6 a 10 m/s (eixo vertical dos gráficos).

Os valores mínimos e máximos iniciais utilizados nas simulações para o custo da usina de ondas continuam os mesmos: US\$ 200.000.000,00 e US\$ 1.200.000.000,00.

Além da análise de sensibilidade sobre o potencial da usina de ondas, variou-se a eficiência da usina de ondas, a qual foi fixada novamente em 40, 30 e 20% no intuito de verificação da influência da eficiência sobre o custo de investimento da usina.

Manteve-se, novamente, uma variação dos valores com o custo dos PVs a fim de se encontrar um custo mínimo de viabilidade econômica para os PVs. Os valores foram fixados em R\$ 10,00; R\$ 4,50; R\$ 4,00; R\$ 3,50, R\$ 3,00/W e R\$ 2,50/W (US\$ 4,92; US\$ 2,22; US\$ 1,97; US\$ 1,72; US\$ 1,48 e US\$ 1,23/W; respectivamente).

As Figuras 63 a 65 apresentam as soluções ótimas da análise de sensibilidade sobre a velocidade do vento para uma usina com eficiência (E) de 40, 30 e 20%, respectivamente. Novamente, as soluções ótimas não incluem os PVs nos 2 sistemas presentes nos 3 gráficos indicando que o valor inicial utilizado para o custo dos mesmos, fixado em R\$ 10,00/W, é muito alto. Observa-se claramente o limite de viabilidade para aplicação na usina de ondas (divisão entre os 2 sistemas do gráfico). Verifica-se que à medida que a eficiência da usina de ondas diminui, o limite de viabilidade da usina se desloca novamente para à esquerda, indicando claramente que quanto menor for a eficiência da usina, ou seja, quanto menor for a sua produção de energia elétrica, menor deverá ser o investimento na usina de ondas.

Há uma diferença nesses gráficos quanto à inclinação no limite de viabilidade da usina de ondas. Verifica-se que quanto maior é a velocidade do vento, menor deve ser o investimento na usina de ondas. Isso é explicado pela maior disponibilização do recurso eólico frente à disponibilidade do recurso de ondas, que permanece com uma média sempre igual (12k W/m). Nesses gráficos, traçou-se uma reta que indica a velocidade média anual do vento para a região de Osório.

Os gráficos das Figura 63 a 78 mostram a influência conjunta da disponibilidade eólica e dos custos sobre a viabilidade da usina de ondas.

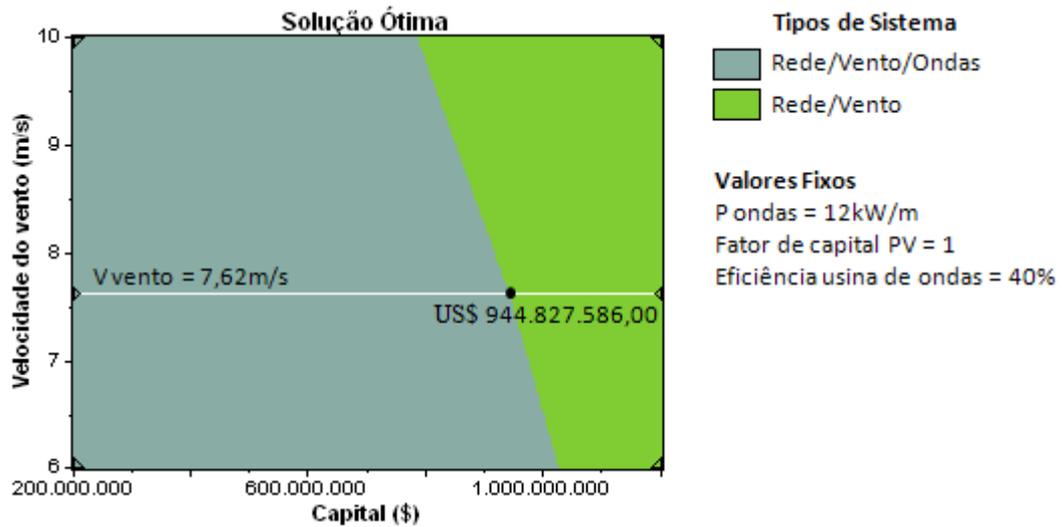


Figura 63: Resultados da análise de sensibilidade da velocidade do vento (E = 40%).

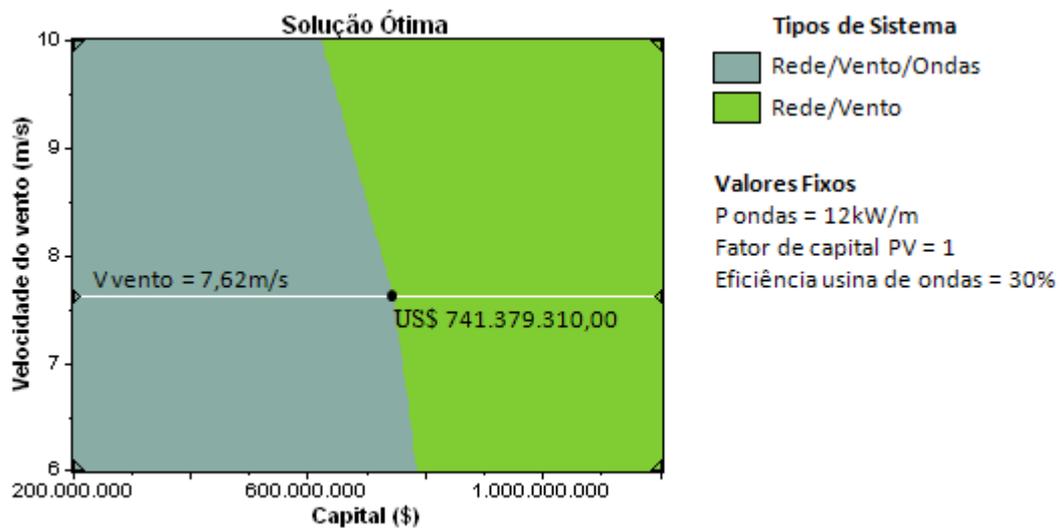


Figura 64: Resultados da análise de sensibilidade da velocidade do vento (E = 30%).

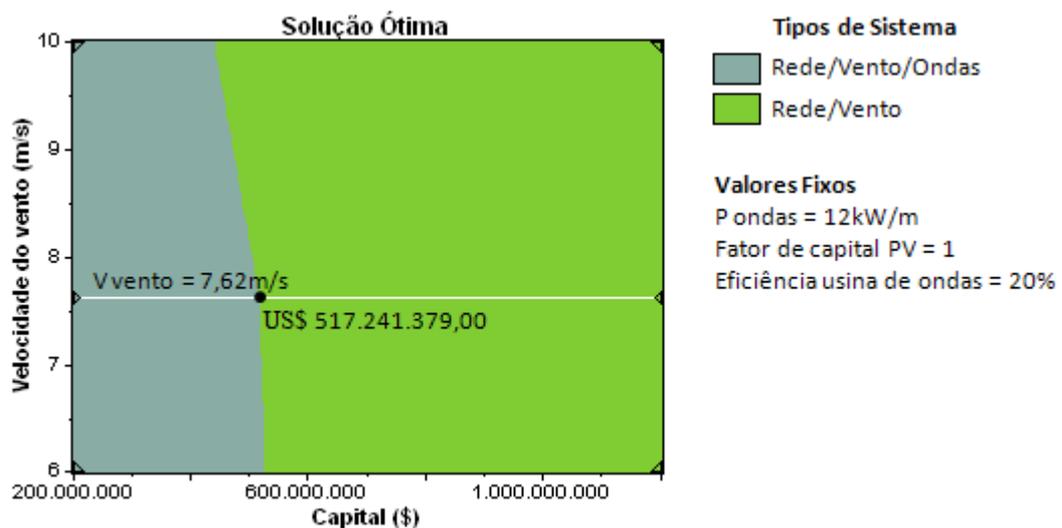


Figura 65: Resultados da análise de sensibilidade da velocidade do vento (E = 20%).

Os valores máximos de investimento da usina de US\$ 944.827.586,00, US\$ 741.379.310,00 e US\$ 517.241.379,00 indicados nos 3 gráficos anteriores (Figuras 63 a 65) são os mesmos valores apresentados na Figura 45.

As Figuras 66 e 67 apresentam a solução ótima para uma usina de ondas com eficiência (E) de 40% e custo dos PVs de R\$ 4,50; R\$ 4,00; R\$ 3,50; R\$ 3,00 e R\$ 2,50/W, respectivamente. Na Figura 66, os PVs somente são viáveis em grande parte do sistema da região à direita, onde a usina de ondas não é mais viável, indicando que o valor com o custo dos PVs ainda é alto frente à disponibilidade do recurso de ondas. Na Figura 67, os PVs passam a ser completamente viáveis na região à direita.

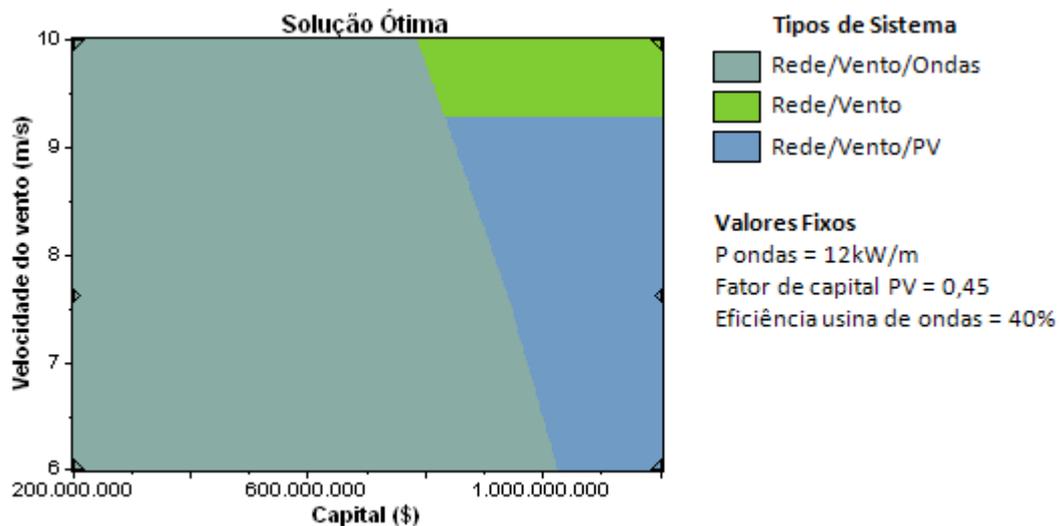


Figura 66: Resultados da análise de sensibilidade da velocidade do vento (E = 40%) para um custo com os PVs de R\$ 4,50/W.

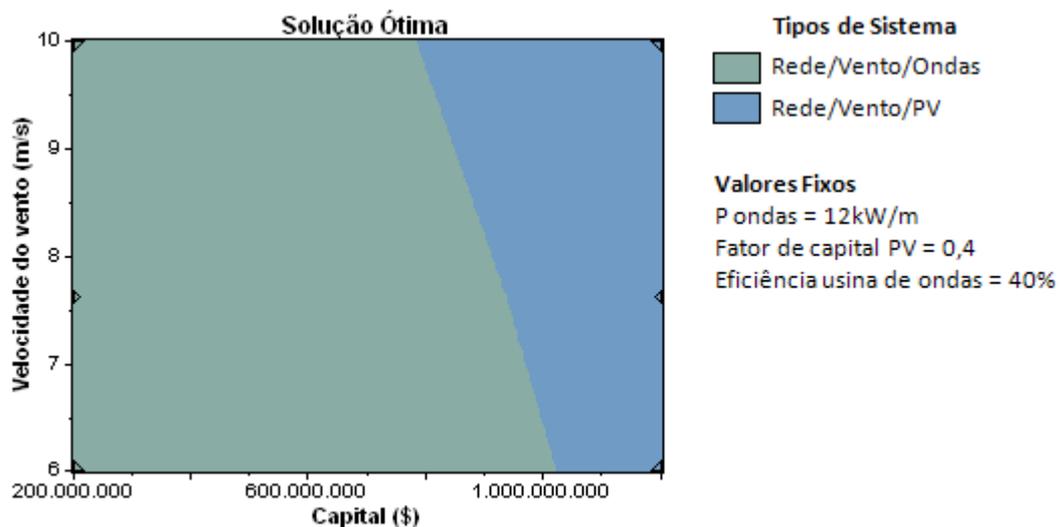


Figura 67: Resultados da análise de sensibilidade da velocidade do vento (E = 40%) para um custo com os PVs de R\$ 4,00/W.

À medida que acontece a redução do custo com os PVs, os mesmos passam a compor o sistema formado também pela usina de ondas, até tornarem-se totalmente viáveis para qualquer ponto da solução ótima, quando o valor com o custo dos PVs atinge **R\$ 2,50/W** (Figura 70). O limite de viabilidade da usina de ondas apresentado nesses 5 gráficos é o mesmo da Figura 63.

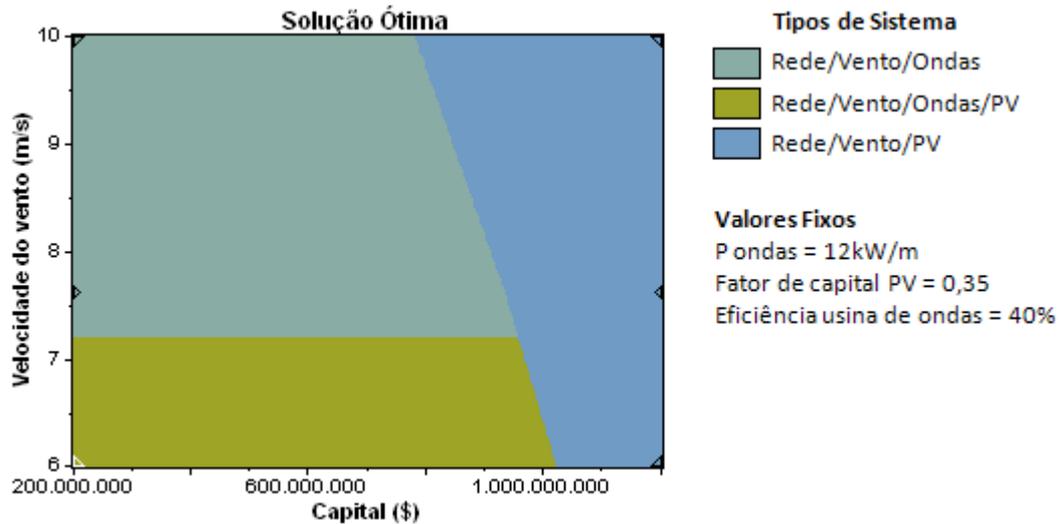


Figura 68: Resultados da análise de sensibilidade da velocidade do vento ($E = 40\%$) para um custo com os PVs de R\$ 3,50/W.

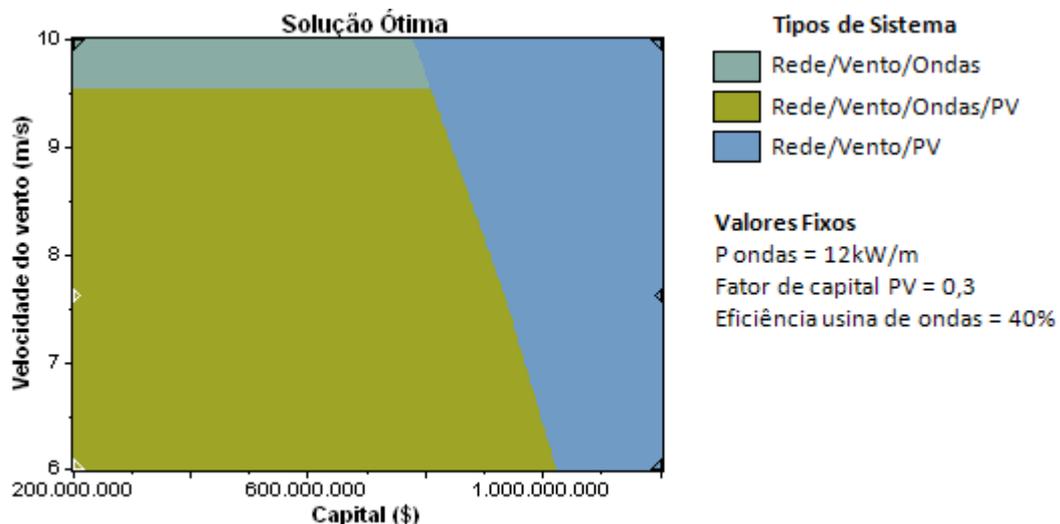


Figura 69: Resultados da análise de sensibilidade da velocidade do vento ($E = 40\%$) para um custo com os PVs de R\$ 3,00/W.

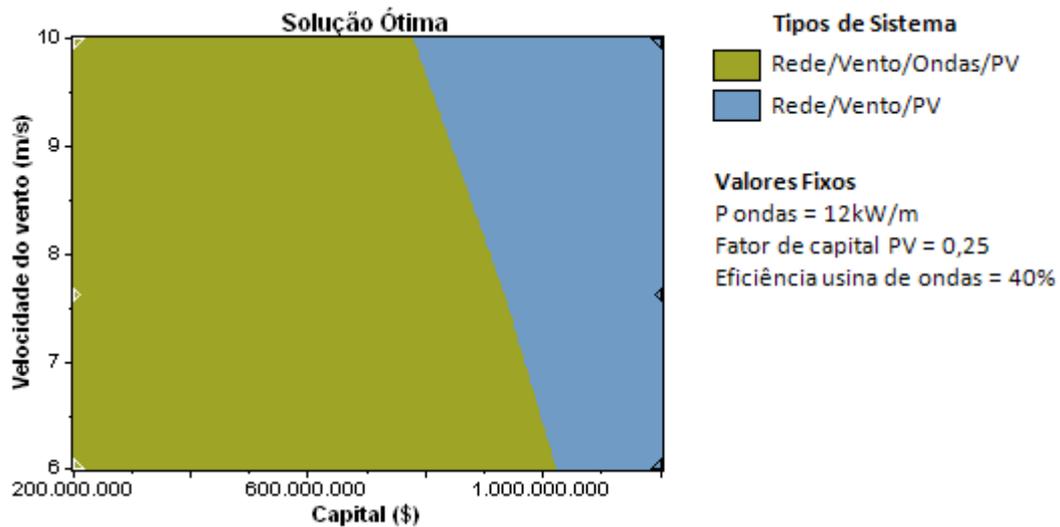


Figura 70: Resultados da análise de sensibilidade da velocidade do vento ($E = 40\%$) para um custo com os PVs de R\$ 2,50/W.

As Figuras 71 a 74 apresentam a solução ótima para uma usina de ondas com eficiência (E) de 30% e custo com os PVs de R\$ 4,50; R\$ 4,00; R\$ 3,50 e R\$ 3,00/W, respectivamente. Na Figura 71, os PVs somente são viáveis em grande parte da região à direita, onde a usina de ondas não é mais viável, e em uma pequena parte da região formada pelo sistema que inclui a usina de ondas, indicando que o valor com o custo dos PVs (R\$ 4,50/W) ainda é alto frente à disponibilidade do recurso de ondas.

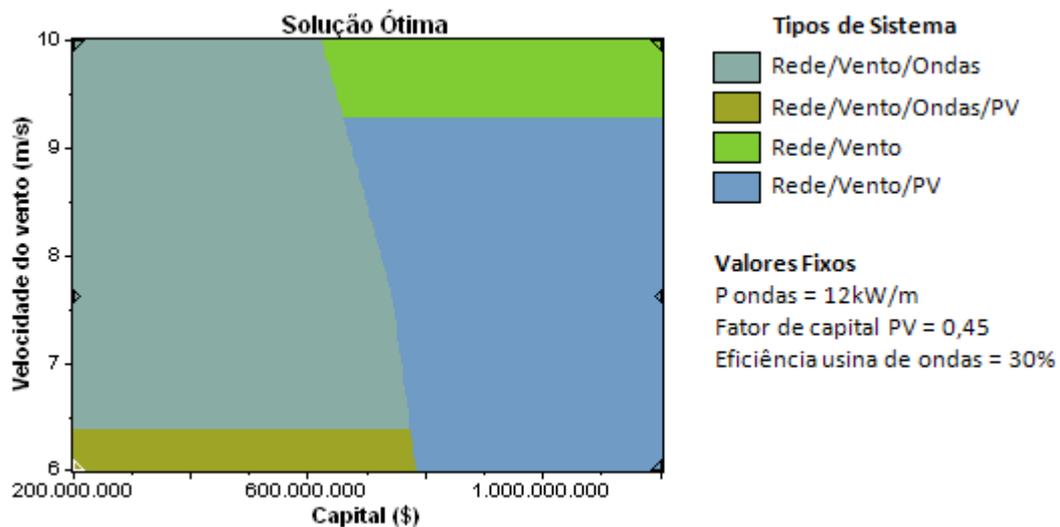


Figura 71: Resultados da análise de sensibilidade da velocidade do vento ($E = 30\%$) para um custo com os PVs de R\$ 4,50/W.

Nas Figuras 72 e 73, com redução do custo dos PVs para R\$ 4,00/W e R\$ 3,50, respectivamente, os PVs passam a compor também o sistema formado pela usina de ondas. A redução do custo com os PVs para **R\$ 3,00/W** (Figura 74), permite com que os PVs participem de todos os 2 sistemas da solução ótima. O limite de viabilidade da usina de ondas apresentado nesses 4 gráficos é o mesmo da Figura 64.

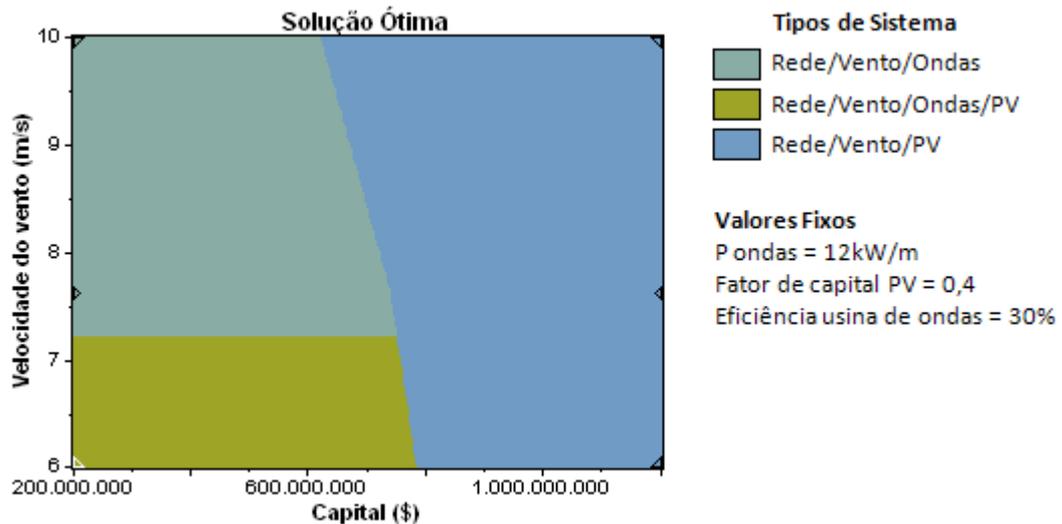


Figura 72: Resultados da análise de sensibilidade da velocidade do vento ($E = 30\%$) para um custo com os PVs de R\$ 4,00/W.

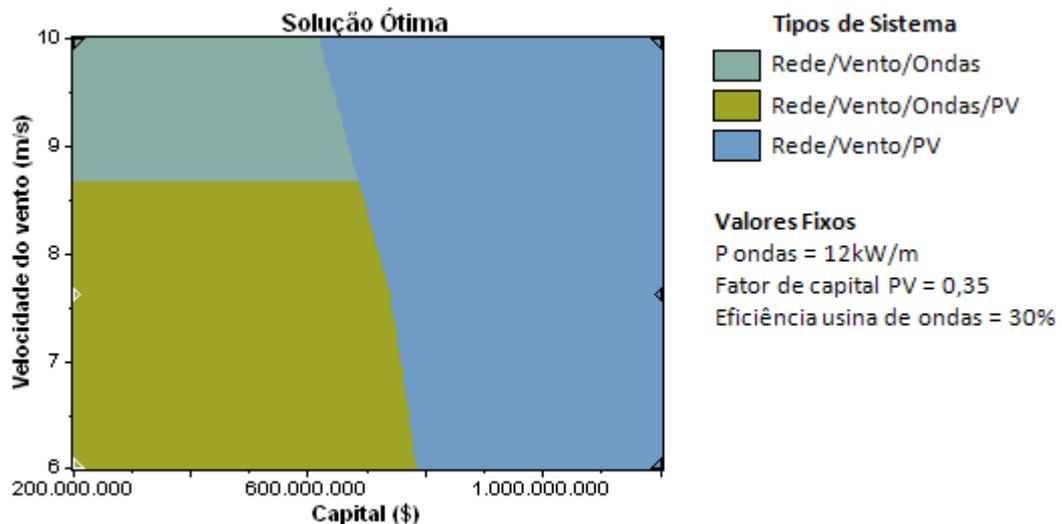


Figura 73: Resultados da análise de sensibilidade da velocidade do vento ($E = 30\%$) para um custo com os PVs de R\$ 3,50/W.

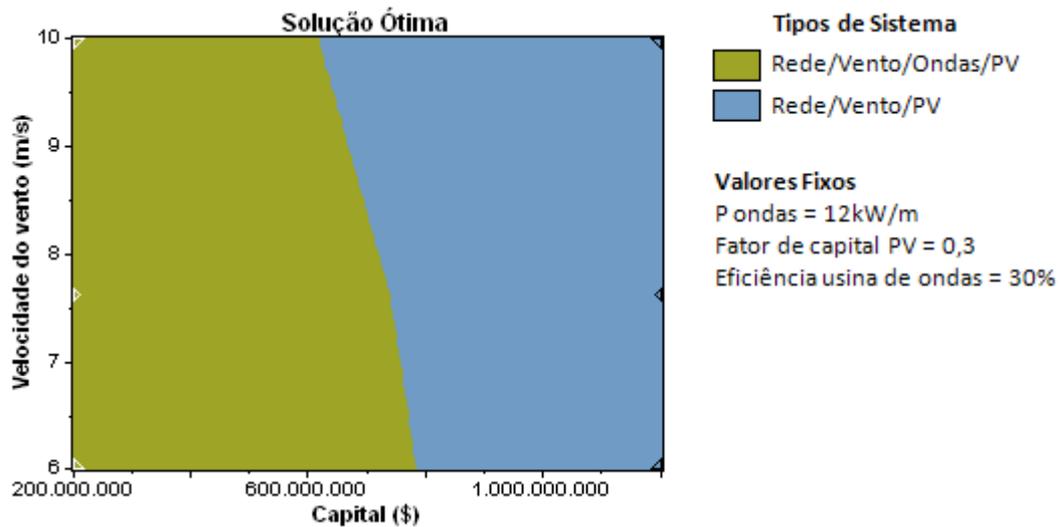


Figura 74: Resultados da análise de sensibilidade da velocidade do vento ($E = 30\%$) para um custo com os PVs de R\$ 3,00/W.

As Figuras 75 a 78 apresentam a solução ótima para uma usina de ondas com eficiência (E) de 20% e custo com os PVs de R\$ 4,50; R\$ 4,00; R\$ 3,50 e R\$ 3,00/W, respectivamente. Na Figura 75, os PVs somente são viáveis em grande parte da região à direita, onde a usina de ondas não é mais viável, e em parte da região formada pelo sistema que inclui a usina de ondas, indicando que o valor com o custo dos PVs (R\$ 4,50/W) ainda é alto frente à disponibilidade do recurso de ondas.

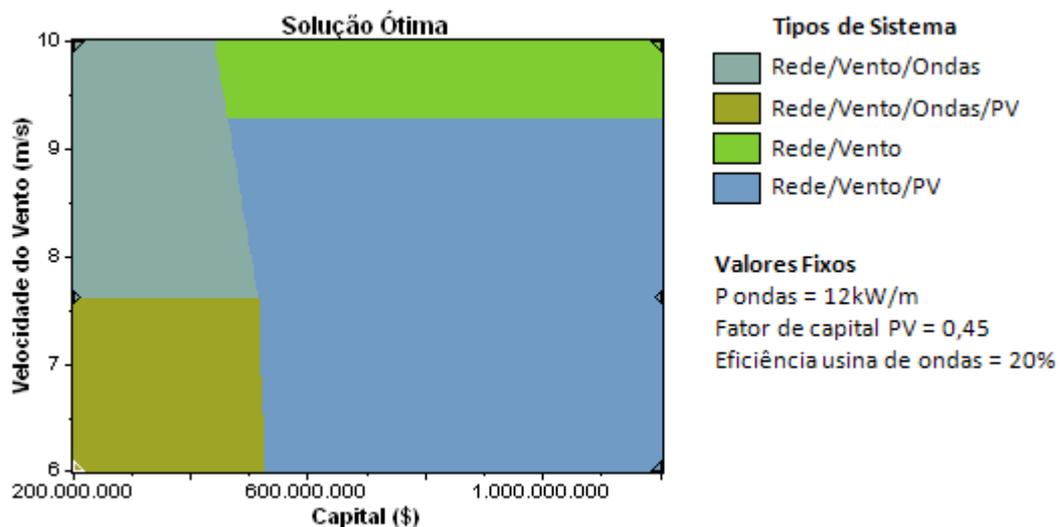


Figura 75: Resultados da análise de sensibilidade da velocidade do vento ($E = 20\%$) para um custo com os PVs de R\$ 4,50/W.

Nas Figuras 76 e 77, com redução do custo dos PVs para R\$ 4,00/W e R\$ 3,50, respectivamente, os PVs passam a compor também grande parte da região formada pelo sistema que inclui a usina de ondas. A redução do custo com os PVs para **R\$ 3,00/W** (Figura 78), permite com que os PVs participem completamente de todos os 2 sistemas da solução ótima. O limite de viabilidade da usina de ondas apresentado nesses 4 gráficos é o mesmo da Figura 65.

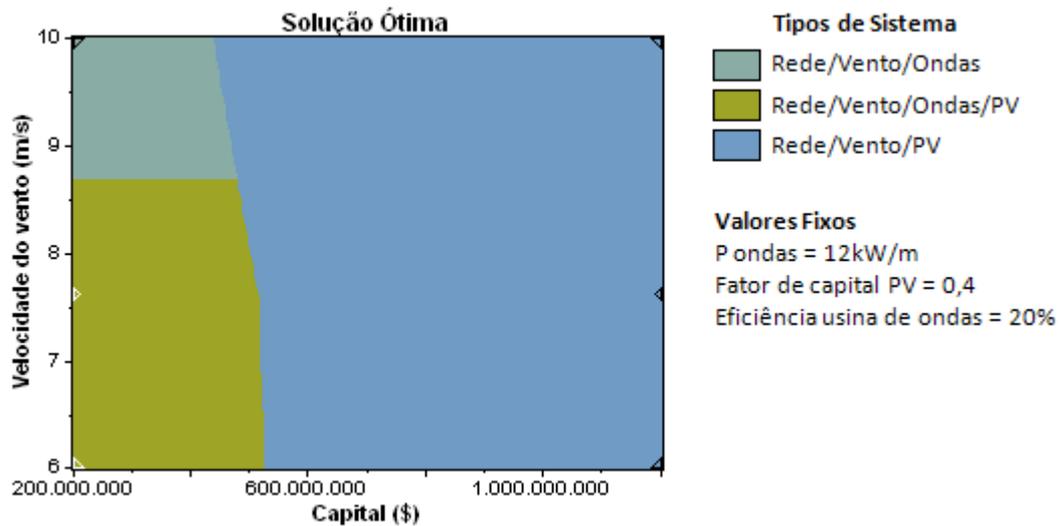


Figura 76: Resultados da análise de sensibilidade da velocidade do vento ($E = 20\%$) para um custo com os PVs de R\$ 4,00/W.

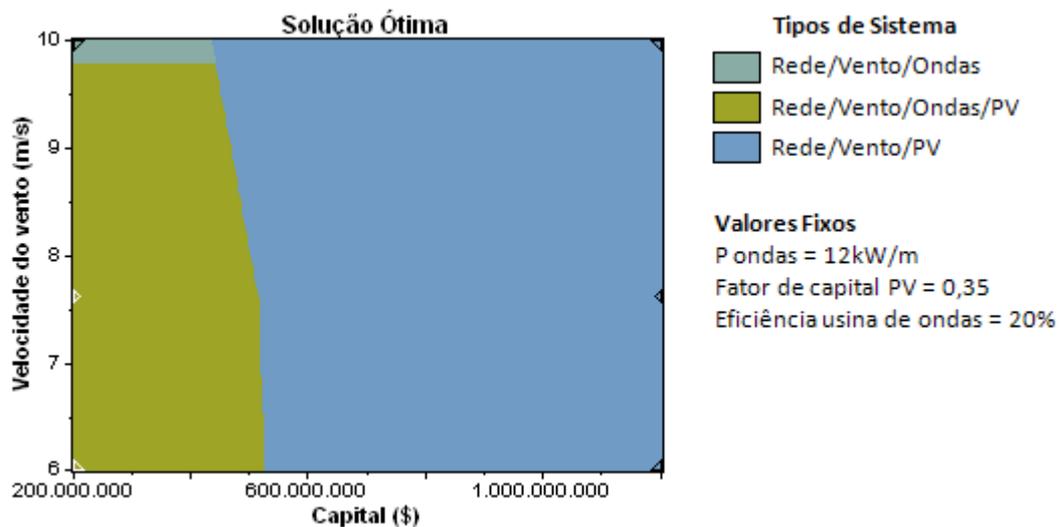


Figura 77: Resultados da análise de sensibilidade da velocidade do vento ($E = 20\%$) para um custo com os PVs de R\$ 3,50/W.

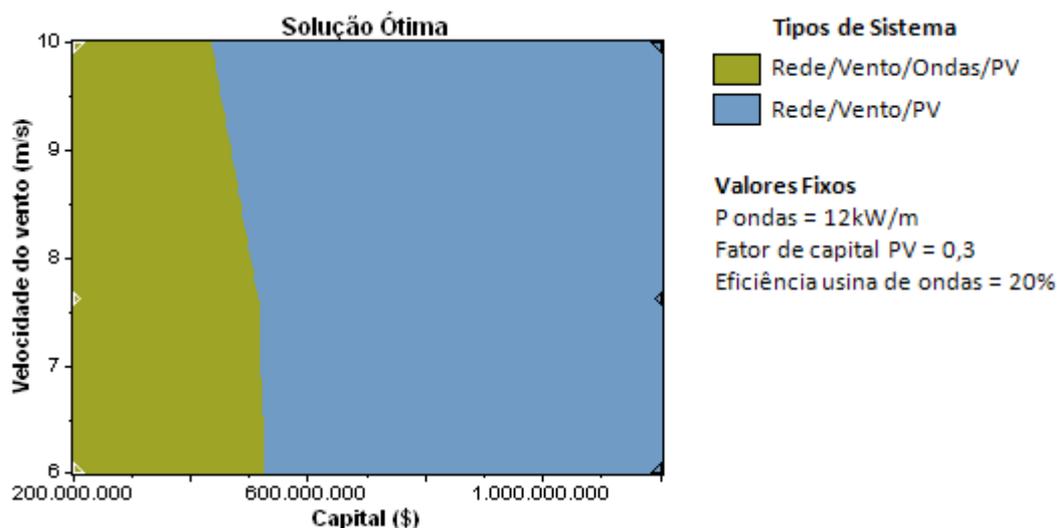


Figura 78: Resultados da análise de sensibilidade da velocidade do vento (E = 20%) para um custo com os PVs de R\$ 3,00/W.

6.2.2. Resultados com custo da energia da rede de distribuição de R\$ 0,20/kWh

A seguir, serão apresentadas as principais soluções ótimas para o sistema em estudo, porém com um custo da energia da rede de distribuição no valor de US\$ 0,10 (R\$ 0,20/kWh). As discussões são as mesmas apresentadas anteriormente.

Os valores mínimos e máximos iniciais utilizados nas novas simulações para o custo da usina de ondas foram de US\$ 0,00 e US\$ 1.000.000.000,00 (eixo horizontal dos gráficos). Esses valores foram arbitrados.

As Figuras 79 a 81 apresentam as soluções ótimas da análise de sensibilidade sobre a eficiência da usina de ondas.

Para esse novo cenário, os valores máximos de investimento encontrados para a usina de ondas, segundo as eficiências de 40, 30 e 20% são (Figura 79):

- **40%: US\$ 627.586.207,00 = R\$ 1.274.815.862,00 (R\$ 8,50/W);**
- **30%: US\$ 496.551.724,00 = R\$ 1.008.645.517,00 (R\$ 6,70/W);**
- **20%: US\$ 344.827.586,00 = R\$ 700.448.275,00 (R\$ 4,70/W).**

Na Figura 79, verifica-se que os PVs não são viáveis em nenhum dos 2 sistemas da solução ótima, para a qual foi utilizado o seguinte valor inicial para o custo dos PVs: R\$ 10,00/W.

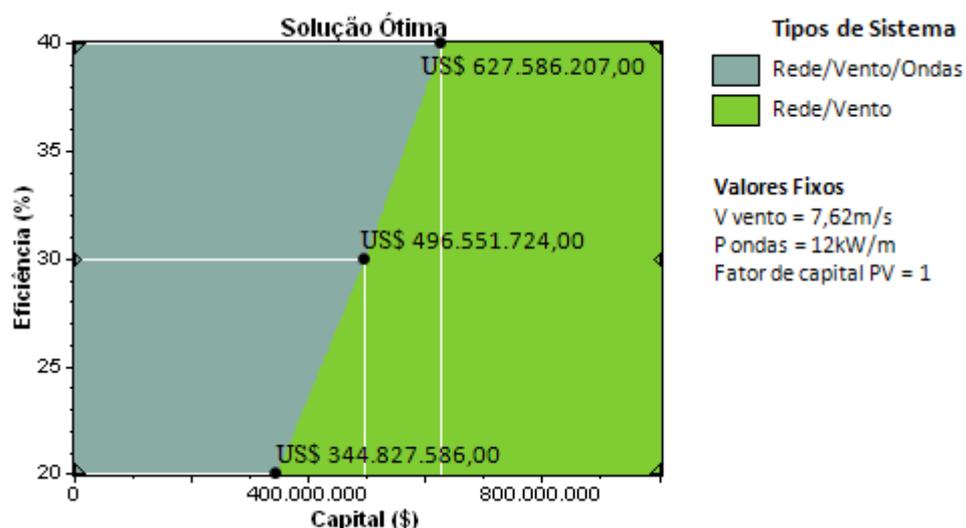


Figura 79: Resultados de simulação do sistema em estudo, com valor inicial do custo dos PVs fixado em R\$ 10,00/W e custo da energia da rede de distribuição de R\$ 0,20/kWh.

Novamente, utilizaram-se vários valores para o custo dos PVs nas simulações. O valor encontrado para o custo com os PVs para que se tornassem viáveis nos 2 sistemas da solução ótima foi de (Figura 80): **R\$ 2,00/W**.

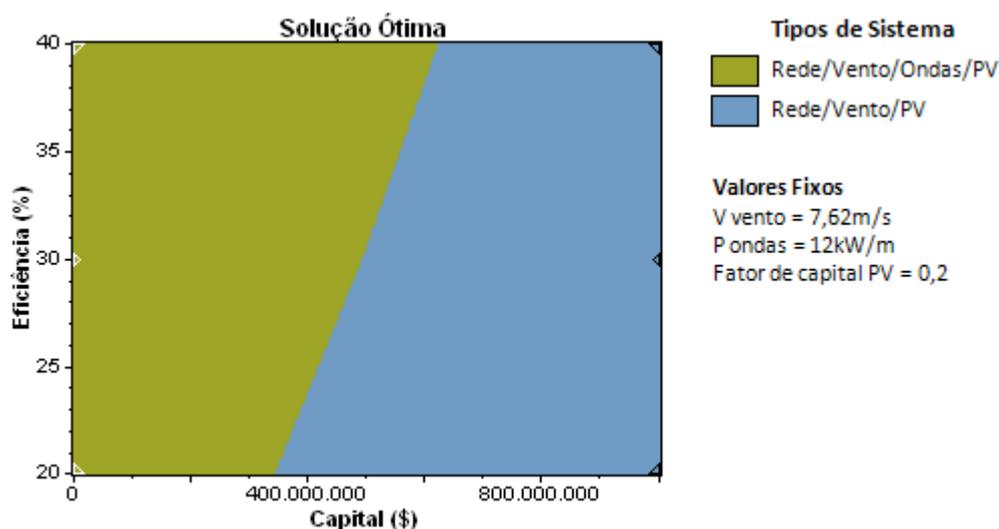


Figura 80: Resultados de simulação do sistema em estudo, com custo dos PVs de R\$ 2,00/W e custo da energia da rede de distribuição de R\$ 0,20/kWh.

Na Figura 81, apresenta-se um gráfico com o custo médio de energia para qualquer ponto Eficiência x Capital da solução ótima apresentada na Figura 80.

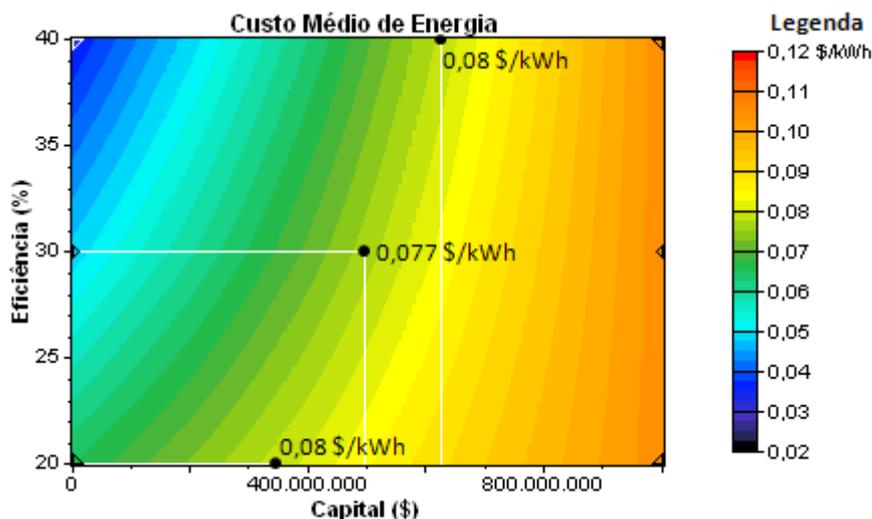


Figura 81: Valores do custo médio de energia do sistema em estudo - custo dos PVs: R\$ 2,00/W.

Os 3 pontos de custo médio de energia da Figura 81 foram plotados exatamente nos pontos que indicam os valores máximos de investimento da usina de ondas que foram apresentados na Figura 79. Esses 3 valores encontram-se a seguir:

- Eficiência de 40%: 0,080 \$/kWh = 0,163 R\$/kWh;
- Eficiência de 30%: 0,077 \$/kWh = 0,156 R\$/kWh;
- Eficiência de 20%: 0,080 \$/kWh = 0,163 R\$/kWh.

As Figuras 82 a 84 apresentam as soluções ótimas da análise de sensibilidade sobre o potencial da usina de ondas para uma usina com eficiência (E) de 40, 30 e 20%.

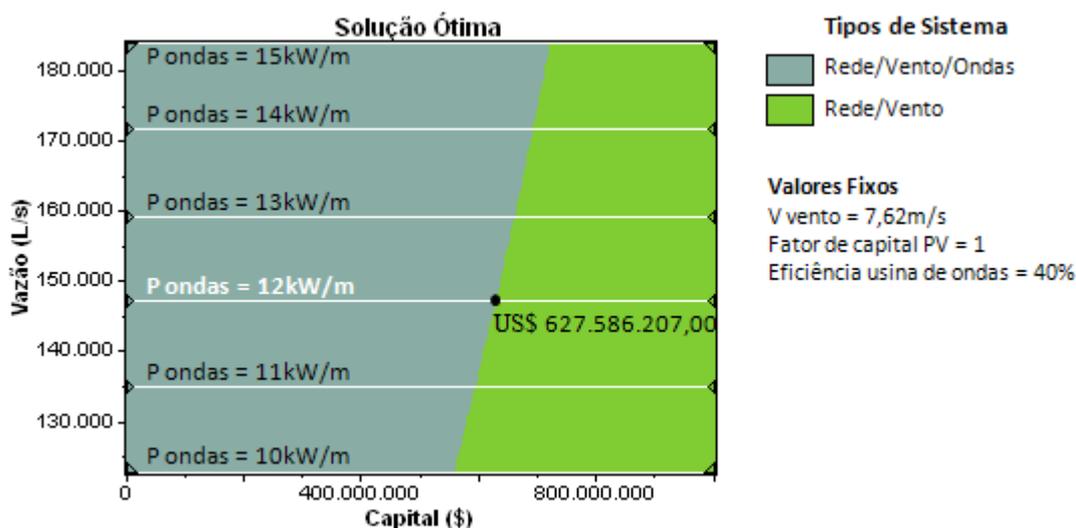


Figura 82: Resultados da análise de sensibilidade do potencial da usina de ondas (E = 40%) com custo da energia da rede de distribuição de R\$ 0,20/kWh.

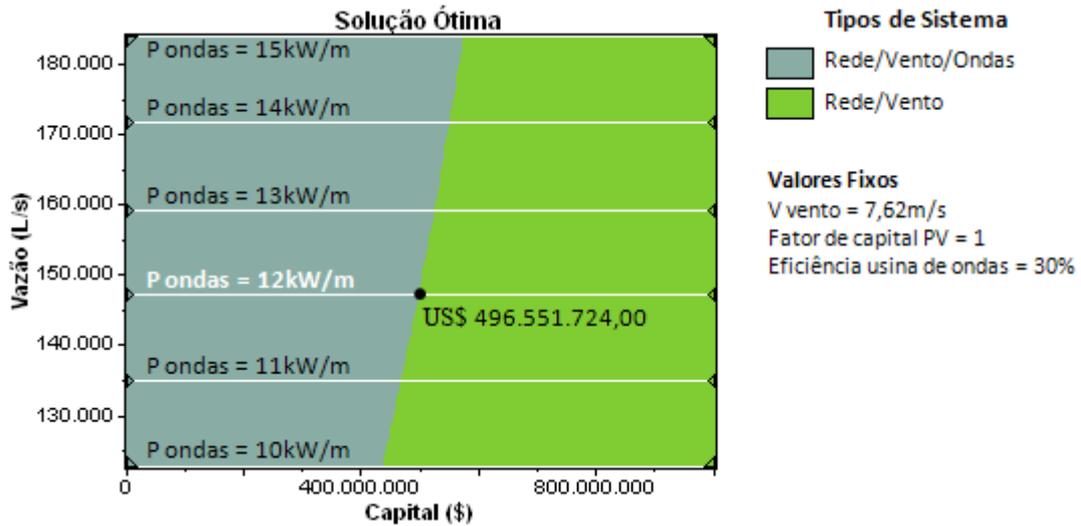


Figura 83: Resultados da análise de sensibilidade do potencial da usina de ondas ($E = 30\%$) com custo da energia da rede de distribuição de R\$ 0,20/kWh.

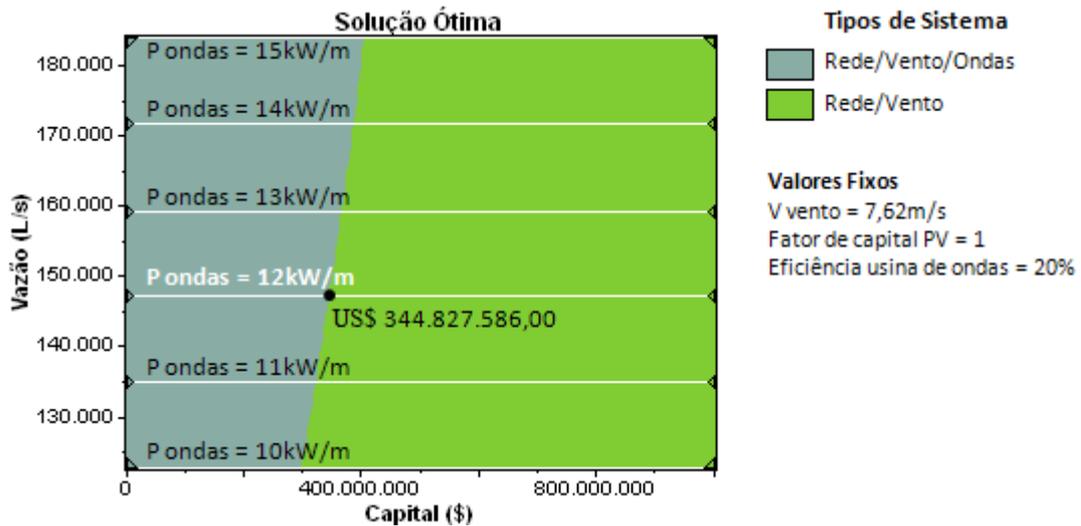


Figura 84: Resultados da análise de sensibilidade do potencial da usina de ondas ($E = 20\%$) com custo da energia da rede de distribuição de R\$ 0,20/kWh.

As Figuras 85 a 87 apresentam as soluções ótimas da análise de sensibilidade sobre a velocidade do vento para uma usina de ondas com eficiência (E) de 40, 30 e 20%, respectivamente.

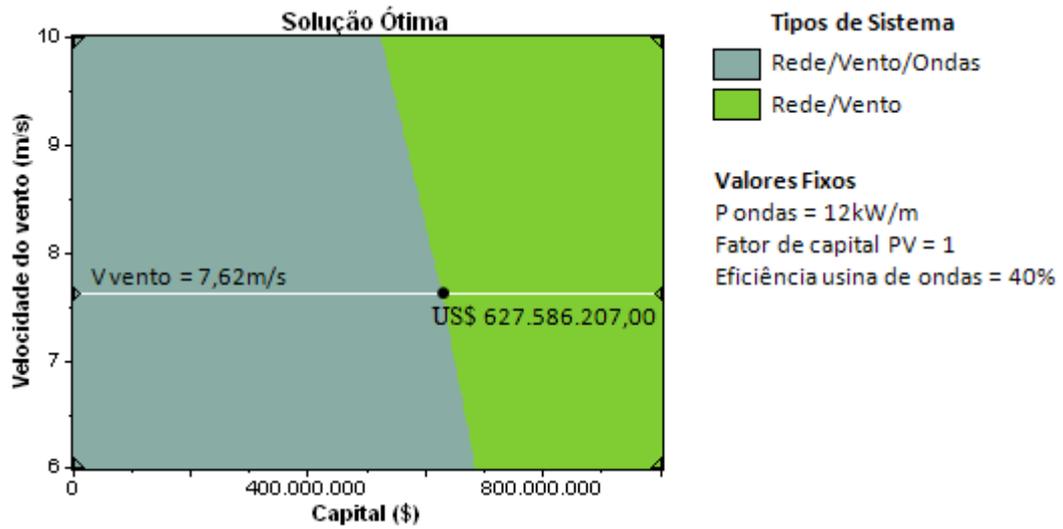


Figura 85: Resultados da análise de sensibilidade da velocidade do vento ($E = 40\%$) com custo da energia da rede de distribuição de R\$ 0,20/kWh.

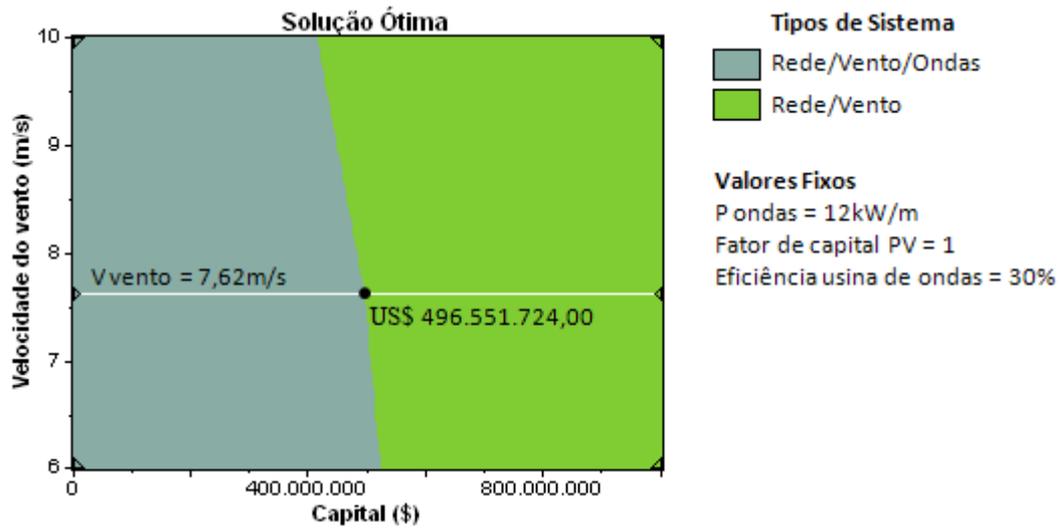


Figura 86: Resultados da análise de sensibilidade da velocidade do vento ($E = 30\%$) com custo da energia da rede de distribuição de R\$ 0,20/kWh.

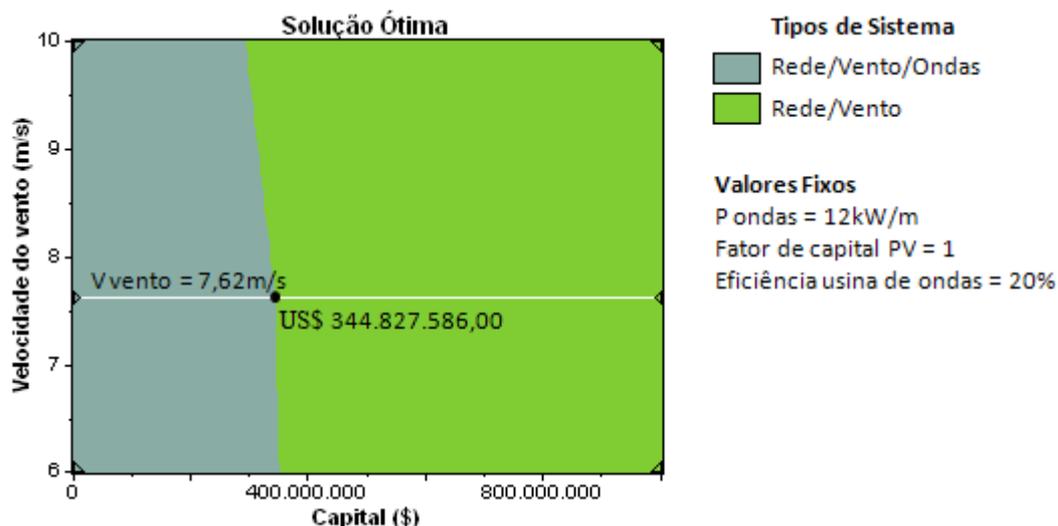


Figura 87: Resultados da análise de sensibilidade da velocidade do vento ($E = 20\%$) com custo da energia da rede de distribuição de R\$ 0,20/kWh.

6.2.3. Resultados com custo da energia da rede de distribuição de R\$ 0,10/kWh

A seguir, serão apresentadas as principais soluções ótimas para o sistema em estudo, porém com um custo da energia da rede de distribuição no valor de US\$ 0,05 (R\$ 0,10/kWh). As discussões são as mesmas apresentadas anteriormente.

Os valores mínimos e máximos iniciais utilizados nas novas simulações para o custo da usina de ondas foram de US\$ 0,00 e US\$ 500.000.000,00 (eixo horizontal dos gráficos). Esses valores foram arbitrados.

As Figuras 88 a 90 apresentam as soluções ótimas da análise de sensibilidade sobre a eficiência da usina de ondas.

Para esse novo cenário, os valores máximos de investimento encontrados para a usina de ondas, segundo as eficiências de 40, 30 e 20% são (Figura 79):

- **40%: US\$ 311.666.667,00 = R\$ 633.088.501,00 (R\$ 4,20/W);**
- **30%: US\$ 246.666.667,00 = R\$ 501.054.001,00 (R\$ 3,30/W);**
- **20%: US\$ 171.666.667,00 = R\$ 348.706.501,00 (R\$ 2,30/W).**

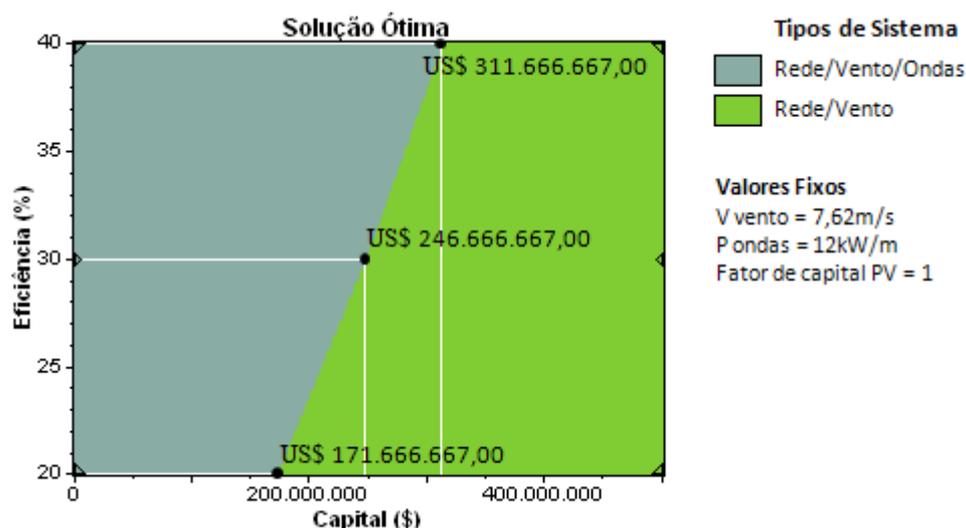


Figura 88: Resultados de simulação do sistema em estudo, com valor inicial do custo dos PVs fixado em R\$ 10,00/W e custo da energia da rede de distribuição de R\$ 0,10/kWh.

Na figura anterior, verifica-se que os PVs não são viáveis em nenhum dos 2 sistemas da solução ótima, para a qual foi utilizado o seguinte valor inicial para o custo dos PVs: R\$ 10,00/W. Novamente, utilizaram-se vários valores para o custo dos PVs nas simulações. O valor encontrado para o custo com os PVs para que se tornassem viáveis nos dois sistemas da solução ótima da figura anterior foi de (Figura 89): **R\$ 1,00/W**.

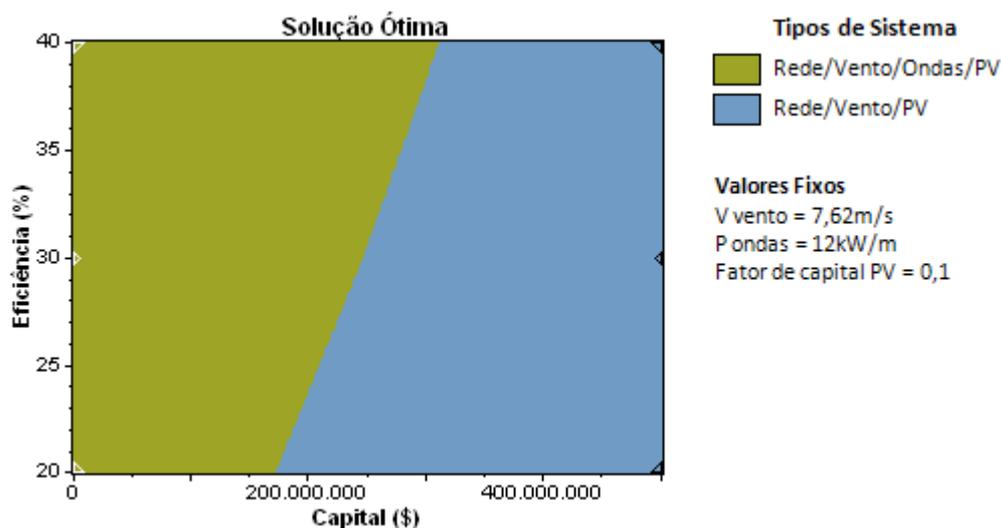


Figure 89: Resultados de simulação do sistema em estudo, com custo dos PVs de R\$ 2,00/W e custo da energia da rede de distribuição de R\$ 0,10/kWh.

Na Figura 90, apresenta-se um gráfico com o custo médio de energia para qualquer ponto Eficiência x Capital da solução ótima apresentada na Figura 89.

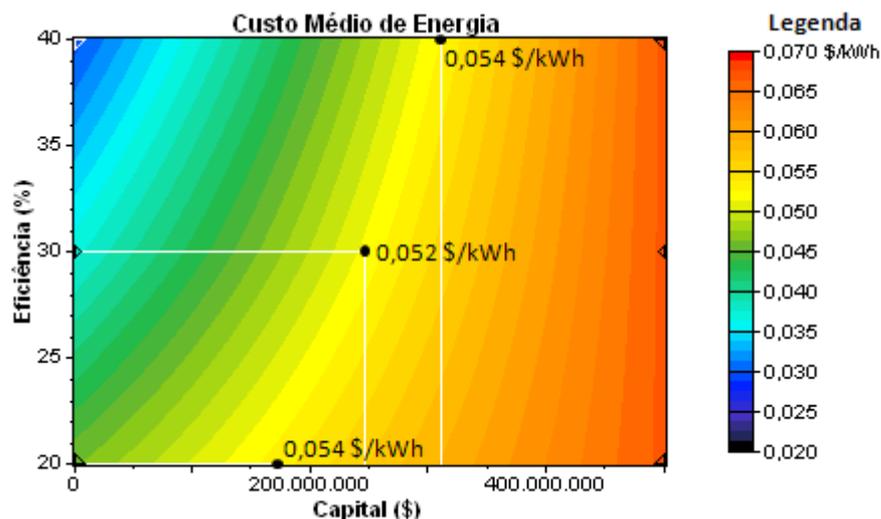


Figura 90: Valores do custo médio de energia do sistema em estudo - custo dos PVs: R\$ 1,00/W.

Os três pontos de custo médio de energia da Figura 90 foram picotados exatamente nos pontos que indicam os valores máximos de investimento da usina de ondas que foram apresentados na Figura 88. Esses três valores encontram-se a seguir:

- Eficiência de 40%: 0,054 \$/kWh = 0,110 R\$/kWh;
- Eficiência de 30%: 0,052 \$/kWh = 0,106 R\$/kWh;
- Eficiência de 20%: 0,054 \$/kWh = 0,110 R\$/kWh.

As Figuras 91 a 93 apresentam as soluções ótimas da análise de sensibilidade sobre o potencial da usina de ondas para uma usina com eficiência (E) de 40, 30 e 20%.

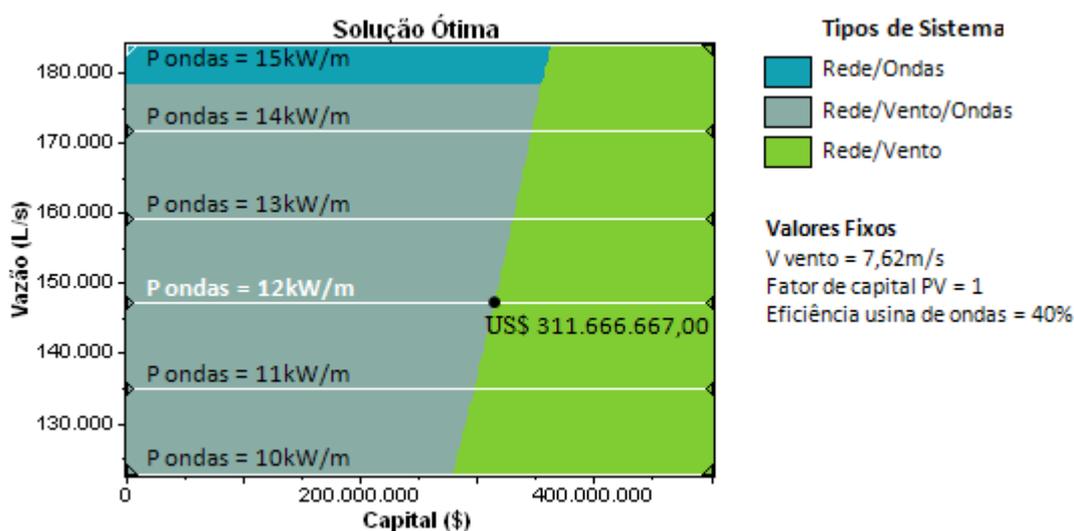


Figura 91: Resultados da análise de sensibilidade do potencial da usina de ondas (E = 40%) com custo da energia da rede de distribuição de R\$ 0,10/kWh.

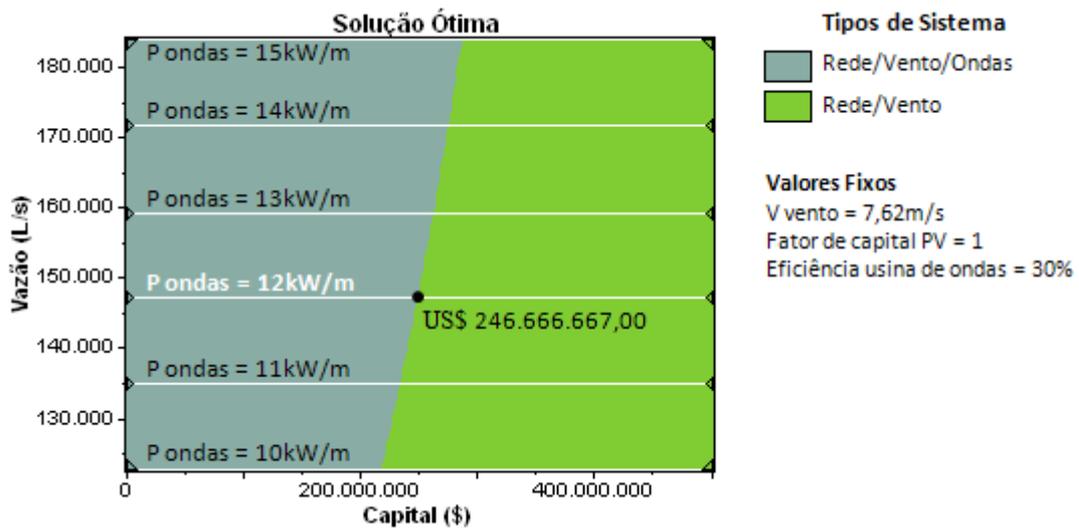


Figura 92: Resultados da análise de sensibilidade do potencial da usina de ondas (E = 30%) com custo da energia da rede de distribuição de R\$ 0,10/kWh.

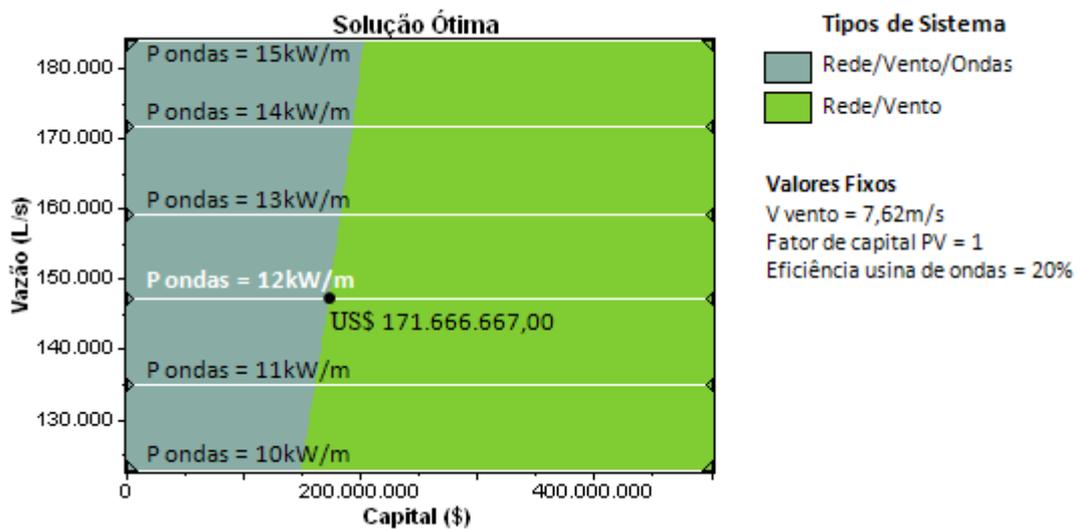


Figure 93: Resultados da análise de sensibilidade do potencial da usina de ondas (E = 20%) com custo da energia da rede de distribuição de R\$ 0,10/kWh.

As Figuras 94 a 96 apresentam as soluções ótimas da análise de sensibilidade sobre a velocidade do vento para uma usina de ondas com eficiência (E) de 40, 30 e 20%, respectivamente.

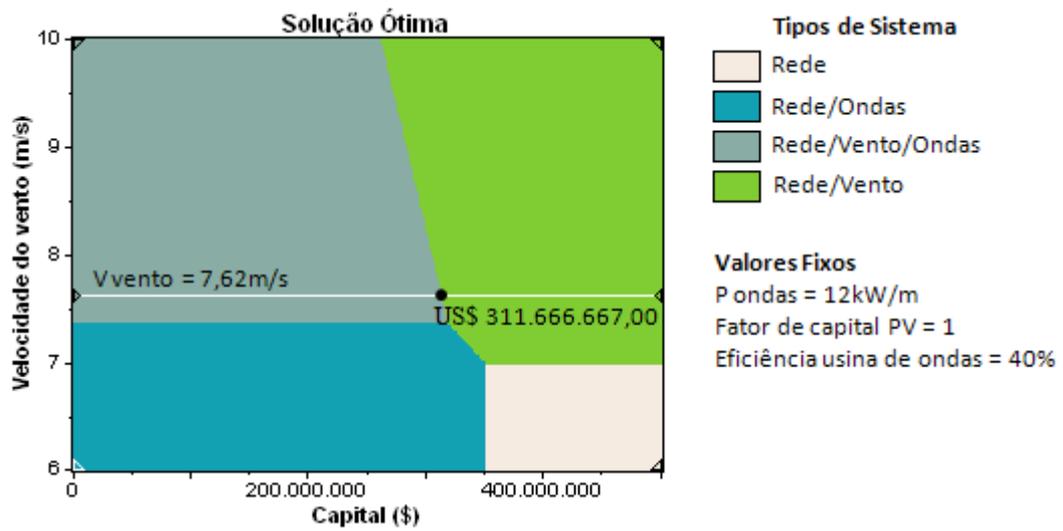


Figura 94: Resultados da análise de sensibilidade da velocidade do vento (E = 40%) com custo da energia da rede de distribuição de R\$ 0,10/kWh.

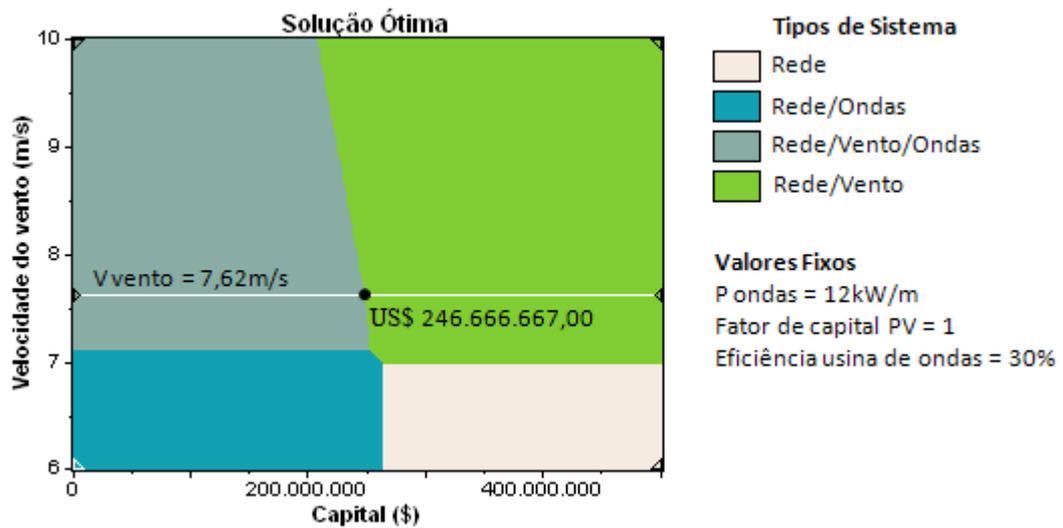


Figura 95: Resultados da análise de sensibilidade da velocidade do vento (E = 30%) com custo da energia da rede de distribuição de R\$ 0,10/kWh.

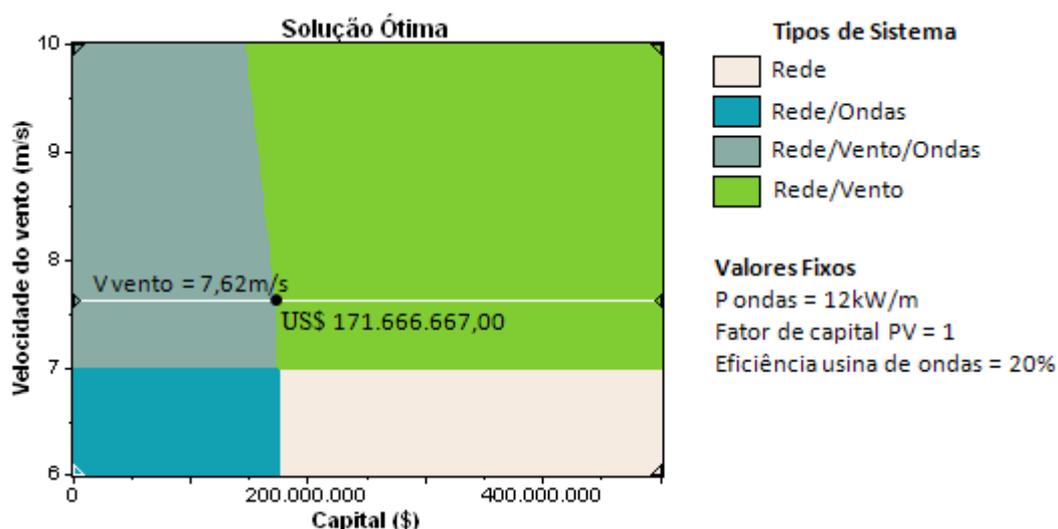


Figura 96: Resultados da análise de sensibilidade da velocidade do vento ($E = 20\%$) com custo da energia da rede de distribuição de R\$ 0,10/kWh.

6.2.4. Principais resultados do limite de viabilidade da usina de ondas segundo o custo da energia da rede de distribuição

A tabela 12 a seguir apresenta os principais resultados encontrados para o limite de viabilidade da usina de ondas segundo o custo da energia da rede de distribuição.

Tabela 12: Resultados principais do limite de viabilidade da usina de ondas.

CERD ¹ R\$/kWh	E ² %	Limite de viabilidade		CE ³ R\$/kWh
		R\$	R\$/W	
0,30	40	1.919.228.275,00	12,80	0,246
	30	1.505.963.792,00	10,00	0,228
	20	1.050.672.413,00	7,00	0,234
0,20	40	1.274.815.862,00	8,50	0,163
	30	1.008.645.517,00	6,70	0,156
	20	700.448.275,00	4,70	0,163
0,10	40	633.088.501,00	4,20	0,110
	30	501.054.001,00	3,30	0,106
	20	348.706.501,00	2,30	0,110

¹ Custo da energia da rede de distribuição;

² Eficiência da usina de ondas;

³ Custo médio da energia gerada (limite) por todo o sistema híbrido de energia.

6.2.5. Sugestão de localização da usina de ondas

Na Figura 97, foi proposta uma localização para a usina de ondas simulada neste estudo, que poderia se situar em qualquer local da costa do município de Mostardas, pois essa é uma região com poucas habitações e pouco desenvolvida. Escolheu-se a região mais ao norte do município de Mostardas em virtude de sua proximidade com a área urbana dos principais municípios do litoral norte, o que reduziria os custos com linhas de transmissão.

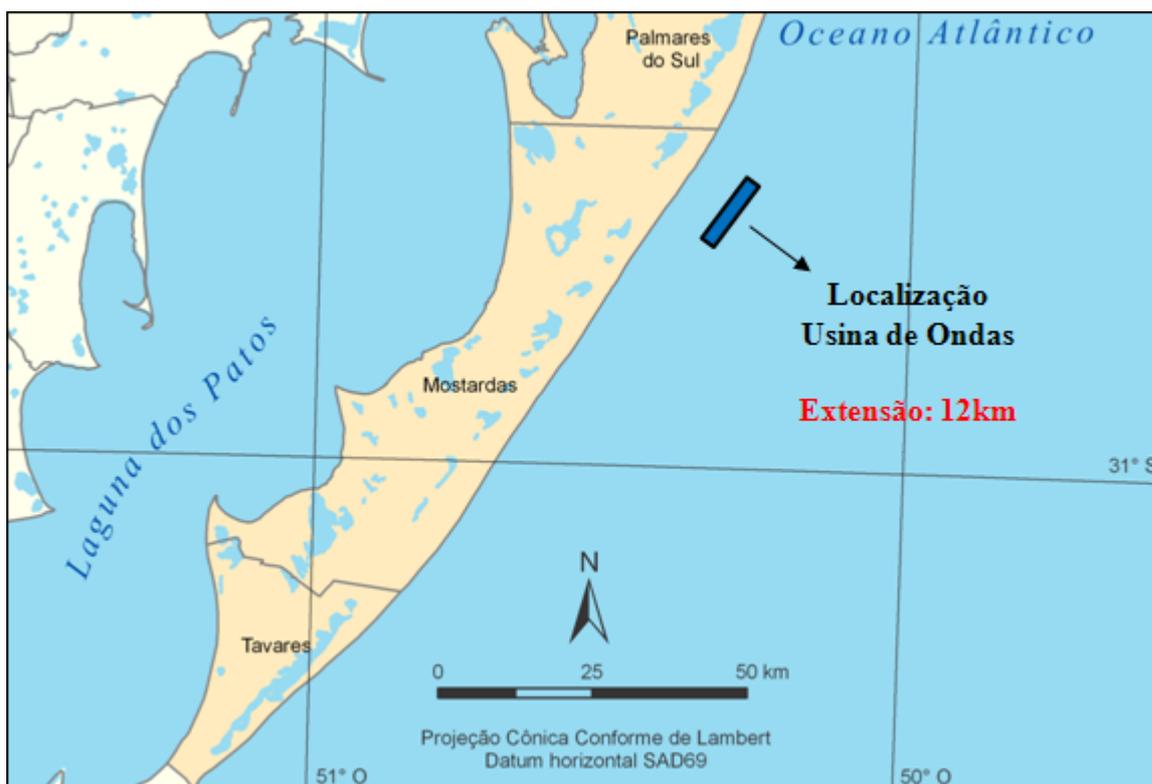


Figura 97: Sugestão de localização da usina de ondas.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho avaliou em nível de pré-viabilidade a geração de energia elétrica a partir de ondas oceânicas no litoral norte do RS, através da simulação, com o *software HOMER*, de um sistema híbrido interligado que garantisse o abastecimento de energia para a região considerada. O trabalho estabeleceu um limite de viabilidade visando à possibilidade de inserção de energia elétrica obtida de ondas oceânicas no sistema interligado da região.

O estudo demonstrou que é viável obter suprimentos de energia de ondas oceânicas quando estiver disponível tecnologia que possa ser implementada com custos pelo menos da ordem de duas vezes o custo atualmente despendido para as fazendas eólicas em operação no Brasil.

Além disso, o trabalho estabeleceu um limite de custo total de investimento (valores máximos) e um intervalo de eficiência de conversão de energia para os quais se mostra viável a construção de uma usina de geração de energia elétrica a partir de ondas oceânicas, sendo essa energia inserida no Sistema Interligado Nacional no litoral norte do RS.

O trabalho teve como contribuição a elaboração de um modelo simplificado do sistema energético do litoral norte do RS com a inserção de energia obtida de ondas oceânicas através da utilização dos próprios limites do programa *HOMER*. O programa se mostrou eficiente para um sistema energético de tamanha dimensão, mesmo sendo projetado para micro centrais de energia.

O trabalho também contribuiu com a aplicação do *software HOMER* na simulação de sistemas para os quais ele não foi inicialmente idealizado, já que seu objetivo primordial é a simulação de sistemas independentes baseados em energia hidrelétrica, energia eólica e/ou energia solar. Portanto, foi possível, através de uma simples adaptação, realizar simulações com uma usina de conversão de ondas oceânicas (o *HOMER* não oferece essa opção).

Também foi considerado um cenário onde os custos de energia fotovoltaica eram muito menores que os atualmente praticados, simulando cenários nos quais a utilização da energia solar fotovoltaica se tornaria viável através de incentivos governamentais, visando à otimização de um sistema híbrido. Foi observado que os custos de energia fotovoltaica deveriam ser reduzidos em pelo menos 30, 20 e 10% dos valores atuais - segundo custos com a energia da rede de distribuição de R\$ 0,30; R\$ 0,20 e R\$ 0,10/kWh, respectivamente.

Para continuação deste trabalho, sugerem-se:

- Estudos envolvendo dados de ondas de outras localidades da costa do litoral do RS para confirmação dos resultados obtidos neste trabalho;
- Trabalhos envolvendo diferentes séries anuais de dados de ondas também para confirmação dos resultados obtidos nesta dissertação;
- Pesquisas envolvendo distâncias e profundidades diferentes ao longo da costa do RS para verificação da influência do fundo mar;
- Simulação de um sistema híbrido composto por suprimento de energia obtido de correntes marítimas;
- Simulação de cenários com diferentes dimensões de usinas eólicas, de ondas e solar;
- Simulação de sistemas híbridos iguais e de mesma dimensão, porém em localidades distintas do RS;
- Verificação do aumento do fator de capacidade de usinas eólicas através do armazenamento da energia atualmente não aproveitada (e muitas vezes desperdiçada) com utilização de usinas hidrelétricas reversíveis.

8. REFERÊNCIAS

- ANEEL. **Agência Nacional de Energia Elétrica**. Capacidade de Geração do Estado do Rio Grande do Sul. Disponível em:
<<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/ResumoEstadual/CapacidadeEstado.asp?cmbEstados=RS:RIO%20GRANDE%20DO%20SUL>>. Acesso em: 29 out. 2012.
- ANEEL. **Agência Nacional de Energia Elétrica**. Disponível em:
<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output_Noticias.cfm?Identidade=5833&id_area=90>. Acesso em: 17 jul. 2012.
- AQUARET. Disponível em:
<http://www.aquaret.com/index.php?option=com_content&view=article&id=137&Itemid=280&lang=pt>. Acesso em: 10 abr. 2012.
- ASSAD, E. D. Entrevista concedida à revista **XXI - Ciência para a Vida**: Revolução no solo. EMBRAPA, n. 1, p. 7, 2012. Disponível em:
<http://revista.sct.embrapa.br/download/XXI_n1_pt.pdf>. Acesso em: 18 out. 2012.
- ASSIS, L. E. **Avaliação e aproveitamento da energia de ondas oceânicas no litoral do Rio Grande do Sul**. 2010. 82 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- ATLAS EÓLICO DO RIO GRANDE DO SUL. Porto Alegre, 2002. Disponível em:
<<http://www.sema.rs.gov.br/>>. Acesso em: 20 ago. 2011.
- ATLAS SOLARIMÉTRICO DO BRASIL. Banco de dados Terrestres. Recife, 2000. Disponível em:
<http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Atlas_Solarimetrico_do_Brasil_2000.pdf>. Acesso em: 16 ago. 2011.
- BANCO CENTRAL DO BRASIL. Disponível em:
<<http://www4.bcb.gov.br/pec/conversao/conversao.asp>>. Acesso em: 31 out. 2012.
- BELUCO, A.; SOUZA, P. K.; KREZINGER, A. **A complementaridade no tempo entre as energias hidrelétrica e fotovoltaica**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 8, n. 1, p. 99-110, 2003.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balço Energético Nacional 2011**: Ano base 2010. Brasília, 2011.
- CÁLCULO EXATO. Disponível em:
<<http://www.calculoexato.com.br/parprima.aspx?codMenu=FinanAtualizaIndice>>. Acesso em: 31 out. 2012.
- CARVALHO, J. T. **Simulação da distribuição de energia das ondas oceânicas ao largo do litoral brasileiro**. 2010. 141 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos.

- CEEE. **Companhia estadual de Energia Elétrica do Estado**. Dados da demanda elétrica da porção norte do litoral do Rio Grande do Sul. 2012.
- COPPE. Disponível em: <<http://www.planeta.coppe.ufrj.br/artigo.php?artigo=833>>. Acesso em: 10 abr. 2012.
- CORNETT, A. M., 2008. "A global wave energy resource assessment." In: *Proceedings of the Eighteenth (2008) International Society of Offshore and Polar Engineers*. pp. 318-326, Vancouver, BC, Canada. 6-11 July 2008. Disponível em: <https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2009/1/CI71K/1/material_docente/objeto/221532>. Acesso em: 12 abr. 2012.
- COSTA, P. R. **Energia das ondas do mar para geração de eletricidade**. 2004. 99 f. Dissertação (Mestrado em Ciências - Engenharia Oceânica) - COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- CRUZ, J. M. B. P.; SARMENTO, A. J. N. A. **Energia das ondas**: introdução aos aspectos tecnológicos, económicos e ambientais. Portugal: Instituto do Ambiente Alfragide, 2004.
- DEAN, R. G.; DALRYMPLE, R. A. *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*. Singapore: World Scientific, 1991.
- ENERGIA DO SOL. Disponível em: <<http://energiadosol.net/v2/sistema-isolado.html>>. Acesso em: 8 set. 2012.
- FADIGAS, E. A. F. A. **Energia Eólica**: Fontes energéticas renováveis. 1a ed. Barueri/SP: 2011.
- HOMER, versão 2.68 beta: **The Micropower Optimization Model**. HOMER Energy, 2011. Disponível em: <<http://www.homerenergy.com/>>. Acesso em: 28 jul. 2011.
- IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Censo Demográfico de 2010. Total da população do Rio Grande do Sul. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/>>. Acesso em: 20 mar. 2012.
- INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Contato realizado em 2012 através de e-mail com o Atendimento ao Usuário do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC).
- JORNAL DA ENERGIA. Disponível em: <http://www.jornaldaenergia.com.br/ler_noticia.php?id_noticia=11397&id_tipo=3&id_secao=2>. Acesso em: 22 out. 2012.
- KRENZINGER, A. **Energia solar fotovoltaica**. Texto elaborado a partir de partes de dissertações e teses do LABSOL - PROMEC/UFRGS. 2012.
- LABGEO. Laboratório de Geoprocessamento. **Mapa com a localização Geográfica da porção norte do litoral do RS**. UFRGS - IB - Centro de Ecologia. Porto Alegre, 2012.
- LAMBERT, T.; GILMAN, P.; LILIENTHAL, P. **Micropower system modeling with HOMER**. In.: *Integration of Alternative Sources of Energy*, FARRET, F. A.; SIMÕES, M. G. p. 379-418. JohnWiley & Sons, 2006.

- LILIENTHAL, P.; GILMAN, P.; LAMBERT, T. *Getting Started Guide for HOMER Legacy (Version 2.68)*. Boulder: HOMER Energy, 2011.
- MARTINS, M. D. S. S. B. **Sistemas de aproveitamento da energia do mar**. 2009. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil. Universidade de Aveiro, Portugal. Disponível em: <<http://ria.ua.pt/bitstream/10773/2397/1/2010000334.pdf>>. Acesso em: 18 out. 2011.
- McCORMICK, M. E. *Ocean wave energy conversion*. New York, Wiley-Interscience, 1981.
- MPX. Grupo EBX. Disponível em: <<http://www.mpx.com.br/pt/sala-de-imprensa/noticias/Paginas/Usina-Solar-Tau%C3%A1-completa-um-ano-de-atividades-com-recorde-de-produ%C3%A7%C3%A3o.aspx>>. Acesso em: 21 set. 2012.
- NOAA. Disponível em: <<http://www.noaa.gov/>>. Acesso em: 30 maio 2012.
- O GLOBO CIÊNCIA. Disponível em: <<http://oglobo.globo.com/ciencia/pais-comeca-explorar-energia-limpa-das-ondas-5122838#ixzz1wxAf46WA>>. Acesso em: 20 jun. 2012.
- PELAMIS. Disponível em: <<http://www.pelamiswave.com/pelamis-technology>>. Acesso em: 10 abr. 2012.
- PHOTOVOLTAICS IN BUILDINGS. *Guide to the installation of PV systems*. 2nd ed, 2006. Disponível em: <http://www.bre.co.uk/filelibrary/pdf/rpts/Guide_to_the_installation_of_PV_systems_2nd_Edition.pdf>. Acesso em: 10 set. 2012.
- PICO. Disponível em: <<http://www.pico-owc.net/>>. Acesso em: 09 abr. 2012.
- PONTES, M. T.; FALCÃO, A. *Ocean Energies: Resources and Utilization*. In: *World Energy Congress*, 18º, Buenos Aires, 2001.
- RETScreen International. *Clean Energy Project Analysis*. 3rd ed. Canadá, 2005. Disponível em: <<http://www.retscreen.net/ang/12.php>>. Acesso em: 24 nov. 2011.
- RODRIGUES, L. *Wave power conversion systems for electrical energy production*. Department of Electrical Engineering, Faculty of Science and Technology, Nova University of Lisbon, Portugal, 2005. Disponível em: <<http://www.icrepq.com/icrepq-08/380-leao.pdf>>. Acesso em: 23 set. 2011.
- ROSA, P. B. G. **Controle e otimização de um sistema de conversão de energia das ondas do mar em energia elétrica**. 2008. 112 f. Dissertação (Mestrado em Ciências - Engenharia Elétrica) - COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- SCIENCE PHOTO. Disponível em: <<http://www.sciencephoto.com/media/340550/enlarge>>. Acesso em: 10 abr. 2012.
- SILVA, Jones S. ; BELUCO, Alexandre. **Guia de Introdução para o HOMER Legacy (Versão 2.68)**, 2012. Tradução. Disponível em: <http://homerenergy.com/pdf/HOMERGettingStarted_Portugues.pdf>. Acesso em: 31 mar. 2012.

- SILVA, Jones S.; CARDOSO, Alice R.; BELUCO, Alexandre. *Consequences of Reducing the Cost of PV Modules on a PV Wind Diesel Hybrid System with Limited Sizing Components*. *International Journal of Photoenergy (Print)*, v. 2012, p. 1-7, 2012.
- SILVA, P. C. **Sistema para tratamento, armazenamento e disseminação de dados de vento**. 1999. 113 f. Dissertação (Mestrado em Ciências - Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia (COPPE). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Disponível em:
<http://www.cresesb.cepel.br/download/teses_mestrado/199909_silva_p_c_ms.pdf>. Acesso em: 14 dez. 2011.
- SILVEIRA, S. R. **Geração descentralizada de energia através de fonte alternativa**. 2011. 55 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Elétrica) - Departamento de Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. Disponível em:
<<http://www.bibliotecadigital.ufrgs.br/da.php?nrb=000787177&loc=2011&l=c2e14847cbec115>>. Acesso em: 14 abr. 2012.
- SORENSEN, R. M. *Basic Coastal Engineering*. 3rd ed. New York: Springer, 2006.
- STRAUCH, J. C.; CUCHIARA, D. C.; JÚNIOR, E. E. T.; ALMEIDA, L. E. S. B. **O padrão das ondas de verão e outono no litoral sul e norte do Rio Grande do Sul**. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 14, n. 4, p. 29-37, 2009.
- STRAUCH, J. C. S. **Estudo do clima ondulatório em Rio Grande**. Fundação Universidade Federal do Rio Grande do Sul - FURG. Rio Grande, 1999.
- SUL, V. **Ventos do Sul Energia: Parques Eólicos de Osório**. Porto Alegre, 2009.
- TRUJILLO, A. P.; THURMAN, H. V. *Essentials of Oceanography*. USA: Prentice Hall, 2011.
- TWIDELL, J.; WEIR, T. *Renewable Energy Resources*. 2nd ed. New York: Taylor & Francis, 2006.
- VENTOS DO SUL. Dados Técnicos. Disponível em:
<<http://www.ventosdosulenergia.com.br/highres.php>>. Acesso em: 17 ago. 2011.
- WAVE DRAGON. Disponível em:
<http://www.wavedragon.net/index.php?option=com_content&task=view&id=6&Itemid=5>. Acesso em: 10 abr. 2012.
- WAVE ENERGY CENTRE. **Potencial e Estratégia de desenvolvimento da energia das ondas em Portugal**. Sumário executivo. Portugal, 2004. Disponível em:
<http://pt.wavec.org/client/files/sumario_executivo_2004.pdf>. Acesso em: 11 abr. 2012.
- WAVENET. *Results from the work of the European Thematic Network on Wave Energy*. European Community, 2003.
- WOBLEN. Disponível em: <<http://www.wobben.com.br/>>. Acesso em: 10 mar. 2012.