

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA – CAMPUS ARARANGUÁ

RAFFAELA ZANDOMENEGO

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
DE ENERGIA**

ARARANGUÁ, 2016.

RAFFAELA ZANDOMENEGO

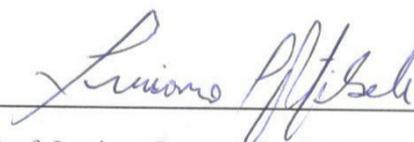
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE ENERGIA

Trabalho de conclusão de curso na modalidade de artigo científico para a aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso do curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal de Santa Catarina – Campus Araranguá

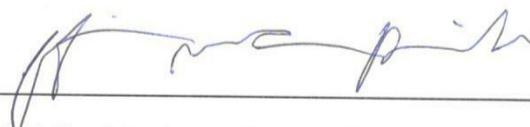
Aprovado em: 07/07/2016



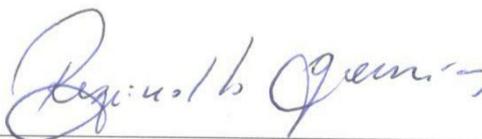
Profa. Carla D'Aquino (Orientadora)



Prof. Luciano Lopes Pfitscher (Examinador)



Prof. Felipe Mendonça Pimenta (Examinador)



Prof. Reginaldo Geremias (Supervisor)

POTENCIAL ENERGÉTICO DE ONDAS E SOLAR PARA CONVERSÃO EM ENERGIA ELÉTRICA EM UMA PLATAFORMA DE PESCA: ESTIMATIVAS E VIABILIDADE ECONÔMICA.

Raffaella Zandomenego*

RESUMO

A busca por soluções em pequena escala está cada vez mais em alta devido a todos os problemas associados às energias não renováveis, como carvão e o petróleo. Observando a necessidade de diversificar a matriz energética brasileira, a proposta deste trabalho foi utilizar o software HOMER *Energy* para fazer uma comparação de viabilidade econômica entre uma tecnologia que está em ascensão e mais desenvolvida, a energia solar, com uma menos difundida e pouco conhecida, a energia das ondas oceânicas. O programa permitiu a realização de uma simulação para a demanda de energia elétrica da Plataforma Entremares, localizada em Balneário Arroio do Silva (SC), e projetada como um sistema isolado de microgeração de energia. Os resultados indicaram que, considerando os valores de VPL, nenhuma alternativa se mostrou atrativamente viável, seja pelo alto número de baterias que o sistema demanda ou pela tecnologia pouco desenvolvida. Já considerando a geração de energia, as melhores configurações foram as realizadas com a coluna de água oscilante (CAO). Essa configuração atendeu as duas cargas (plataforma e restaurante) e utilizou um número menor de baterias, além de gerar um excedente de energia. Uma saída para tornar o projeto atrativo seria a conexão à rede elétrica utilizando o sistema de crédito para a injeção de energia, de acordo com a Resolução Normativa 087/15. Isso representaria uma diminuição no número de baterias, no excesso de energia gerado, e assim, o custo de instalação do projeto. Além de ser uma alternativa em pequena escala, auxilia reduzindo a demanda por sistemas não renováveis que apresentam maiores impactos ambientais, é também uma forma de diversificar a matriz energética e procurando evitar ou minimizar os efeitos de uma nova crise hídrica no país.

Palavras-chave: energia oceânica, energia solar, software Homer, simulação computacional, sistema isolado.

* Graduando do Curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá, Rodovia Governador Jorge Lacerda, 3201, Jardim das Avenidas Araranguá, Santa Catarina, Brasil, CEP 88900-000. E-mail: gabriel_instu@hotmail.com.

1 INTRODUÇÃO

O homem está cada vez mais dependente da energia em suas diversas formas, já que esta é utilizada para atender necessidades básicas como locomoção, alimentação e a própria manutenção da vida. À medida que a população aumenta, cresce a necessidade do uso de energia elétrica, e desta forma, surge o problema: como atender as necessidades do homem sem afetar o meio ambiente. Estima-se que, desde 2008 até 2035, o consumo mundial de energia aumente 53% (PINHO *et al*, 2008; FLEMING, 2012).

Para atender a demanda energética faz-se uso de fontes renováveis e não renováveis. As fontes não renováveis estão em maior parte na matriz energética, tanto nacional, como mundial. Na matriz energética mundial, o petróleo representa 35%, seguida do carvão com 25% e do gás natural com 21%, mas sendo fontes de combustíveis fósseis, elas tendem a escassez, pois seu tempo de renovação é muito elevado. Assim, a busca por fontes renováveis, que podem ser repostas em curto/médio prazo, está cada vez mais em alta (PINHO *et al*, 2008; CALEZ, 2011).

As fontes renováveis, mesmo representando uma alternativa às fontes não renováveis, não tem uma participação muito expressiva na matriz energética mundial, representando apenas 21,2% de geração de energia, em 2014. Já no Brasil, elas representam 74,6% da matriz energética, e mantiveram-se entre as mais elevadas do mundo, mesmo com a redução devido à menor oferta de energia hidráulica (MME, 2016).

A necessidade de diversificar a matriz energética brasileira é um fator que contribui para a procura de novas fontes de energia, um exemplo disso foi o que ocorreu recentemente no sudeste do país com a crise hídrica. O Brasil, que é um dos maiores produtores de energia elétrica por meio das hidrelétricas, não conseguiu atender ao abastecimento de água potável e geração de energia devido à escassez de chuva. Foi necessário recorrer às termoelétricas, aumentando a demanda por carvão e alimentando um cenário que utiliza energia mais cara e poluente. Isso mostra que, uma matriz energética onde predominam as fontes renováveis não garante que se tenha fornecimento de energia constante, uma vez que os recursos energéticos renováveis são bastante variáveis e de difícil previsão.

O potencial hidrelétrico brasileiro já não é suficiente para abastecer a demanda que está em constante crescimento e diversificar a matriz energética. Mas para isso é deve-se levar em conta a preservação do meio ambiente, assim, investindo em outras fontes de energia renovável se tornou mais interessante (BICUDO *et al*, 2014; WWF, 2015) e necessário. Dessa maneira, este artigo procurou investigar uma alternativa em pequena escala para suprir a

demanda e diversificar a matriz energética através de fontes renováveis, procurando soluções locais que contribuirão com um problema em escala nacional.

Com a intenção de propor soluções em pequena escala, o objetivo deste trabalho foi estimar os potenciais de energia das ondas e de energia solar em uma plataforma de pesca de pesca no litoral de Balneário Arroio do Silva (SC). Bem como estimar sua viabilidade econômica e comparar a fonte oceânica renovável, ainda em fase de estudo, com outra fonte renovável em estágio mais maduro de desenvolvimento tecnológico, a energia solar fotovoltaica.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A seguir estão descritos os principais pressupostos teóricos relacionados ao tema da presente pesquisa, iniciando com a energia das principais fontes renováveis estudadas, seguida pela apresentação do software utilizado na modelagem.

2.1 Energia oceânica

As ondas são formadas pelos ventos, os quais são gerados pelo aquecimento desigual da superfície terrestre pelo sol, assim a energia das ondas é proveniente da energia solar. A radiação solar causa gradientes de pressão, por causa do aquecimento desigual da superfície terrestre, resultando no surgimento dos ventos, os quais transferem energia cinética para o mar gerando as ondas, que podem viajar centenas de quilômetros até quebrarem na praia. A quantidade de energia transferida depende de alguns fatores, como a intensidade do vento, o tempo em que ele sopra sobre a superfície do oceano e o tamanho da área que o vento vai atuar (ASSIS, 2010; FLEMMING, 2012).

Uma vez que a onda é um distúrbio em um meio, que transporta energia e não massa, ela pode percorrer quilômetros sem ter muitas perdas significativas de energia. Porém, assim que a onda começa a interagir com o fundo do oceano, se iniciam as perdas por causa do atrito. Conforme Figura 1, na transição de águas profundas para intermediárias e rasas, a onda começa a perder velocidade, o comprimento de onda a diminuir, aumentando a altura da onda até que ela quebre. Nessa transição, o movimento da partícula de água também se modifica, de uma órbita de circular para elíptica, à medida que encontra as águas rasas vai se tornando cada vez mais achatada até seu movimento ser somente horizontal como ilustra a Figura 2.

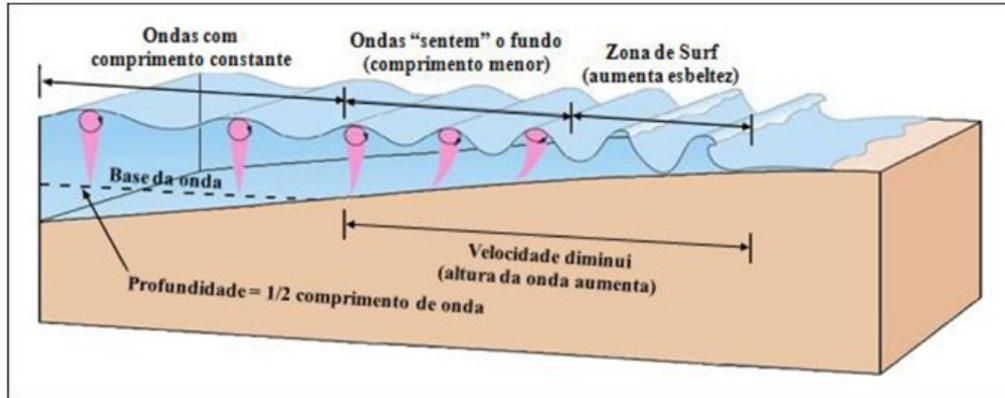


Figura 1 - Interação entre as ondas e o fundo do mar com a aproximação à costa. (Fonte: SILVA, 2012).

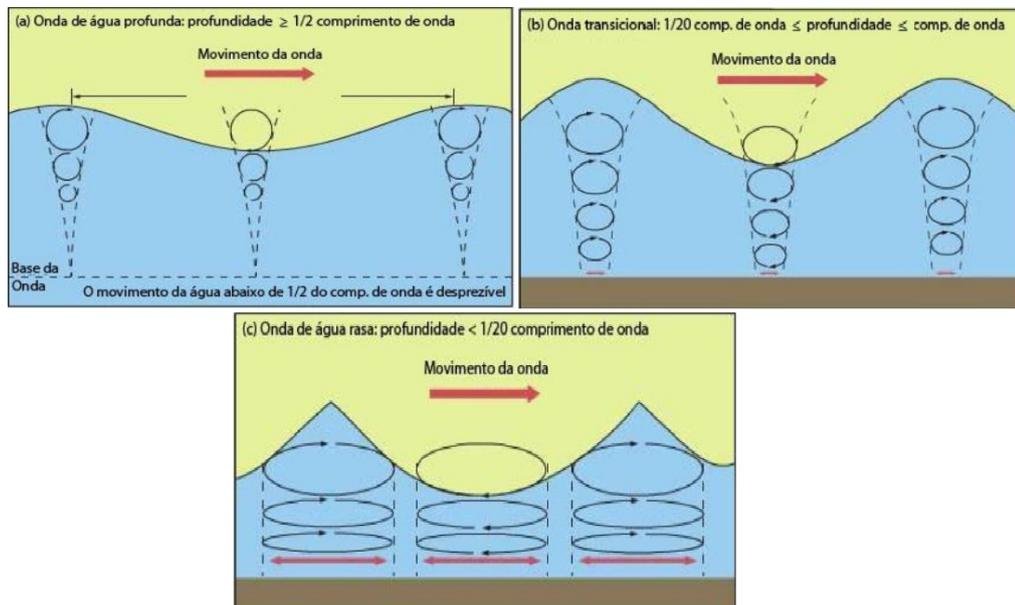


Figura 2 - Movimento das partículas de água de acordo com a profundidade e o comprimento da onda. (Fonte: FLEMING, 2012)

A potência da onda está diretamente relacionada com a energia contida na onda e com a sua velocidade de propagação. Esses aspectos são influenciados diretamente pela transformação que ocorre durante a propagação em direção à costa, pela diminuição da velocidade da onda, de um incremento na altura, resultando em variações nos valores de potência. A determinação da potência das ondas é importante para poder estimar a possibilidade de aproveitamento da energia das ondas em dispositivos de conversão.

Por meio da soma da energia cinética (equação 1) e da energia potencial (equação 2), podemos obter a equação da energia total das ondas (equação 3) gravitacionais, onde a primeira é resultante do movimento das partículas da água através do fluido e a segunda consequência do deslocamento da superfície livre da onda. A energia total ($N.m/m^2$) determina como as ondas vão se transformar durante sua propagação em direção a costa,

assim como a disponibilidade de energia que um dispositivo terá (ZANDOMENEGO *et al*, 2015).

$$E_c = \frac{1}{16} \rho g H_s^2 \quad (1)$$

$$E_p = \frac{1}{16} \rho g H_s^2 \quad (2)$$

$$E_T = E_c + E_p = \frac{1}{8} \rho g H_s^2 \quad (3)$$

Onde g é a aceleração da gravidade, em m/s^2 ; e H_s é a altura significativa, em metros. Com a energia total podemos calcular o fluxo médio de energia (potência) que é a taxa que a energia das ondas propaga-se por unidade de comprimento de crista, por meio de um plano vertical perpendicular à direção de propagação da onda. Esse fluxo (equação 4) é obtido com a multiplicação da energia total (E_T) com a velocidade de grupo (C_g) em qualquer profundidade dada pela equação 5. Para os cálculos de potência foi utilizada a teoria linear de onda adaptando o uso da altura significativa e do período significativo, na tentativa de melhor representar o mar complexo.

$$P = E_T \cdot C_g \quad (4)$$

$$C_g = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{L}} \quad (5)$$

Sendo h a profundidade da coluna de água (m), C_g a velocidade de grupo (m/s) e L o comprimento de onda (m). Quando as ondas se propagam em direção à costa, ocorrerão modificações na velocidade de grupo devido às deformações das ondas, conforme a batimetria, correntes e vento. Resultando em uma série de transformações progressivas na sua direção, comprimento, altura e forma. A refração das ondas é um dos efeitos provocados pela variação de profundidade e determina as mudanças que ocorrem nas características das ondas em águas intermediárias e rasas. Desta forma, a velocidade de grupo tende a variar na mudança de profundidade em águas rasas e intermediárias, conforme sofrem refração na direção dessas regiões. Logo para uma praia reta e longa e com a inclinação do fundo uniforme, as ondas vão se propagar perpendiculares a linha de costa (DEAN, DALRYMPLE, 1991), favorecendo alterações na onda. Substituindo essas equações na equação de potência, obtemos a equação de potência para qualquer profundidade (equação 6):

$$P = \frac{1}{8} \rho g H_s^2 \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{L}} \quad (6)$$

Em águas profundas a celeridade da onda depende do seu comprimento (L) e em águas rasas, depende somente da profundidade (h), assim a potência para águas profundas e rasas pode ser descrito pelas equações equação 7 e 8:

$$P_p = \frac{1}{8} \rho g H^2 \sqrt{\frac{gL}{2\pi}} \quad (7)$$

$$P_r = \frac{1}{8} \rho g H^2 \cdot \sqrt{gh} \quad (8)$$

A superfície terrestre é composta por 70% de água. A estimativa do potencial proveniente das ondas é de aproximadamente 2 TW, a Figura 3, apresenta a distribuição mundial do potencial oceânico. Segundo SOUZA (2011) e OSTRITZ (2012) já existem muitos trabalhos que verificaram o potencial energético em várias regiões como Portugal, Suécia, Espanha, Austrália e Estados Unidos.

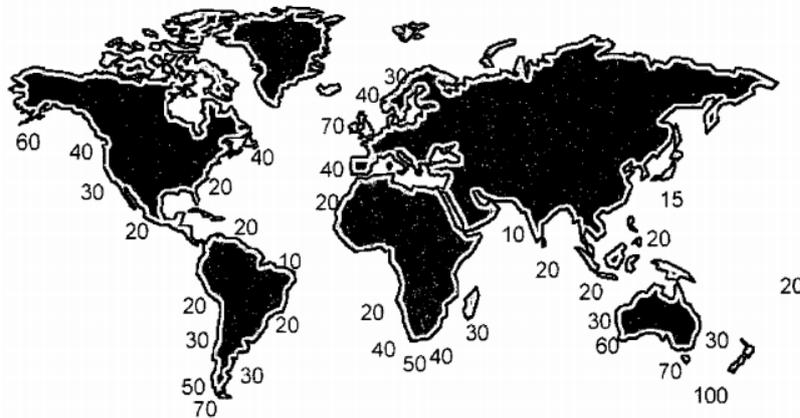


Figura 3 - Distribuição mundial do potencial oceânico (kW/m) (Fonte: COSTA, 2004)

A conversão da energia das ondas pode ser feita por diferentes dispositivos, sejam eles instalados na costa, próximos, ou longe dela. O lugar onde há mais projetos e estudos é na Europa. Um exemplo é o Pelamis P-750, instalado na costa portuguesa de Aguçadoura, um conversor de energia das ondas construído pela Pelamis *Wave Power* Ltd. O sistema é instalado na direção de propagação da onda, sendo um dispositivo semi-submerso com secções cilíndricas, unidas por juntas articuladas onde está o módulo de conversão da energia. Cada Pelamis (Figura 4a) possui três módulos de conversão de energia com 250 kW de potência cada módulo, e comprimento de 120 metros (GODINHO, 2010).

Outro exemplo é o dispositivo de coluna de água oscilante (CAO), que funcionam da seguinte forma: a onda entra na estrutura e faz o ar passar por uma turbina, em seguida, quando a onda recua, baixa o nível de água fazendo com que o ar circule na direção contrária da anterior. Esse movimento aciona uma turbina de ar que está acoplada a um gerador elétrico. Diversos protótipos CAO foram construídos na Noruega, China, Reino Unido (LIMPET), Portugal, entre outros. O dispositivo LIMPET, foi desenvolvido pela *Wavegen Ltd.* na Irlanda junto com a Universidade de *Belfast* (Figura 4b), com 500 kW de potência e foi instalado na Escócia (GODINHO, 2010).



Figura 4 - Dispositivos conversores de energia das ondas: a) Pelamis, b) Dispositivo de coluna de água oscilante. (Fonte: GODINHO, 2010)

O Brasil possui um litoral com aproximadamente 8000 km e está sob uma área com sistemas meteorológicos propícios à formação das ondas, fato que favorece a implantação de plantas capazes de aproveitar essa energia, sendo uma forma de diversificar a matriz energética. Segundo OSTRITZ (2012), o fato de 70% da população estar concentrada próxima a linha de costa favorece esse tipo de aproveitamento energético, pois pode apresentar redução de custo e perdas durante a transmissão da energia até o consumidor final. Para a costa brasileira, em águas profundas, estima-se que o potencial energético médio anual teórico esteja em torno de 15 kW/m e 25 kW/m, com exceção do litoral sul, que varia entre 25 kW/m e 30 kW/m (SOUZA, 2011).

A primeira usina de ondas oceânicas das Américas, foi instalada no Porto de Pecém, no município de São Gonçalo do Amarante, no Ceará (CE), Brasil. É um protótipo (Figura 5a) de 50 kW de potência e foi desenvolvido um convênio entre a COPPE, Eletrobrás e o Governo do Estado do Ceará, a tecnologia é brasileira e o seu diferencial é usar um sistema de alta pressão para mover a turbina e o gerador (BESERRA, 2007).

O conjunto completo consiste em: um flutuador e um braço mecânico que, movimentados pelas ondas, acionam uma bomba para pressurizar água doce e armazená-la num acumulador conectado a uma câmara hiperbárica. A pressão na

câmara equivale à de colunas d'água entre 200 e 400 metros de altura, semelhante às das usinas hidrelétricas. A água altamente pressurizada forma um jato que movimenta a turbina. Esta, por sua vez, aciona o gerador de energia elétrica (COPPE/UFRJ, 2016).

Também da COPPE/UFRJ, porém em parceria com Furnas e a empresa *Seahorse Wave Energy*, vem sendo desenvolvido um projeto para geração de energia elétrica a partir da movimentação das ondas do mar na cidade do Rio de Janeiro. O conversor *offshore* (Figura 5b), que será instalado a 14 km da praia de Copacabana, terá capacidade instalada de 100 kW, podendo abastecer 200 casas familiares (PLANETA COPPE, 2015).

O engenheiro Paulo Roberto, sócio-proprietário da *Seahorse Wave Energy*, diz que a geração de energia se dará a partir da movimentação vertical de um flutuador de 11 metros de altura e 4,5 metros de diâmetro, impulsionado pelas ondas do mar. “O flutuador será guiado por uma coluna central, com fundação no leito marinho, e a sua movimentação será transformada em movimento rotativo no gerador, utilizando-se um sistema mecânico que integrará o flutuador e o gerador”, detalha Paulo (PLANETA COPPE, 2016).



Figura 5 - Usinas para aproveitamento da energia das ondas: a) Porto de Pecém. (FONTE: COPPE /UFRJ, 2016). b) Rio de Janeiro. (Fonte: PLANETA COPPE, 2016).

Embora a tecnologia de conversão de energia das ondas em energia elétrica já esteja em desenvolvimento no país, ainda possui grandes desafios como a disseminação do conhecimento na área, os elevados custos tanto de coleta de dados como de instalação das estruturas, e a conscientização da população para os benefícios desse tipo de energia.

2.2 Energia solar

A energia solar provém da radiação incidente, que é aquela que atravessa a atmosfera da Terra. Embora essa radiação seja relativamente constante, ela sofre perdas até chegar à superfície terrestre, como mostra a Figura 6. Estas perdas podem estar relacionadas aos efeitos de absorção e reflexão da atmosfera, ou também pelos níveis de poluição, presença de nuvens

e pela latitude do local. Aproximadamente 18% da energia incidente são absorvidos diretamente pelo ozônio e pelo vapor d'água na atmosfera terrestre. Cerca de 30% da radiação solar incidente são imediatamente refletidos pelas nuvens e pela superfície terrestre para o espaço. Além desses fatores, a inclinação do eixo da Terra, e a sua trajetória elíptica ao redor do sol, também vão interferir nos valores de radiação solar incidente, como mostra a Figura 7. Acredita-se que a energia solar incidente sobre a terra seja equivalente a 10 mil vezes o consumo energético mundial. (ANEEL, 2005, CORTEZ, 2013, BARRY, 2012).

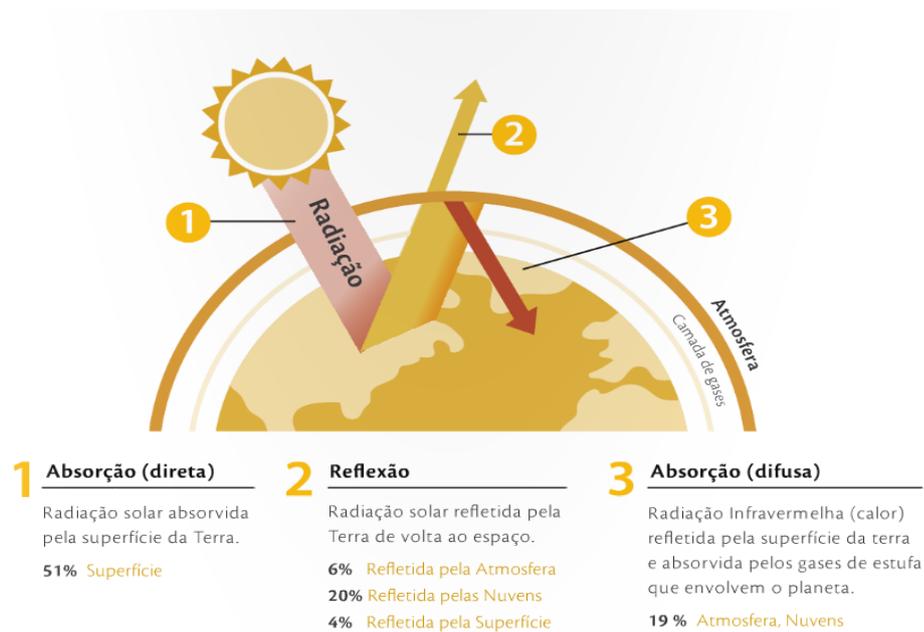


Figura 6 - Processos de interação entre a radiação solar e a atmosfera terrestre. (Fonte: GUERRA, 2011)



Figura 7 - Representação das estações do ano e do movimento da Terra ao redor do Sol. (Fonte: ANEEL, 2005)

A radiação solar pode ser convertida em eletricidade através do efeito fotovoltaico. Nesse sistema a transformação da radiação solar em eletricidade é direta por meio de um semicondutor (geralmente silício) que na medida em que é estimulado pela radiação, permite o fluxo de partículas positivas e negativas. As células fotovoltaicas possuem duas camadas de

semicondutores, uma carregada negativamente e outra positivamente, formando então uma junção eletrônica (BOYLE, 2012). Assim que o sol atinge o semiconductor na região dessa junção, há um fluxo de elétrons devido ao campo elétrico existente. Embora quanto maior a intensidade da luz, maior vai ser o fluxo de energia elétrica, um sistema fotovoltaico também pode gerar eletricidade em dias nublados (ANEEL, 2008).

Os países desenvolvidos são os maiores produtores e consumidores de energia solar, como os Estados Unidos que possuem cerca de 365 MW de potência instalada e o Japão possui 1,13 GW. Outro exemplo é a Itália, que por meio de incentivos financeiros, no ano de 2011, obteve um recorde de potência instalada (9,3 GWp), e até o fim de 2013, era o segundo maior mercado de energia solar fotovoltaica do mundo. Em 2014, esse recorde foi quebrado pela China, que cresceu 10,4 GWp (GUERRA, 2011; WWF, 2015).

O território brasileiro está em sua maior parte próximo à linha do equador, de forma que não se observam grandes variações da radiação solar. Segundo CABRAL, TORRES E SENNA (2013), a região menos ensolarada do Brasil, apresenta maiores índices solares (1642 kWh/m²/anual), do que as áreas com maior incidência solar na Alemanha (1300 kWh/m²/anual), conforme Figura 8. Ainda assim a Alemanha é responsável por 44% da energia solar produzida na Europa. O Brasil possui grande potencial para aproveitamento desse tipo de energia e necessita de mais energia para crescer, mas ainda está muito atrás dos países europeus (WWF, 2015).

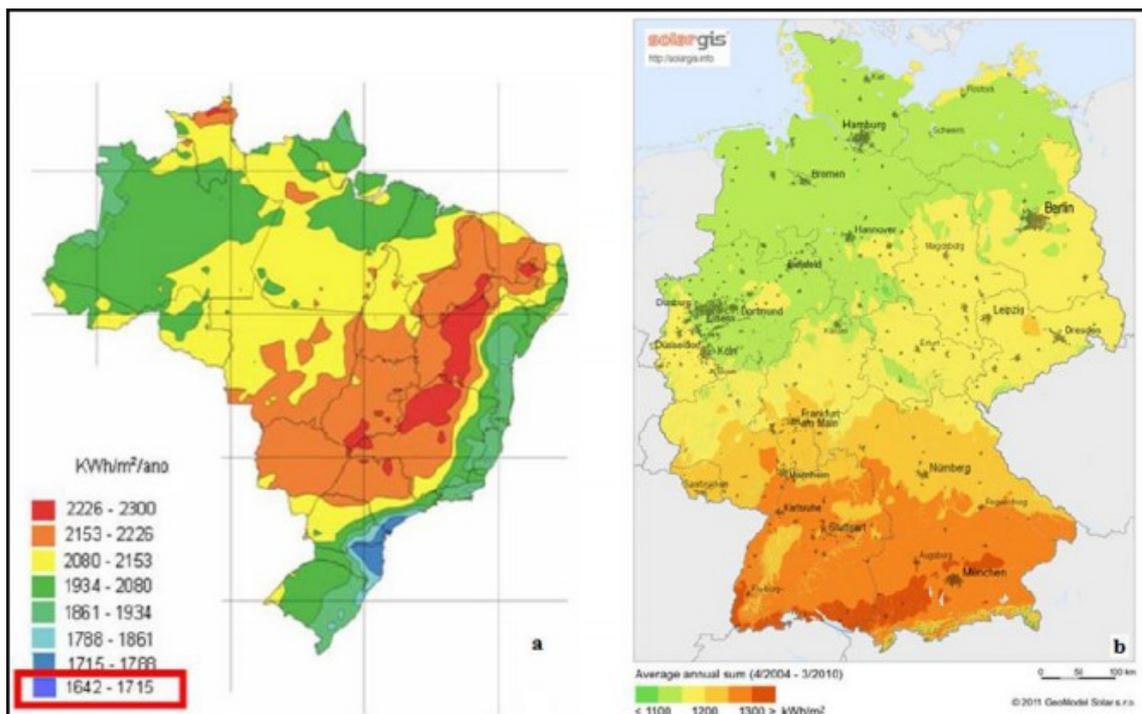


Figura 8 - Irradiação solar no Brasil (a) e na Alemanha (b). Média anual da radiação global incidente no plano horizontal. (Fonte: CABRAL, TORRES E SENNA, 2012)

Em agosto de 2014, entrou em operação em Tubarão (SC), a maior planta solar fotovoltaica em funcionamento no País, ocupando uma área total de 10 hectares, com capacidade instalada de 3MWp (pico de incidência do Sol) e composta por 19.424 painéis. Essa usina foi concebida como uma usina experimental para usos em pesquisa, desenvolvimento e capacitação técnica e teve um investimento de R\$ 30 milhões, está conectada a rede da CELESC (Centrais Elétricas de Santa Catarina S.A.) e consegue abastecer aproximadamente 2,5 mil residências (SANTA CATARINA, 2016).

Outro projeto interessante no Brasil é o programa Luz para Todos, que visa levar energia elétrica para comunidades remotas da Amazônia por meio de miniusinas fotovoltaicas, distribuídas por mini redes. Esse projeto já atinge diversos municípios como Eirunepé, Beruri, Novo Airão, Barcelos, Maués em onze plantas no Amazonas, além do Pará e Maranhão e também deve atender as demais comunidades isoladas, onde não é possível levar a rede elétrica convencional (MME, 2016).

Um dos últimos projetos realizados no Brasil é a geração de energia elétrica por placas solares flutuantes no lago de uma usina hidrelétrica. O Ministério de Minas e Energia (MME), junto com a Eletronorte e Chesf, também com empresas e institutos de pesquisa irão investir R\$ 100 milhões em ações previstas até janeiro de 2019, para gerar 10MWp de energia elétrica. A entrega das primeiras plantas-piloto em Balbina (AM) e Sobradinho (BA) está prevista para agosto de 2016, gerando 1MWp em cada unidade (MME, 2016).

Outra forma de geração de energia são os módulos fotovoltaicos sobre os telhados em residências e edificações, sejam eles conectados a rede ou isolados. A eletricidade gerada pelos módulos pode ser armazenada em baterias ou usadas imediatamente, além de poder ser lançada na rede elétrica caso a geração fotovoltaica seja maior que a energia consumida. Segundo o Ministério de Minas e Energia (2015), acredita-se que até 2030, 2,7 milhões de unidades consumidoras poderão gerar sua própria energia. Dessa forma, todos os projetos descritos anteriormente representam grande importância para o incentivo para o desenvolvimento e exploração da energia solar no país.

2.3 O software Homer *Energy*

O software *Homer Energy* é um modelo computacional proposto pelo Laboratório Nacional de Energias Renováveis americano (National Renewable Laboratory - NREL). Ele auxilia na pesquisa e desenvolvimento em energias renováveis e eficiência energética. O programa foi desenvolvido para estimar alternativas de projeto em sistemas com fontes de energia conectadas ou não a rede. O software 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. Dessa forma, facilita ao usuário comparar diversas opções de projeto baseadas em suas características econômicas e técnicas, da mesma maneira auxilia o projetista a entender e a quantificar os efeitos das incertezas ou de mudanças nos dados de entrada (WOTTRICH, 2010; CHAIM, 2011; SILVA, 2012).

O HOMER faz cálculos de balanço de energia para cada configuração de um sistema que se queira avaliar e determina se a configuração é viável ou não, além de estimar o custo de instalação e operação do sistema durante sua vida útil. Por esse motivo, é indicado para o presente estudo, possibilitando tanto a avaliação da implantação quanto da operação dos sistemas conversores na plataforma de pesca. O programa atua tanto na simulação quanto na otimização, a fim de minimizar o custo total presente líquido. O software trabalha em três níveis: simulação, otimização e sensibilidade (HOMER, 2012).

Na simulação, o software determina como um modelo particular do sistema opera ao longo do tempo, faz as simulações com uma base horária ao longo do ano, e varre o ano a cada hora, avaliando a disponibilidade da energia renovável. Em caso de déficit, avalia como melhor gerar ou receber energia da rede, ou em caso de excesso de energia, como proceder. De tal forma, o HOMER avalia os parâmetros necessários para estimar o custo do ciclo de vida como o tempo de vida da bateria e a quantidade de energia que vai ser comprada da rede anualmente, tudo isso atendendo às restrições impostas pelo usuário (COSTA, 2014).

Após fazer as simulações de todas as possíveis configurações, na fase de otimização o software vai buscar a que tiver o menor custo presente líquido, respeitando as restrições técnicas do projeto. Assim, determina-se limites do espaço de valores das variáveis de decisão, cujos valores são determinados durante o processo, em que o software realiza a otimização. Alguns exemplos de variáveis de decisão são: número e tamanho do módulo solar, número de baterias, presença de geradores hidráulicos, entre outros (HOMER, 2012; COSTA, 2014).

Já na análise de sensibilidade, o usuário entra com uma faixa de valores para uma determinada variável, que são as variáveis de sensibilidade. Não sendo uma variável de decisão, qualquer variável numérica pode ser uma variável de sensibilidade como: custo de energia, custo de equipamentos, taxa de juros, entre outros. O software reproduzirá o processo de otimização novamente para cada variável de sensibilidade que é especificada. Assim, o programa avalia os efeitos das incertezas do projeto, configurando diversas otimizações em função de uma gama de dados para uma mesma entrada (BEHENCK, 2011; CHAIM, 2011; HOMER, 2012; COSTA, 2014).

Segundo Fischer (2013), as fontes renováveis e não renováveis têm atributos de custos diferentes. A primeira tende a ter altos custos de investimentos e baixos custos operacionais, já a segunda tende a ter baixos custos de investimentos e altos custos operacionais. Neste trabalho pretende-se avaliar os custos de investimentos e operacionais para duas fontes renováveis em diferentes estágios de maturidade tecnológica.

2.3.1 Cálculo da potência de saída do módulo fotovoltaico

Segundo SILVA (2012), para o cálculo de potência de saída do módulo fotovoltaico, o HOMER utiliza a seguinte equação:

$$P_{PV} = Y_{PV} \cdot f_{PV} \cdot \left(\frac{\bar{G}_T}{\bar{G}_{T,CPT}} \right) \cdot [1 + \alpha_P (T_C - T_{C,CPT})] \quad (9)$$

Onde P_{PV} é a potência de saída do módulo fotovoltaico (kW), Y_{PV} é a capacidade nominal do módulo fotovoltaico ou a potência de saída em condições padrão de teste* (kW), f_{PV} é o fator de desclassificação do módulo fotovoltaico (%), \bar{G}_T é a radiação solar incidente sobre o módulo fotovoltaico no intervalo de tempo corrente (kW/m²), $\bar{G}_{T,CPT}$ é a radiação incidente em condições padrão de teste (1 kW/m²), α_P é o coeficiente de variação da energia com a temperatura (%/°C), T_C é a temperatura da célula fotovoltaica no intervalo de tempo corrente (°C), e $T_{C,CPT}$ é a temperatura da célula fotovoltaica em condições padrão de teste (25°C).

Se na janela de entradas do módulo fotovoltaico for escolhida a opção para não modelar o efeito da temperatura sobre o módulo, o HOMER assume que o coeficiente de variação da energia com a temperatura é zero fazendo a equação ser simplificada como segue:

$$P_{PV} = Y_{PV} \cdot f_{PV} \cdot \left(\frac{\bar{G}_T}{\bar{G}_{T,CPT}} \right) \quad (10)$$

Os dados de radiação solar (Figura 9) são conseguidos através do próprio software que obtém os valores por meio da NASA, como pode ser visto no gráfico abaixo dos valores de radiação.



Figura 9 - Valores de radiação utilizados na simulação. (Fonte: do autor)

2.3.2 Cálculo da potência de saída da usina de ondas

Para realizar a simulação de uma usina de ondas oceânicas, fazem-se necessárias algumas adaptações, visto que o programa não oferece uma simulação específica para esse tipo de usina. Assim, utiliza-se a opção no software de usina hidrelétrica, porém inserindo valores de alturas significativas (H_s) e períodos (T_e).

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

$$P_{hidro} = \eta_{hidro} \cdot \rho_{água} \cdot g \cdot h_q \cdot Q \quad (11)$$

Sendo P_{hidro} a potência de saída da turbina hidráulica (W), η_{hidro} a eficiência da turbina hidráulica (%), $\rho_{água}$ é a massa específica da água (1000 kg/m^3), g é a aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m/s}^2$), h_q é a altura vertical, altura de queda ou carga hidráulica (m) e Q é a vazão da turbina hidráulica (m^3/s).

Segundo SILVA (2012), para achar uma equação que defina a potência das ondas geradas, é necessário uma comparação entre as fórmulas para o cálculo de potência gerada das ondas oceânicas e da potência gerada por uma turbina hidráulica, conforme será demonstrado.

A equação de potência utilizada para águas rasas (onde está a plataforma de pesca) depende energia das ondas e da velocidade:

$$P = \frac{1}{8} \rho g H_s^2 \cdot \sqrt{gh} \quad (12)$$

Faz-se a igualdade entre as potências das ondas e hidráulica, mas a potência de ondas oceânicas resulta em W/m e a potência hidráulica resulta em W, assim multiplicou-se a equação 12 uma variável L , representando o comprimento da usina de ondas, para que as formulas resultassem na mesma unidade (W). Então, substituindo também os valores de $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$, $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ e $h = 4 \text{ m}$ temos para equação de potência das ondas em águas rasas:

$$P = 7861,456 \cdot H_s^2 \cdot L \quad (13)$$

Então comparando a equação 11 e a equação 13 obtemos uma equação para calcular as vazões dadas por um rio hipotético, as quais são calculadas em função das alturas significativas.

$$P_{hidro} = P_{ondas}$$

$$\eta_{hidro} \cdot \rho_{\acute{a}gua} \cdot g \cdot h_q \cdot Q = 7861,456 \cdot H_s^2 \cdot L \quad (14)$$

$$Q = \frac{7861,456 \cdot H_s^2 \cdot L}{\eta_{hidro} \cdot \rho_{\acute{a}gua} \cdot g \cdot h_q} \quad (15)$$

Onde Q é a vazão da turbina hidráulica (m³/s); H_s é a altura significativa de onda (m); L é o comprimento da usina de ondas (0,25 m); η_{hidro} é a eficiência da turbina hidráulica (73,67 %); ρ é a massa específica da água (1025 kg/m³); g é a aceleração da gravidade (9,8 m/s²) e h_q é a altura vertical ou altura de queda (3 m). Os valores da turbina, comprimento da usina de ondas e altura de queda foram retirados do autor DALLA VECCHIA (2016). No software Homer os dados de vazão devem ser em L/s, desta forma os valores encontrados em m³/s devem ser multiplicados por 1000 para que resultem na unidade adequada. A tabela abaixo mostra os valores mensais de vazão (L/s).

Tabela 1 - Dados de vazão utilizados.

Mês	Vazão (L/s)
Janeiro	160,179
Fevereiro	144,743
Março	111,842
Abril	177,915
Mai	159,776
Junho	139,296
Julho	116,105
Agosto	175,876
Setembro	162,166
Outubro	132,438
Novembro	118,929
Dezembro	183,281

Fonte: do autor.

Essa metodologia foi testada por SILVA (2012) e SILVA, BELUCO e ALMEIDA (2014), os quais apresentaram resultados satisfatórios.

3 METODOLOGIA

3.1 Área de estudo

O município de Balneário Arroio do Silva - SC (Figura 11a) possui aproximadamente 11.616 mil habitantes e uma extensão territorial de 95259 km², segundo IBGE (2015). Suas principais atividades econômicas são a pesca e o turismo. A Plataforma de Pesca Entremares (Figura 10b) representa um local propício para pesquisa e implantação de conversores de

ondas em energia elétrica de pequena escala. No local a demanda de energia é composta pela carga da plataforma e também pela carga de um restaurante no local.

Conforme Tessler e Goya (2005), o segmento litorâneo que vai do Cabo de Santa Marta (SC) até o Chuí (RS), tem a mesma caracterização, dada por uma linha de costa retilínea, associada a planícies costeiras extensas e arenosas e de baixa altitude (Figura 10c). Já segundo Alves et al. (2009), os campos de ondulações provenientes de Sudoeste dominam praticamente todo o Oeste do Atlântico Sul. Este estado de mar deixa de ser dominante, no momento em que ondas do quadrante Norte, provavelmente gerados pela circulação atmosférica à superfície associada ao anticiclone do Atlântico, passam a dominar algumas áreas (ZANDOMENEGO *et al*, 2015).



Figura 10 - Localização da área de estudo: a) Balneário Arroio do Silva (SC), b) Plataforma de Pesca Entremares, c) Costa de Balneário Arroio do Silva (SC). (Fonte: do autor)

3.2 Análise de dados

Os cálculos de potência (Equações 6, 7 e 8) são baseados em informações médias anuais e sazonais, e buscam a diferença de disponibilidade energética das diferentes estações do ano. Os principais parâmetros empregados são a altura significativa (H_s) e no período médio de energia (Te). Como a coleta de dados no oceano é muito caro e sendo o mar um ambiente hostil se tornou inviável a coleta de dados na região estudada. Desta forma, os dados utilizados para os parâmetros foram de Tramandaí (RS), cedidos pelo professor Elírio E. Toldo Jr da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. A utilização desses dados se justifica pelo fato que o segmento litorâneo de Chuí (RS) até o Cabo de Santa Marta (SC) apresenta as mesmas características oceanográficas. Assim, Balneário Arroio do Silva (SC) e Tramandaí

(RS), que estão a 134 km uma da outra, possuem uma costa de linha retilínea, associados a planícies costeiras extensas e arenosas de baixa altitude, fazendo com que as duas praias passem pelas mesmas forçantes oceanográficas, sendo desprezível a diferença entre seus padrões de comportamento de ondas durante o ano (TESSLER, GOYA, 2005).

A altura significativa pode ser entendida como a média das alturas do terço superior das ondas individuais, ordenadas da menor até a maior, durante o período de observação, sendo a melhor representação de uma onda irregular. É usada quando se faz necessário apenas o valor de altura de onda, como é o caso da aplicação da equação de conservação de energia para estudo das transformações da onda. A análise detalhada dos dados foi descrita por ZANDOMENEGO *et al* (2015).

3.3 Simulação

A Figura 11 apresenta algumas combinações utilizadas no programa com os respectivos “botões” utilizados para cada componente do projeto.

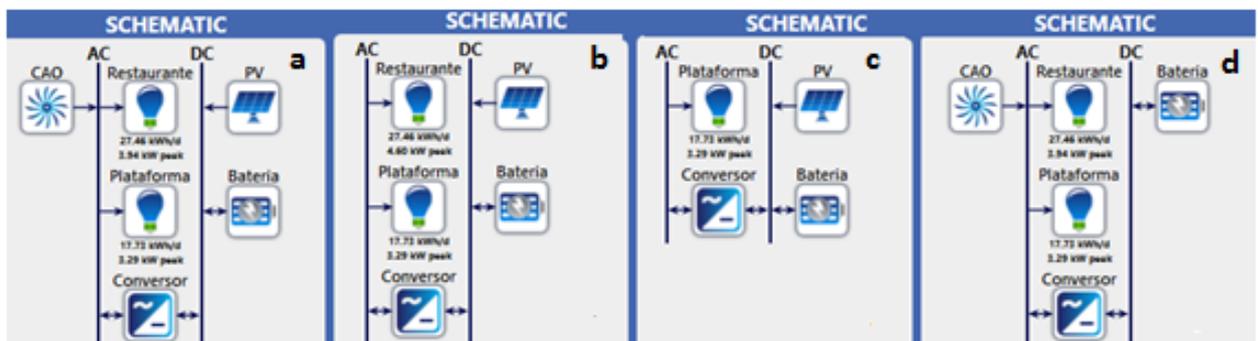


Figura 11 - Esquemas utilizados para simulação no software Homer: a) Utilizando energia das ondas e solar, b) utilizando somente solar, c) utilizando apenas energia solar e a carga da plataforma, d) utilizando apenas a energia das ondas. (Fonte: do autor)

A Tabela 2 mostra os dados utilizados para a usina solar e de ondas com suas respectivas referências. Já a Tabela 3 mostra os dados utilizados para a turbina Wells, segundo o trabalho de DALLA VECCHIA *et al* (2016). Nos valores da coluna de água oscilante já estão inclusos os geradores, multiplicadores e afins, e nos custos dos painéis solares foram utilizados valores para 1,5 kW como base dos custos. Porém, nos cálculos feitos para dimensionar a capacidade dos painéis para atender a carga da plataforma são necessários cerca de 10 kW de potência, considerando que há perdas no sistema também foram utilizados capacidades de painéis de 10, 15, 20, 30 e 40 kW. Os valores dos custos estão em dólares.

Tabela 2 - Dados utilizados usina de ondas e solar.

	Módulo Solar	Referência utilizada	Coluna de água oscilante	Referência utilizada
Capital Inicial (\$)	5300	NEOSOLAR ENERGIA, 2016	50000	SILVA, BELUCO e ALMEIDA, 2014
Reposição (\$)	5300	NEOSOLAR ENERGIA, 2016	40000	SILVA, BELUCO e ALMEIDA, 2014
O&M	1% ao ano	NAKABAYASHI, 2015	\$2500	SILVA, BELUCO e ALMEIDA, 2014
Vida útil	25 anos	NEOSOLAR ENERGIA, 2016	21 anos	SILVA, BELUCO e ALMEIDA, 2014
Capacidade	1,5 kW	NEOSOLAR ENERGIA, 2016	11,4 kW	Dado calculado pelo próprio HOMER

Fonte: do autor.

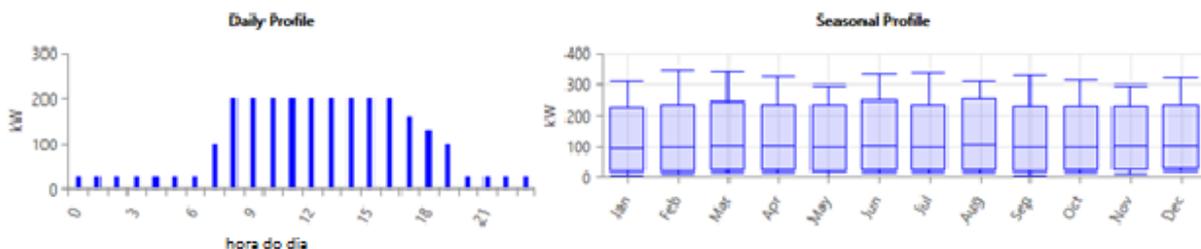
Tabela 3 - Dados da Turbina Wells.

TURBINA WELLS		
Available head (m)	3	Altura de queda disponível
Design flow rate (L/s)	437.00	Vazão nominal da turbina
Minimum flow ratio (%)	0	Vazão mínima
Maximum flow ratio (%)	110	Vazão máxima permitida antes do desligamento
Efficiency (%)	70,99	Eficiência total do conjunto turbina-gerador
Power nomination (W)	73,67	Potência nominal
Pipe head loss (%)	21,47	Perda de atrito na tubulação expressa como uma porcentagem da altura de queda

Fonte: DALLA VECCHIA, 2016.

Para estipular a eficiência da turbina, foi realizado um cálculo simples, apenas considerando a potência de saída e a potência disponível, resultando em uma eficiência muito maior do que as encontradas pelas referências. De tal forma, optou-se por usar a eficiência de 70,99% disponível em DIAS (2013), que levou em consideração mais parâmetros.

Para as cargas atendidas pelo sistema, que são a plataforma de pesca e o restaurante, foi utilizado para cada um, um comportamento padrão oferecido pelo software Homer, sendo apenas ajustada a escala da carga total atendida para a realidade local, como pode ser visto nas Figuras 12 e 13.

**Figura 12** - Perfil de carga diário e anual de base fornecido pelo HOMER para o Restaurante. (Fonte: do autor)

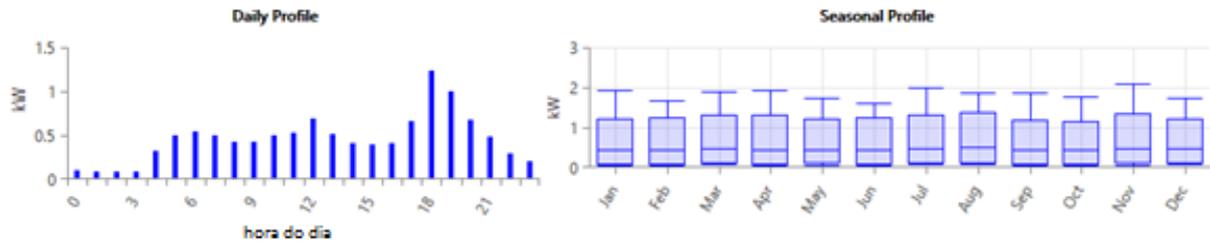


Figura 13 - Perfil de carga diário e anual de base fornecido pelo HOMER para a Plataforma. (Fonte: do autor)

Para a demanda do restaurante a curva modelo utilizada foi a comercial, onde o pico de carga diário se encontra entre as 8h e às 16h e mensal entre fevereiro e março. Já para a Plataforma a curva modelo utilizada foi a residencial, onde o pico de carga diário se encontra na parte da noite. Na Figura 14 estão os valores utilizados para o restaurante, baseados nos valores de consumo mensal do local, como a média diária de 27,09 kWh/d, potência média de 1,13 kW, pico de 3,89 kW e fator de carga de 0,29. E na Figura 15 está os valores utilizados para a plataforma, também baseados nos valores de consumo mensal do local, como a média diária de 17,49 kWh/d, potência média de 0,73 kW, pico de 3,25 kW e fator de carga de 0,22.

Metric	Baseline	Scaled
Average (kWh/d)	2,422.3	27.09
Average (kW)	100.93	1.13
Peak (kW)	347.79	3.89
Load Factor	.29	.29

Figura 14 - Informações sobre a carga elétrica do Restaurante. (Fonte: do autor)

Metric	Baseline	Scaled
Average (kWh/d)	11.26	17.49
Average (kW)	.47	.73
Peak (kW)	2.09	3.25
Load Factor	.22	.22

Figura 15 - Informações sobre a carga elétrica da Plataforma. (Fonte: do autor)

A Figura 16 mostra os valores utilizados para as baterias e para o conversor utilizado nas simulações, com os valores de custo tirados do próprio Homer. Segundo ANTUNES, PFITSCHER (2016), a quantidade de baterias (12V) necessárias para atender a plataforma seria de 10 baterias com profundidade de descarga de 80% podendo ter autonomia de 24 horas, com uma capacidade de 150 Ah. Mas, como no calculo do autor não levou em consideração a carga do restaurante foi necessário aumentar a quantidade de baterias. O software Homer já possui um banco de baterias distinto, então foi necessário escolher uma que mais se aproximasse daquela dimensionada. De tal forma, as baterias foram colocadas em

série para aumentar a tensão, e essas dispostas em paralelo (4, 5, 6, 7, 8, 10,20), para aumentar a corrente.

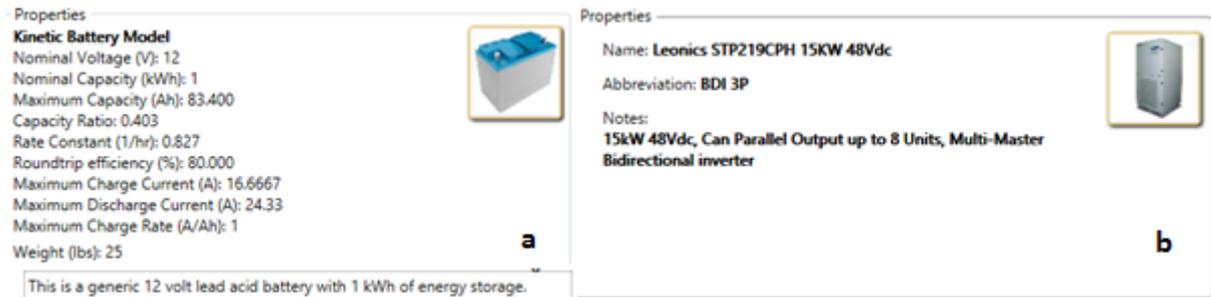


Figura 16 - Características a) baterias e b) conversor. (Fonte: autor)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 4 mostra os parâmetros de ondas já calculados por ZANDOMENEGO *et al*, (2015). Os dados mostram que os valores médios de altura significativa (H_s) ultrapassam 1 m e o período médio (T_s) não ultrapassa 7,8 s, o que indica que as ondas são formadas próximas à costa. A Figura 17 mostra os valores de altura significativa das ondas no período de novembro de 2006 a setembro de 2007 na região. Há uma maior concentração de alturas significativas entre 0,5 e 2 m apresentando alguns picos de 3 m.

Tabela 4 - Valores médios para cada estação do ano.

Estação do ano	H_s média (m)	T_s médio (s)
Primavera	1,2	6,6
Verão	1,3	7,2
Outono	1,2	7,8
Inverno	1,4	7,8
Média Total	1,2	7,7

Fonte: ZANDOMENEGO *et al*, 2015.

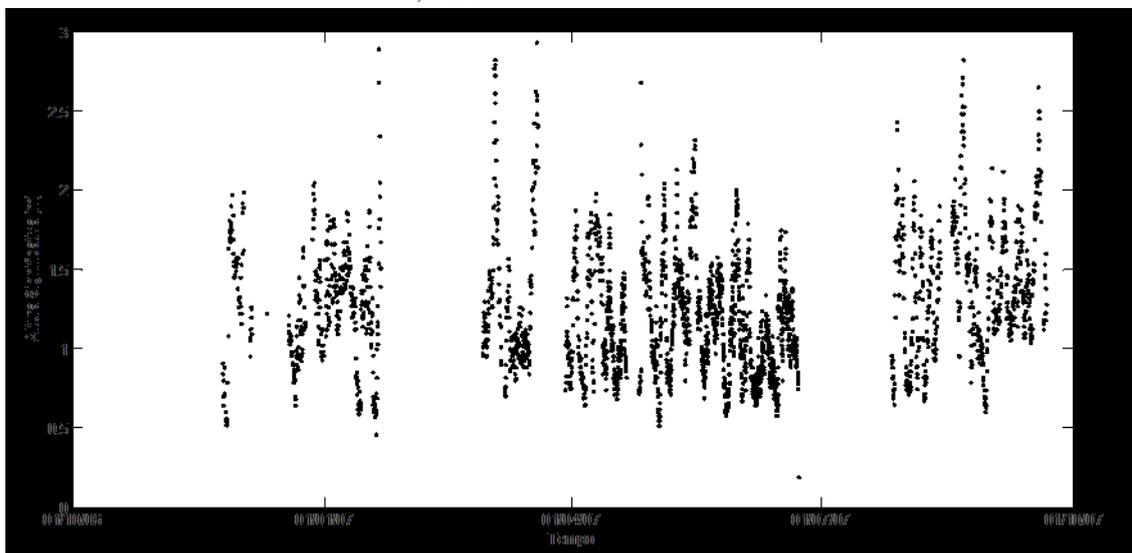


Figura 17 - Gráfico de altura significativa mensal. Os períodos que não apresentam dados são devido a manutenções dos equipamentos. (Fonte: ZANDOMENEGO *et al*, 2015)

A Tabela 5 mostra os valores anuais de potência para cada estação do ano e para cada classificação das águas de acordo com sua profundidade. Também conforme análise de ZANDOMENEGO *et al* (2015), a plataforma de pesca de Balneário Arroio do Silva se encontra a uma profundidade de 4 metros, e está em uma área de transição entre águas rasas e zona de arrebentação. Nessa área há um maior contato com o fundo, que como visto tende a aumentar a altura das ondas e por consequência sua potência.

A autora realizou os cálculos sem levar em consideração a interação com o fundo, não considerando a influencia dos coeficientes de refração e empenamento, apenas utilizou as diferentes equações para calculo da celeridade, assim acredita-se que as potências seriam maiores considerando o incremento na altura de onda. Na mudança de profundidade de águas profundas para intermediárias a onda perde cerca de 59% de potência, porém de águas intermediárias para rasas ela recupera cerca de 80% do potencial (ZANDOMENEGO *et al*, 2015).

Tabela 5 - Potência sazonal e anual de acordo com as profundidades.

	Potência (kW/m)				
	Primavera	Verão	Outono	Inverno	Anual
Rasas	12,3	15,2	11,2	16,2	13,2
Intermediárias	2,4	3,0	2,2	3,2	2,6
Profundas	4,9	6,9	5,6	8,2	6,4

Fonte: ZANDOMENEGO *et al*, 2015.

As Figuras 18 e 19 mostram os gráficos de vazão e radiação, respectivamente, obtidos no Homer. Na Figura 18, os valores de vazão, linhas verticais, apresentam uma constância ao longo do dia (24 horas), o que mostra que não há grandes variações na energia das ondas ao decorrer desse tempo. Já a Figura 19, mostra que os dados de radiação solar incidente sobre uma superfície plana apresentam um horário de pico de energia e que essa quantidade de radiação está bem distribuída ao longo do ano no local estudado. A zona preta da figura indica o período noturno onde há ausência de radiação solar.

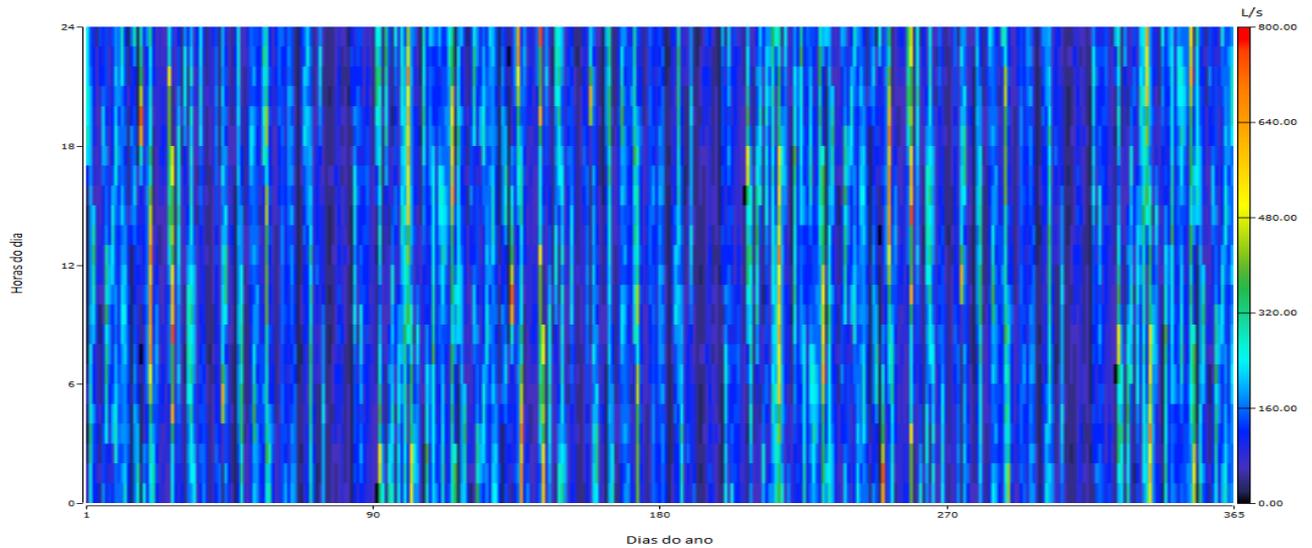


Figura 18 - Série horária das vazões obtidas através da altura significativa das ondas oceânicas. (Fonte: do autor)

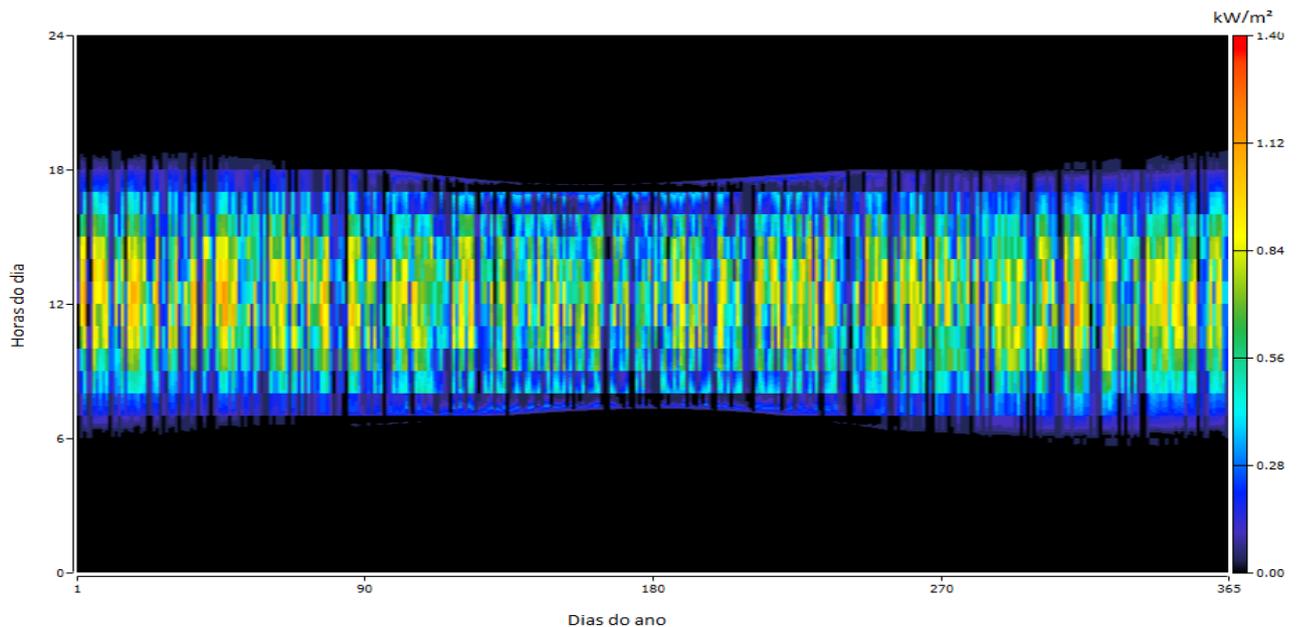


Figura 19 - Radiação solar incidente sobre uma superfície plana, segundo a latitude local obtida por meio do Homer. (Fonte: do autor)

As Figuras 20 e 21 mostram os valores de saída de potência solar, assim como a da potência de saída da turbina, respectivamente. A quantidade de radiação está diretamente relacionada com a quantidade de potência, assim a Figura 20 mostra que a potência solar também está bem distribuída. O mesmo acontece para as ondas (Figura 21). Quanto maior a vazão maior a potência, mas os picos de potência acontecem bem espaçados no tempo, chegando a alcançar o valor de 8 kW.

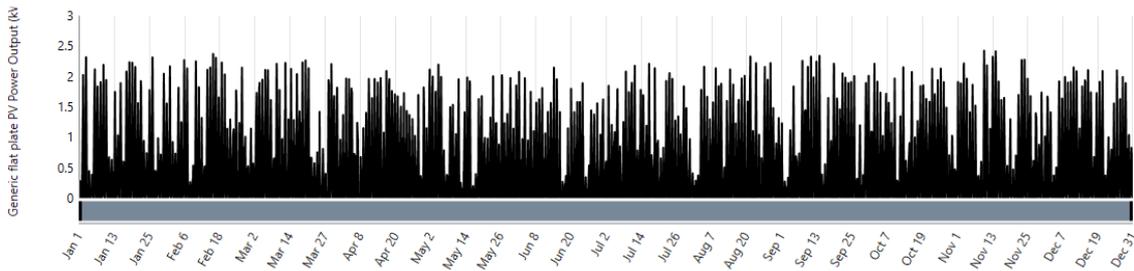


Figura 20 - Gráfico da potência de saída do módulo. (Fonte: do autor)

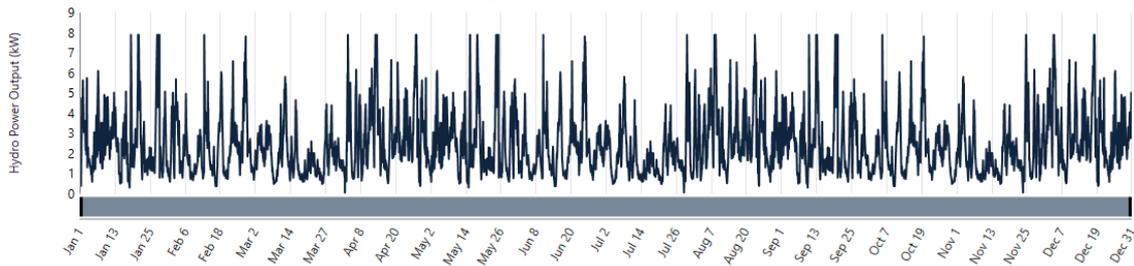


Figura 21 - Gráfico da potência de saída da CAO. (Fonte: do autor)

A Figura 22 mostra o gráfico de potência calculado com base na altura significativa no decorrer do tempo. Os valores possuem alguns espaçamentos devido a uma provável manutenção nos equipamentos de coleta de dados. As maiores concentrações de valores de potência se encontram entre 1 kW a 8 kW, acontecendo picos maiores chegando até 18 kW, fato que não se observa na Figura 21, onde mostram os valores de potência de saída na turbina hidráulica baseada nos valores de vazão.

Na Figura 21, os valores se concentram entre 1 kW e 6 kW e os valores máximos não ultrapassam os 9 kW, o que reflete as perdas do sistema que chegam a 21,47%, bem como as adaptações feitas para o projeto com relação à equação de potencial de ondas para vazão. Mesmo assim, a potência média de saída no software é de 2,42 kW, o que representa 73,3% da potência calculada com base na altura significativa (3,30 kW). Já a capacidade nominal de 9,13 kW do sistema projetado no software representa 93,07% da capacidade nominal mostrada por SILVA, BELUCO, ALMEIDA (2014), que foi de 9,81 kW, mostrando que os valores que foram utilizados para a turbina estão corretos.

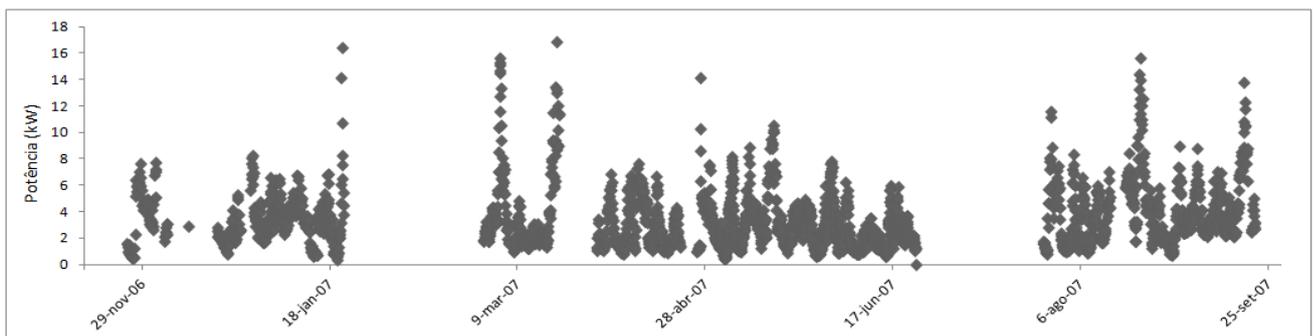


Figura 22 - Gráfico de Potência de energia das ondas calculada com base na altura significativa. (Fonte: do autor)

Os histogramas para potência de saída das ondas (Figura 23), solar (Figura 24) e total (Figura 25), foram calculados pelo software *Homer energy*. Na Figura 23, as maiores frequências acontecem entre 0,5 kW e 3 kW, sendo as mais frequentes 0,75 kW e 1,25 kW. A potência está bem distribuída, mas a máxima potência atingida chegando a 8 kW, porém não chegando muito próxima da sua capacidade nominal 9,13 kW, devido às perdas dos sistemas e a eficiência da turbina. No caso da Figura 24, a frequência da potência solar apresenta um pico na frequência 0 kW, fato justificado pelos horários noturnos onde não há radiação solar e também não chegando a atingir a sua capacidade nominal. Já na Figura 25, que mostra a potência de saída total, nota-se a sobreposição da potência das ondas sobre a solar, tendo uma distribuição de frequências parecidas com as da Figura 24, mostrando uma dominância da energia oceânica nesta distribuição.

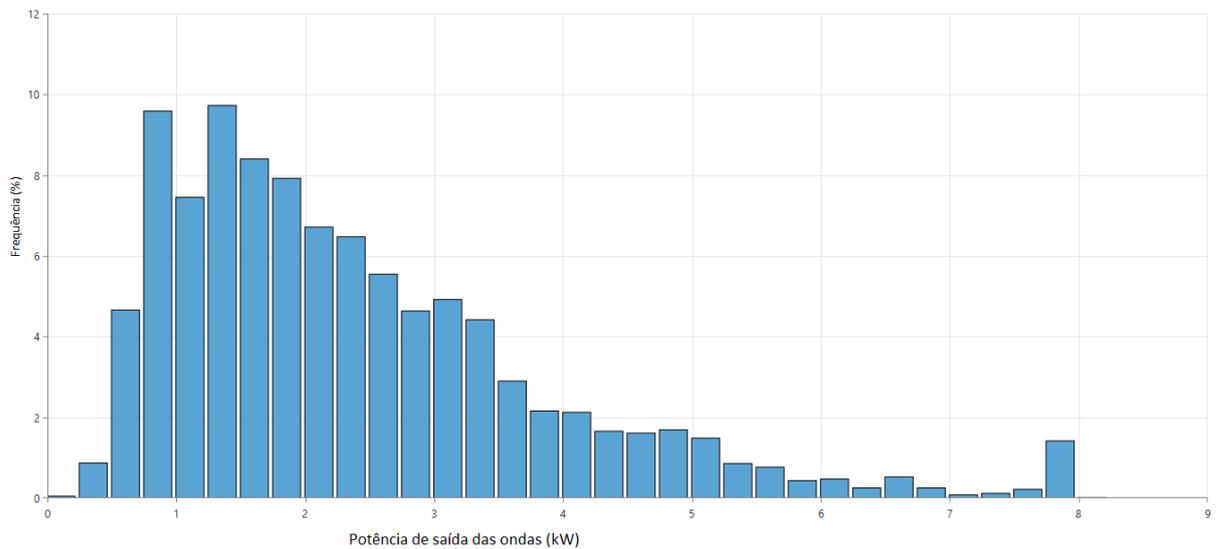


Figura 23 - Histograma de potência de saída das ondas da turbina. (Fonte: do autor)

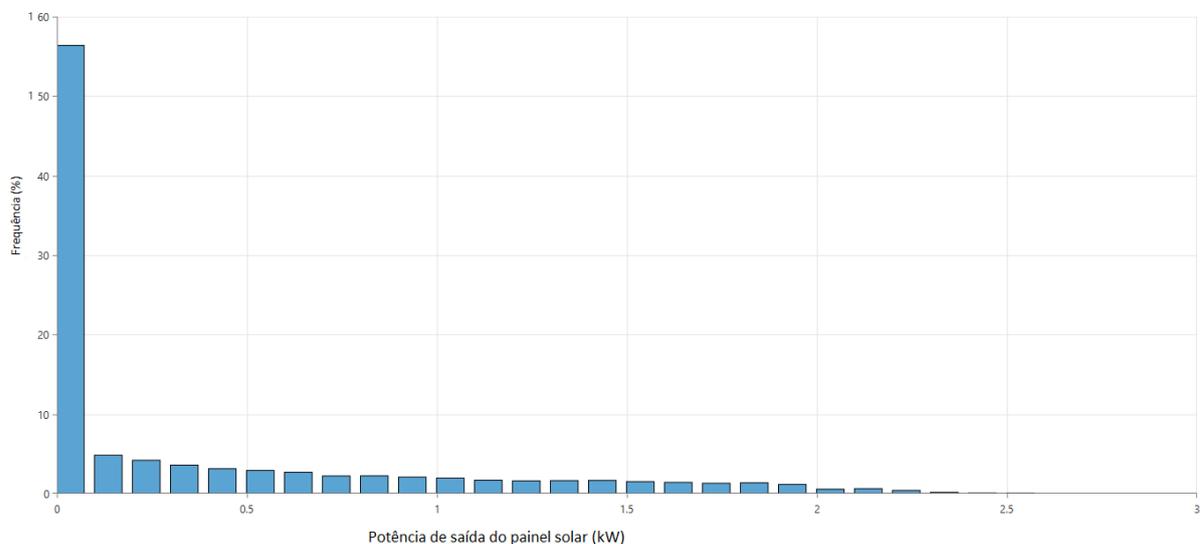


Figura 24 - Histograma de potência de saída do módulo solar. (Fonte: do autor)

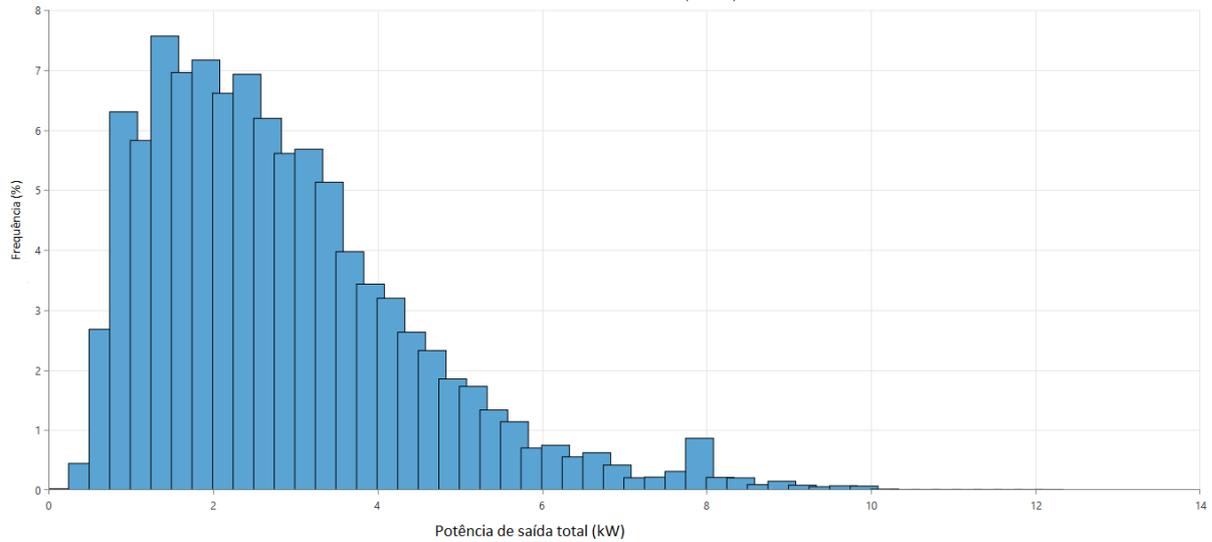


Figura 25 - Histograma potência de saída total. (Fonte: do autor)

Foram realizadas 15 simulações diferentes testando diferentes combinações de fonte, carga e autonomia. Destas, seis delas apresentaram os resultados mais interessantes, e estão dispostas na Tabela 6.

Tabela 6- Configurações encontradas.

Caso	CAO (kW)	Módulo Solar (kW)	Bateria (Quantidade)	Conversor (kW)	CARGA	NPC (US)	Excesso
C1	9.139	-	-	15	Plataforma+restaurante	Insuficiente	
C2	9.139	-	16 (autonomia: 13 horas)	15	Plataforma	403882,00	69,3%
C3	9.139	10	80 (autonomia: 31 horas)	15	Plataforma+restaurante	485918,00	41,6%
C4	-	10	-	15	Plataforma+restaurante	Insuficiente	
C5	-	40	80 (autonomia: 66 horas)	15	Plataforma	228147,00	43,7%
C6	2 x 9.139	-	40 (autonomia: 15 horas)	15	Plataforma+restaurante	419682,00	64,1%

Fonte: do autor.

Para melhor representar o custo do ciclo de vida de um projeto e analisar qual o sistema com melhor custo-benefício, o software *Homer Energy* se baseia no custo presente líquido total (do inglês *NPC – Net Present Cost*). O NPC total condensa todos os custos e receitas que ocorrem dentro do tempo de vida do projeto em um único montante fixo, usando a taxa de desconto. Esses custos podem incluir os custos de capital, substituição e operação e manutenção, custos de compra de eletricidade e outras despesas. De tal forma, quanto menor o NPC melhor é o investimento no projeto. O valor de custo presente líquido difere do valor presente líquido (VPL) apenas pelo sinal. Quando o VPL é igual à zero, o projeto se torna indiferente, se for maior que zero o projeto é viável e se for menor que zero o projeto não é atrativo economicamente (HOMER ENERGY, 2016).

No primeiro caso C1 foi realizado um teste somente com a coluna de água oscilante para atender as duas cargas (plataforma e restaurante). O resultado indicou que a capacidade de geração da CAO é insuficiente para atender ambas as cargas. Assim, foi colocada apenas a carga da plataforma, desconsiderando o restaurante obtendo-se o caso C2. Neste caso, o resultado foi satisfatório utilizando apenas 16 baterias com uma autonomia de 13 horas com um custo-benefício de US\$403882,00, o que indica que a coluna de água oscilante gera potência suficiente para atender a plataforma.

Em seguida foi analisada a mesma proposta de sistema, acrescentando painéis fotovoltaicos variando a capacidade (0, 10, 15, 20, 30 kW) e atendendo a plataforma e o restaurante (C3). O melhor resultado encontrado foi com um módulo de 10 kW, porém com 80 baterias. Embora a autonomia apresentada seja maior (31 horas), o custo-benefício de US\$485918,00 aponta inviabilidade para o projeto.

No caso C4, foi analisada uma combinação de painéis fotovoltaicos, bateria e conversor, para atender a plataforma e o restaurante. Essa alternativa resultou em capacidade insuficiente, a qual poderia ser atribuída tanto pela capacidade de geração, como, pelo conversor subdimensionado. Mesmo fazendo essas alterações o mesmo problema persistiu e esta alternativa foi considerada insuficiente pelo programa.

Foi simulada outra combinação (C5), que envolveu um módulo fotovoltaico, atendendo apenas a plataforma. O módulo necessário foi de 40 kW com 80 baterias e com uma autonomia de 66 horas, tendo o menor custo-benefício de US\$228147,00. Esta simulação se comparada com a C3, apesar do mesmo número de baterias possibilitou uma autonomia maior. Como os sistemas isolados apresentam limitações quanto ao mínimo de geração, isso pode acarretar na diminuição da eficiência (EPE, 2014) e por isso o dimensionamento no caso do módulo C5 foi maior do que o dimensionado no caso C3.

Como a combinação C1, que usava somente a coluna de água oscilante apresentou uma capacidade insuficiente, a última combinação escolhida, objetivou atender a plataforma e o restaurante, para isso, houve o acréscimo de mais uma coluna de água oscilante para verificar se assim o sistema seria atendido. Essa simulação mostrou resultado satisfatório, com 40 baterias e autonomia de 15 horas, tendo como custo-benefício de US\$419682,00.

Em termos de VPL, todas as simulações resultaram em valores negativos, ou seja, não sendo atrativos economicamente no momento. Porém, considerando o melhor projeto em termos de VPL encontrado, foi a simulação C5, com somente o módulo fotovoltaico e a carga da plataforma.

Para um sistema conectado a rede, segundo DUIZIT (2015), o valor presente líquido seria de R\$ 20558,23 ao longo de 25 anos, o que corresponde a US\$5873,78 (cotação dólar 3,50). Muito diferente do que o encontrado no projeto, o que se atribui a proposta de um sistema isolado. Um fator importante que tornou o investimento não atrativo e não lucrativo foi a quantidade de baterias para armazenamento de energia.

Já em termos de geração de energia, o melhor resultado encontrado foram as simulações C2 e C6, as quais atendem as duas cargas (plataforma e restaurante). E geraram maior excedente de energia, utilizando um número menor de baterias. Nestes casos, se os sistemas fossem conectados a rede, poderia se obter bônus conforme Resolução Normativa 087/15 da ANEEL. A qual descreve que as unidades consumidoras que tenham microgeração ou minigeração distribuída podem injetar sua energia excedente no sistema de distribuição obtendo créditos em quantidade de energia ativa a ser consumida por um prazo de sessenta meses. O que é uma alternativa viável para o caso estudado, permitindo assim investir em um sistema que consiga atender as duas cargas (plataforma e restaurante).

Segundo ASSIS, BELUCO, ALMEIDA (2013), os projetos utilizando a coluna de água oscilante, sendo um dispositivo ainda em fase inicial de desenvolvimento, só seriam rentáveis se os custos de investimento não ultrapassarem US\$ 4030,10 por kW instalado. O que nos casos C2 e C6 se mostrou verdadeiro, uma vez que o VPL indicou a não rentabilidade.

A Figura 26 mostra o custo presente líquido por componente e por tipo de custo, para a configuração C3. O maior componente responsável pela inviabilidade do projeto foi a coluna de água oscilante, que embora tenha uma boa produção de energia exige alto custo de instalação e operação, estando de acordo com o verificado por ASSIS, BELUCO, ALMEIDA (*op cite*) e este fato representa ainda um entrave na difusão dessa tecnologia e na sua viabilidade.



Figura 26 - Custo presente líquido: a) por componente, b) por tipo de custo. (Fonte: do autor)

5 CONCLUSÃO

Para realizar a comparação dos sistemas de geração de energia solar e de ondas, foram simuladas uma série de combinações, visando atender a carga da plataforma de pesca Entremares como um sistema isolado. As simulações feitas com a coluna de água oscilante (CAO) mostraram que a mesma tem capacidade suficiente para atender a demanda das cargas utilizando um número menor de baterias. No entanto, apresentaram os VPL's mais negativos.

A potência de saída da turbina encontrada pelo software HOMER *energy* foi de 2,42 kW contra 3,30 kW encontrados pelo cálculo de potência em função da altura significativa. A potência encontrada pelo software representa 73,3% da potência encontrada em função da vazão, o que se explica pelas perdas do sistema que chegam a 21,47% como também pelas adaptações feitas no projeto.

O melhor cenário, considerando o VPL, foi o módulo solar fotovoltaico atendendo somente a plataforma de pesca, mas utilizando um número muito grande de baterias. Esse ponto negativo, porém, apresenta uma solução viável através da conexão do sistema à rede elétrica. O sistema de crédito para a injeção de energia na rede elétrica é assegurado pela ANEEL com a resolução normativa 087/15, e possibilitaria uma diminuição do número de baterias, reduzindo também o custo de instalação do projeto.

Desta forma, uma alternativa em pequena escala para o uso de energia fotovoltaica apresenta-se real e vem a favorecer o incentivo ao uso de energias renováveis, as quais estão em acordo com a diminuição dos impactos ambientais associados à geração de energia elétrica e favorecem a diversificação da matriz energética.

O software Homer *energy* se mostrou eficiente ao simular o sistema de energia das ondas através de uma adaptação de equações, uma vez que ele não é projetado para tal finalidade. O uso da CAO mostrou bom potencial de geração de energia incentivando as soluções em pequena escala em sistemas isolados ou conectados a rede, indicando a necessidade das distribuidoras de energia em se adequar as novas possibilidades do mercado.

ENERGY POTENCIAL OF WAVES AND SOLAR FOR CONVERSION INTO ELETRICITY OF A FISHING PLATFORM: ESTIMATES AND ECONOMIC VIABILITY.

Raffaella Zandomenego

ABSTRACT

The search for solutions in small scale is continuously becoming more intense due to all the issues related to non-renewable energy sources, such as coal and petroleum. By

observing the need for diversifying the energy sources in Brazil, the purpose of the present work was to use the HOMER Energy software in order to compare the economic viability of a technology that is ascendant, the solar energy, with another that is little known and less spread, the ocean wave energy. The program allowed a simulation of the electric energy demand from Entremares Platform, located in Balneário Arroio do Silva (SC). This platform was designed as an isolated system for power microgeneration. The results indicated that, considering the NPV values, none of the alternatives was proved to be viable, regarding either the high amount of batteries needed or the still developing technology. On the other hand, considering the power generation, the best configurations were the ones developed with the Oscillating Water Columns (OWCs). This configuration supplied the two loads (platform and restaurant) and used a smaller number of batteries. In addition, it generated an energy excess. One alternative to make the project attractive is through connecting it to the energy grid, therefore using the system to inject energy according to the normative resolution 087/15. This would represent a reduction on the number of batteries used, on the excess of power generated and hence in the installation net cost. Besides being a small scale alternative, it helps decreasing the energy demand from non-renewable sources, which have larger environmental impacts, and it is also a way to diversify the energy matrix and avoid or minimize the effects of a new hydro crises in Brazil.

Key words: ocean energy, solar energy, Homer software, computational simulation, isolated system.

REFERÊNCIAS

- ALVES, J. H. G. de M.; RIBEIRO, E. O.; MATHESON, G. S. G.; LIMA, J. A. M.; RIBEIRO, C. E. P. **Reconstituição do clima de ondas no sul-sudeste brasileiro entre 1997 e 2005**. *Revista Brasileira de Geofísica*, Rio de Janeiro, vol. 27, n. 3, p. 427-445, 2009.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica -. **Atlas de energia elétrica do Brasil: 2ª edição**. Brasília, 2005.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica -. **Atlas de energia elétrica do Brasil: 3ª edição**. Brasília, 2008.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica -. **Resolução Normativa nº 482**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 19 jun. 2016.
- ANTUNES, V.; PFITSCHER, L. L. **Eficiência energética no uso de energia a partir das ondas – estudo em uma plataforma de pesca da região sul de Santa Catarina**. 4º Simpósio de Integração Científica e Tecnológica do Sul Catarinense – Sict-sul, Araranguá.

ASSIS, L. E. **Avaliação e aproveitamento da energia de ondas oceânicas no litoral do Rio Grande do Sul**. 2010. 82 p. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

ASSIS, L. E. de; BELUCO, A.; ALMEIDA, L. E. B. Avaliação e aproveitamento da energia das ondas oceânicas no litoral do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.18, n.3, p. 21-29, jul/set 2013.

BARRY, Roger G.. **Atmosfera, tempo e clima**. Bookman Companhia Editora Ltda, 2012.

BEHENCK, I. S. **Estudo comparativo da viabilidade de sistemas fotovoltaicos conectados à rede, através do software Homer**. Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

BESERRA, E. R. **Avaliação de sítios para o aproveitamento dos recursos energéticos das ondas do mar**. 2007. 198 p. Tese (doutorado) – Programa de Engenharia Oceânica, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

BICUDO, C. E. de M. et al. Recursos hídricos no Sudeste: segurança, soluções, impactos e riscos. **Carta de São Paulo**, São Paulo, v. 1, n. 1, p.1-1, dez. 2014.

BOYLE, G.. **RENEWABLE ENERGY: Power for a Sustainable Future**. Oxford, 2012.

BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). Empresa de Pesquisa Energética. **Planejamento do atendimento aos sistemas isolados**. 23 de setembro de 2014.

BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Balanço energético nacional 2015 – ano base 2014: relatório síntese**. Brasília, 2012. Disponível em <https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final_2015_Web.pdf> Acesso: 16 de março de 2016.

BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Brasil inicia projeto de geração de energia por placas solares flutuantes**. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/>>. Acesso em: 21 de março de 2016.

BRASIL. WWF Brasil. **Mecanismos de suporte para inserção da energia solar fotovoltaica na matriz elétrica brasileira: modelo e sugestão para uma transição acelerada**. Brasília: Supernova Design, 2015.

CABRAL, I. de S.; TORRES, A. C.; SENNA, P. R. ENERGIA SOLAR – ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE BRASIL E ALEMANHA. **Iv Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental: IBEAS – Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais**, Salvador, nov. 2013.

CALEZ, M. Le. La dependencia del petróleo: obstáculo o estímulo para un cambio de matriz energética?. **Letras Verdes: Revista del Programa de Estudios Socioambientais FLACSO - ECUADOR**, Equador, p.4-6, jan. 2011.

CHAIM, O. C. **Análise de custos de fontes alternativas de energia**. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

COPPE/UFRJ (Rio de Janeiro) (Org.). **A energia que vem do mar: usina de ondas.** Disponível em: <www.coppenario20.coppe.ufrj.br>. Acesso em: 26 mar. 2016.

CORTEZ, R. J. M.. **Sistema de Seguimento Solar em Produção de Energia Fotovoltaica.** 2013. 94 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

COSTA, P. R. da. **ENERGIA DAS ONDAS DO MAR PARA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE.** Curso de Engenharia Oceânica., Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004

COSTA, R. R. M. da. **MICROGERAÇÃO EM MEIO URBANO: UM ESTUDO DE CASO NA CIDADE DE CURITIBA.** 2014. 143 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Desenvolvimento de Tecnologia, área de Concentração Sistemas de Energia, Instituto de Engenharia do Paraná, Curitiba, 2014.

DALLA VECCHIA, L. C.; FARIAS, C. F.; SCHARLAU, C. C.; D'AQUINO, C. de A.. **MODELAGEM E DIMENSINAMENTO DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DAS ONDAS DO OCEANO.** Congresso Brasileiro de Automática. No prelo, 2016.

DEAN, R. G. e DALRYMPLE, R. A., 1991. **Water wave mechanics for Engineers and Scientists.** Singapore: World Scientific Pub Co Inc, v.2. 353 pp. (Advanced Series on Ocean Engineering)

DIAS, G. da C. et al. Análise teórica da influência de perfis sobre a potência de uma turbina wells empregada em dispositivos de conversão de energia das ondas. **Vetor**, Rio Grande, v. 23, n. 01, p.44-56, jan. 2013.

DUIZIT, L. D.. **Estudo da viabilidade econômico-financeira na utilização de sistemas solares fotovoltaicos no Vale do Paraíba.** 2015. 93 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015

FISCHER, A. **Avaliação do potencial energético de correntes oceânicas no litoral Sul do Brasil.** 2014. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul., Porto Alegre, 2013.

FLEMING, F. P.. **AValiação DO POTêNCIAL DE ENERGIAS OCEâNICAS NO BRASIL.** 2012. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro,, Rio de Janeiro, 2012.

GODINHO, P. M. C.. **Energia das ondas: Desenvolvimento de uma tecnologia de geração.** 156 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Eletromecânica, Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2010.

GUERRA, J. B. S. O. de A.; YOUSSEF, Y. A. (Org.). **Energia Solar.** Jelare, 2011.

Homer Energy. Disponível em: <<http://support.homerenergy.com/>>. Acesso em: 19 jun. 2016.

HOMER, **Guia de Introdução para o HOMER Legacy (Versão 2.68),** 2011.

IBGE, **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Censo Demográfico de 2015. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 15 de março de 2016.

NAKABAYASHI, R.. **Microgeração Fotovoltaica no Brasil: viabilidade econômica**. Instituto de Energia e Ambiente da USP. São Paulo, p. 1-58. mar. 2015.

NEOSOLAR ENERGIA (Brasil). **Painel Solar Fotovoltaico**. Disponível em: <<http://www.neosolar.com.br/>>. Acesso em: 13 jun. 2016.

OSTRITZ, F. F. **Estimativa do potencial energético gerado por ondas na costa do Brasil com ênfase no estado do Ceará**. 2012. 58 p. Dissertação (mestrado) – Programa de Engenharia Oceânica, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

PINHO, J. T. *et al.* **Sistemas híbridos: Soluções energéticas para a Amazônia**. Brasília: Ideorama Design e Comunicação Ltda., 2008.

PLANETA COPPE (Rio de Janeiro). **Rio de Janeiro terá geração de energia pelas ondas do mar**. 2013. Disponível em: <<http://www.planeta.coppe.ufrj.br/>>. Acesso em: 26 mar. 2016.

SANTA CATARINA. TRACTEBEL ENERGIA. . **Maior usina solar do Brasil entra em operação comercial**. Disponível em: <<http://www.tractebelenergia.com.br/>>. Acesso em: 21 mar. 2016.

SILVA, J. S. da. **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 (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

SILVA, J. S.; BELUCO, A.; ALMEIDA, L. E. B. de. **Simulating an ocean wave power plant with Homer**. *International Journal Of Energy And Environment*. p. 619-630. 2014.

SOUZA, R. de A. e. **ESCOLHA DE TECNOLOGIA DE CONVERSÃO DA ENERGIA DAS ONDAS EM ENERGIA ELÉTRICA**. 2011. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio Grande - Furg, Rio Grande, 2011.

TESSLER, M. G.; GOYA, S. C. Y. Processos costeiros condicionantes do litoral brasileiro. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. 17, p. 11-23, 2005.

WOTTRICH, B.. **Modelo para análise econômica e financeira em projetos de geração distribuída de energia com fontes alternativas**. 106 f. Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

ZANDOMENEGO, R; SCHMIDT, N. L.; D'AQUINO, C. de A.. **Estimativa do potencial para geração de energia elétrica em uma plataforma de pesca no sul de Santa Catarina**. 4º Simpósio de Integração Científica e Tecnológica do Sul Catarinense – Sict-sul, Araranguá, 2015.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a Deus, por ter me guiado pelo caminho correto para chegar até aqui. Aos meus pais, Cid e Maria Glória, por me ensinarem seus valores e me apoiarem sempre em qualquer circunstância. Obrigada pelo amor e compreensão.

A minha orientadora Carla de Abreu D'Aquino, por acreditar em mim e saber que eu podia ir além, também por todo conhecimento e tempo dividido comigo nesses anos de trabalho juntas. Muito obrigada.

Gostaria de agradecer também ao professor Elírio E. Toldo Junior o qual cedeu gentilmente os dados de onda utilizados, além da Plataforma de pesca Entremares pelas informações e pela colaboração com o projeto. Também ao colega de pesquisa Leonardo Casagrande Dalla Vecchia pela ajuda e pelos dados fornecidos.

Aos amigos que fizeram parte da minha vida nessa trajetória, levo vocês no coração. Gostaria de agradecer também a todos que de alguma forma contribuíram para minha formação pessoal e profissional e que estiveram presentes em algum momento desta etapa.