

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
CÂMPUS DE CURITIBA  
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ANDRESSA LORAYNE MONTEIRO

**ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DE UM SISTEMA HÍBRIDO  
DE ENERGIA RENOVÁVEL (EÓLICO-SOLAR) NA ILHA DO MEL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2018

ANDRESSA LORAYNE MONTEIRO

**ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DE UM SISTEMA HÍBRIDO  
DE ENERGIA RENOVÁVEL (EÓLICO-SOLAR) NA ILHA DO MEL**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de TCC 2, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Ulisses Chemin Netto

CURITIBA

2018

Andressa Lorayne Monteiro

## Análise de viabilidade econômica de um sistema híbrido de energia renovável (eólico-solar) na Ilha do Mel

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheira Eletricista, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 23 de novembro de 2018.

---

Prof. Antonio Carlos Pinho, Dr.  
Coordenador de Curso  
Engenharia Elétrica

---

Profa. Annemahlen Gehrke Castagna, Mestre  
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso  
de Engenharia Elétrica do DAELT

### ORIENTAÇÃO

---

Ulisses Chemin Netto, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Orientador

### BANCA EXAMINADORA

---

Raphael Augusto de Souza Benedito, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Nastasha Salame da Silva, Dra.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Ulisses Chemin Netto, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica

## **AGRADECIMENTOS**

A minha trajetória durante estes anos na graduação não seria possível sem o apoio de pessoas essenciais em minha vida. Agradeço, primeiramente, aos meus pais pela compreensão diária e amor incondicional. Às minhas irmãs Larissa e Vanessa, por estarem sempre por perto, mesmo que não fisicamente. Ao Bruno Trentini, por ser meu companheiro de vida, sempre paciente, amoroso e torcendo constantemente pelo meu sucesso e realização.

A todos amigos que acompanharam esses cinco anos de lutas e glórias, meu muito obrigada. Compartilhar minhas conquistas e batalhas com vocês deixou a vida mais leve.

Agradeço imensamente meu orientador, professor Dr. Ulisses Chemin Netto, por sempre acreditar nas minhas ideias e me dar todo o suporte para desenvolvê-las.

## RESUMO

MONTEIRO, Andressa Lorayne. **Análise de viabilidade econômica de um sistema híbrido de energia renovável (eólico-solar) na Ilha do Mel**. 2018. 68 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

Em ilhas e arquipélagos existem, em geral, impedimentos relacionados ao acesso de energia elétrica proveniente de grandes fontes geradoras, como a hidráulica, em virtude da necessidade de subestações e linhas de transmissão. Outro obstáculo é o atendimento à essas regiões em casos de falta de energia elétrica. Uma sugestão para minimizar estes impasses é o aproveitamento de fontes renováveis através de sistemas híbridos de geração. Este trabalho propõe uma análise econômica sobre utilização de um sistema híbrido de geração, composto por fonte eólica e solar, na Ilha do Mel (Paraná). O estudo utiliza a ferramenta computacional HOMER PRO para o dimensionamento e simulação econômica através de possíveis cenários de geração entre a rede elétrica, módulos fotovoltaicos e aerogeradores. Traz como resultado os valores de investimento e operação; otimização do sistema e complementariedade entre as fontes como métricas para comparação dos cenários considerados. Através da ferramenta de otimização do *software*, conclui-se que um sistema *grid*-solar é o mais viável economicamente, de acordo com as condições de simulações propostas.

**Palavras-chave:** Sistema Híbrido de Geração. Energia fotovoltaica. Energia eólica. HOMER PRO. Análise econômica. Ilha do Mel.

## ABSTRACT

MONTEIRO, Andressa Lorayne. **Analysis of the economic feasibility of a hybrid renewable energy system (solar-wind) in Ilha do Mel**. 2018. 68 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

The access to electricity from conventional generating units like big hydroelectric power plants is often restricted in islands and archipelagos due to the need for building substations and transmission lines in an area-restricted environment. Besides, support for these regions is limited and becomes a problem in case of blackouts. An option to minimize these limitations is the use of the renewable energy sources through hybrid power generation systems. This work proposes an economic analysis of a hybrid solar and wind power generation system for the island of Ilha do Mel, located in the state of Paraná, Brazil. Possible scenarios combining wind turbines and solar modules with electricity from the grid are developed using the computational tool HOMER PRO. The model returns metrics such as project and operation costs, system optimization, complementarity between sources, which enable the comparison of the different scenarios. The results obtained by using the optimization tool in HOMER PRO indicate that a grid-tied solar photovoltaic system is the most economically feasible option, according to the performed simulations.

**Keywords:** Hybrid Power Generation Systems. Solar Power. Wind Power. HOMER PRO. Economic Analysis. Ilha do Mel.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Espectro da radiação solar.....	19
Figura 2 – Linha do zênite e ângulo zenital.....	21
Figura 3 – Ângulo de declinação solar conforme as estações do ano .....	21
Figura 4 – Ângulo zenital, azimutal e da altura solar.....	22
Figura 5 – Características da irradiância para as massas de ar AM0 e AM1,5.....	23
Figura 6 – Diferença entre DNI e DHI. ....	25
Figura 7 – Perfil da irradiância solar ao longo de um dia. ....	26
Figura 8 – Elementos básicos da estrutura de uma célula fotovoltaica.....	27
Figura 9 – Principais componentes da nacele de um aerogerador .....	32
Figura 10 – Fluxograma da metodologia das etapas principais do trabalho .....	37
Figura 11 – Curvas de carga da Ilha do Mel no período de 2017.....	38
Figura 12 – Ligação da subestação Pontal do Sul (POS) à Ilha do Mel.....	39
Figura 13 – Temperatura diária na Ilha do Mel durante o período de um ano .....	42
Figura 14 – Irradiação Global Horizontal (GHI) na Ilha do Mel.....	43
Figura 15 – Irradiação Direta Normal (DNI) na Ilha do Mel .....	44
Figura 16 – Velocidade média (m/s) mensal na Ilha do Mel.....	47
Figura 17 – Potência de saída (kW) em função da velocidade do vento (m/s) .....	48
Figura 18 – Configurações dos casos de estudo do sistema híbrido de geração na Ilha do Mel.....	50
Figura 19 – Topologia do sistema de geração híbrido grid/ eólico/ solar .....	53
Figura 20 – Complementariedade entre as fontes de geração do Caso A: Sistema de geração híbrido grid/ eólico/ solar na Ilha do Mel – Filtro por classificação geral.....	54
Figura 21 – Complementariedade entre as fontes de geração do Caso A: Sistema de geração híbrido grid/ eólico/ solar na Ilha do Mel – Filtro categorizado.....	55
Figura 22 – Topologia do sistema de geração híbrido grid/ eólico .....	56
Figura 23 – Complementariedade entre as fontes de geração do Caso B: Sistema de geração híbrido grid/ eólico na Ilha do Mel – Filtro por classificação geral .....	57
Figura 24 – Complementariedade entre as fontes de geração do Caso B: Sistema de geração híbrido grid/ eólico na Ilha do Mel – Filtro categorizado .....	57

Figura 25 – Complementariedade entre as fontes de geração do Caso C: Sistema de geração híbrido grid/ solar na Ilha do Mel – Filtro por classificação geral .....	59
Figura 26 – Complementariedade entre as fontes de geração do Caso C: Sistema de geração híbrido grid/ solar na Ilha do Mel – Filtro categorizado .....	60



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Conceitos relativos à radiação solar .....	24
Tabela 2 – Instalações solares no Brasil .....	29
Tabela 3 – Síntese dos tipos de ventos e suas características .....	31
Tabela 4 – Potência Instalada e Geração Eólica por País no ano de 2014 .....	33
Tabela 5 – Consumo médio diário (kWh/dia) no ano de 2017 na Ilha do Mel .....	38
Tabela 6 – Ligações elétricas da Subestação de Pontal do Sul até as Ilhas do Mel, das Peças e Superagui .....	40
Tabela 7 – Cotação do dólar – ano de referência: 2017 .....	40
Tabela 8 – Dados das temperaturas médias mensais na Ilha do Mel (em °C).....	42
Tabela 9 – Média mensal da Irradiação Global Horizontal (GHI) na Ilha do Mel.....	43
Tabela 10 – Média mensal da Irradiação Direta Normal (DNI) na Ilha do Mel .....	44
Tabela 11 – Irradiação Plano Inclinado na Latitude na Ilha do Mel em valores diários (kWh/m <sup>2</sup> dia).....	45
Tabela 12 – Especificações dos equipamentos do sistema fotovoltaico .....	46
Tabela 13 – Média mensal da velocidade do vento (m/s) na Ilha do Mel .....	47
Tabela 14 – Potência de saída (kW) em função da velocidade do vento .....	48
Tabela 15 – Parâmetros elétricos para otimização no HOMER PRO .....	49
Tabela 16 – Parâmetros econômicos para otimização no HOMER PRO.....	50
Tabela 17 – Métricas econômicas do Caso A: Sistema de geração híbrido grid/ eólico/ solar na Ilha do Mel – Filtro por classificação geral .....	54
Tabela 18 – Métricas econômicas do Caso A: Sistema de geração híbrido grid/ eólico/ solar na Ilha do Mel – Filtro categorizado .....	55
Tabela 19 – Métricas econômicas do Caso B: Sistema de geração híbrido grid/ eólico na Ilha do Mel – Filtro por classificação geral .....	56
Tabela 20 – Métricas econômicas do Caso B: Sistema de geração híbrido grid/ eólico na Ilha do Mel – Filtro categorizado .....	57
Tabela 21 – Métricas econômicas do Caso C: Sistema de geração híbrido grid/ solar na Ilha do Mel – Filtro por classificação geral.....	58
Tabela 22 – Métricas econômicas do Caso C: Sistema de geração híbrido grid/ solar na Ilha do Mel – Filtro categorizado .....	59

Tabela 23 – Comparação entre os Casos A, B e C.....	60
---	----

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AM	<i>Air mass</i>
BIG	Banco de Informações de Geração
CC-CA	Corrente Contínua-Corrente Alternada
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
CRESESB	Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio S. Brito
DHI	<i>Diffuse Horizontal Irradiance</i>
DNI	<i>Direct Normal Irradiance</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GHI	<i>Global Horizontal Irradiance</i>
HOMER	<i>Hybrid Optimization Model for Electric Renewable</i>
IAP	Instituto Ambiental do Paraná
MME	Ministério de Minas e Energia
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NPC	<i>Net Present Cost</i>
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
PDE	Plano Decenal de Expansão de Energia
PNE	Plano Nacional de Energia
SIN	Sistema Interligado Nacional
SSE	<i>NASA Surface meteorology and Solar Energy</i>

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	TEMA.....	13
1.1.1	Delimitação do Tema.....	14
1.2	PROBLEMAS E PREMISSAS .....	15
1.3	OBJETIVOS.....	16
1.3.1	Objetivo Geral.....	16
1.3.2	Objetivos Específicos.....	16
1.4	JUSTIFICATIVA.....	17
1.5	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....	17
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	19
2.1	ENERGIA SOLAR.....	19
2.1.1	Principais Componentes de um Sistema Fotovoltaico .....	26
2.1.2	Sistemas Fotovoltaicos isolados e conectados à rede.....	28
2.1.3	Sistemas Fotovoltaicos no Brasil .....	29
2.2	ENERGIA EÓLICA.....	30
2.2.1	Energia elétrica através do vento.....	30
2.2.2	Energia eólica no Brasil .....	33
2.3	SISTEMA HÍBRIDO DE GERAÇÃO .....	34
2.3.1	<i>Software</i> HOMER PRO.....	35
3	SIMULAÇÃO DO SISTEMA HÍBRIDO DE GERAÇÃO.....	37
3.1	Perfil de carga da Ilha do Mel .....	37
3.2	Rede elétrica da concessionária .....	39
3.3	Sistema fotovoltaico.....	41

3.3.1 Recursos naturais: geração solar fotovoltaica .....	41
3.3.2 Potencial fotovoltaico .....	44
3.3.3 Equipamentos: geração solar fotovoltaica .....	46
3.4 Sistema eólico .....	46
3.4.1 Recursos naturais: geração eólica.....	46
3.4.2 Equipamentos: geração eólica.....	47
3.5 Parâmetros de simulação .....	49
3.6 Condições de simulação .....	50
3.7 Métricas das respostas de otimização .....	51
4. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES.....	53
4.1 Caso A – Sistema de geração híbrido <i>grid/</i> eólico/ solar .....	53
4.2 Caso B – Sistema de geração híbrido <i>grid/</i> eólico .....	56
4.3 Caso C – Sistema de geração híbrido <i>grid/</i> solar .....	58
4.4 Comparação dos resultados .....	60
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	62
REFERÊNCIAS .....	64

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 TEMA

Segundo o Banco de Informações de Geração (BIG) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), até o primeiro semestre do ano de 2018, a capacidade de geração elétrica no Brasil foi composta significativamente por fontes renováveis (72,74%), sendo 60,22% do total correspondente à geração hidráulica, 8,11% à eólica e 0,82% à solar.

Neste mesmo período, conforme as informações da ANEEL (2018), o Estado do Paraná possui 212 empreendimentos de geração de energia em operação, gerando 16.673.461 kW de potência, na qual as Usinas Hidrelétricas são responsáveis por 87,71% deste valor. Para os usuários terem acesso a essa energia são necessárias linhas de transmissão e subestações de energia elétrica, o que pode ser inviável fisicamente em algumas regiões isoladas do Estado, como, por exemplo, em ilhas, além do alto custo econômico para atender poucas unidades consumidoras. O Decreto nº 7.246, de julho de 2010, declara como sistemas isolados os sistemas elétricos de serviço público de distribuição de energia elétrica que, em sua configuração normal, não estejam eletricamente conectados ao Sistema Interligado Nacional – SIN, por razões técnicas ou econômicas (BRASIL, 2010).

O Estado do Paraná possui 39 ilhas (TURISMO PARANÁ, 2017), onde a grande maioria carece de fornecimento contínuo de energia elétrica. Uma alternativa utilizada para atender a demanda elétrica dessas regiões é o uso de geradores a diesel. Entretanto, esses geradores contribuem com a poluição atmosférica devido às emissões de dióxido de carbono e material particulado, não sendo condizente com as características das ilhas, visto que muitas delas são áreas de preservação ambiental.

Em ilhas com áreas de preservação ambiental o uso de fontes renováveis de energia pode ser uma solução. Entende-se como energia renovável a “energia verde” derivada de recursos sustentáveis, como vento, energia solar, maré, calor geotérmico e biomassa (XUESHU CAO; LAPTHORN; PEIMANKAR, 2014).

Uma das características associadas ao uso de fontes renováveis, além do custo, são a intermitência e disponibilidade desses recursos em determinados períodos devido as incertezas envolvidas nas condições atmosféricas, como temperatura, presença das nuvens, poeira e umidade (WAN et al., 2015).

Considerando todos esses aspectos, uma alternativa para aquelas localidades é a utilização da geração híbrida de energia. Os sistemas híbridos de geração são aqueles que usam mais de uma fonte de geração de energia, dependendo da disponibilidade dos recursos (LEONI et al., 2016), podendo ser uma combinação entre fontes renováveis ou não. Uma característica singular desses sistemas é uma fonte suprir a demanda de energia enquanto a outra está indisponível temporariamente.

Com o aumento da participação das fontes renováveis para geração de energia elétrica na matriz energética brasileira, sua aplicação em regiões isoladas passa a ser uma questão a ser estudada. Para analisar a viabilidade econômica dessas fontes renováveis de geração de energia elétrica existem ferramentas computacionais especializadas para esse tipo de projeto. O *software* utilizado nesta pesquisa é o *Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources* (HOMER), desenvolvido pelo *National Renewable Energy Laboratory* (NREL), o qual projeta uma configuração efetiva dos componentes do sistema de geração híbrido depois de uma série de simulações por hora para um dado cenário, considerando alguns parâmetros como, por exemplo, preços dos componentes, custo de manutenção, entre outros (MAHMUD; et al., 2013).

Esta pesquisa tem como foco o estudo da viabilidade econômica de um sistema híbrido de geração de energia, composto por energia solar fotovoltaica e eólica, na Ilha do Mel, através de simulações realizadas no HOMER PRO. Este estudo utilizou os bancos de dados disponibilizados no Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná e NASA *Surface meteorology and Solar Energy* (SSE) como entrada de dados parcial para o *software* HOMER PRO.

### 1.1.1 Delimitação do Tema

A Ilha do Mel, localizada no município de Paranaguá, Estado do Paraná, é uma área de preservação ambiental (Parque Estadual da Ilha do Mel) com 780

domicílios (IAP, 2012) tendo uma população flutuante limitada em 5000 turistas por dia. O fornecimento atual de energia elétrica é realizado pela Companhia Paranaense de Energia (COPEL) através de um cabo submarino com aproximadamente três quilômetros, ligando Pontal do Paraná à Ilha do Mel, composto por parte aérea em linhas de alta tensão em 13,8 kV e de baixa tensão em 127 e 220 V para atendimento da população (IAP, 2012).

Esta pesquisa propõe e analisa, economicamente, um sistema de geração híbrido, eólico e solar, para suprir toda a demanda elétrica da Ilha do Mel, através de análise das respostas fornecidas pelo HOMER PRO, como, por exemplo, os parâmetros econômicos (custo de energia, capital inicial de investimento, custo de operação, retorno de investimento, etc.) e os parâmetros elétricos (complementariedade entre as fontes de geração). O HOMER PRO permite que o usuário faça diferentes configurações para um mesmo sistema, sendo possível comparar qual o melhor projeto para a Ilha, como a comparação entre diferentes configurações das fontes de geração (eólico, solar e rede da concessionária).

## 1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

A falta de energia elétrica pode acarretar muitos prejuízos, principalmente se há demora no restabelecimento no fornecimento devido às características das regiões isoladas. Apesar das faltas não serem significativas na Ilha do Mel (IAP, 2012), quando elas ocorrem causam despesas não somente na manutenção da rede, mas também consequências oriundas do desligamento. Têm-se casos recentes que ilustram os problemas ocasionados pelo retardo de religamento da rede elétrica na ilha, por exemplo: destruição de 200 vacinas que necessitavam de refrigeração contínua (JORNAL G1, 2017) e paralização da estação de tratamento de água (PARANAGUÁ SANEAMENTO, 2017).

Considerando estes fatos, a aplicação de mais de uma fonte de energia apresenta menor risco de interrupções sustentadas. Como uma fonte alternativa de fácil obtenção, tem-se o uso de óleo diesel. Apesar dos geradores a diesel, em linhas gerais, poderem suprir as cargas da ilha durante as faltas de energia da concessionária, é preciso considerar o impacto no meio ambiente relacionado a emissão de particulados, monóxido de carbono, hidrocarbonetos não queimados e



enxofre, entre outros, a esse tipo de sistema, principalmente pelo fato dessa região ser uma Área de Preservação Ambiental. Mesmo que para qualquer tipo de geração, independentemente de ser renovável ou não, exista um impacto ambiental, é preciso escolher uma técnica que o minimize.

Uma solução adequada seria a utilização de energias renováveis menos danosas ao ecossistema, como a solar e a eólica. O problema desse tipo de fonte é a dependência das condições ambientais: ocorrência de dias ensolarados e velocidade do vento. Sendo assim, os sistemas híbridos são os recursos mais oportunos para manter a continuidade no fornecimento de energia.

Para se projetar um sistema híbrido na Ilha do Mel são necessárias informações fundamentais, como, por exemplo, a carga instalada, irradiação solar e o potencial eólico da região.

### 1.3 OBJETIVOS

#### 1.3.1 Objetivo Geral

Propor um sistema híbrido de geração renovável, constituído por fonte eólica e solar, na Ilha do Mel utilizando a ferramenta computacional HOMER PRO, visando suprir sua demanda. Para tanto, será analisada a sua viabilidade econômica, em relação ao custo inicial do projeto, tempo de retorno, taxa de retorno simples, custo da energia elétrica gerada e custos de operação, considerando cenários de inflação, capacidade de produção da energia elétrica pelas fontes renováveis e custo de aquisição da energia elétrica via concessionária.

#### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Obter a curva de carga da Ilha do Mel para o horizonte de um ano considerando medições horárias em todos os 12 meses do ano de 2017;

- Determinar o índice de vento e irradiação solar na ilha através de dados disponíveis em plataformas pertinentes, como a *NASA Surface meteorology and Solar Energy* (SSE) e o Atlas de Energia Solar do Paraná;
- Estimar o potencial de geração eólica e fotovoltaica da ilha do Mel;
- Propor no *software* HOMER PRO o sistema híbrido;
- Analisar as diferentes configurações do sistema híbrido e selecionar a mais adequada economicamente.

#### 1.4 JUSTIFICATIVA

Uma das projeções do Plano Decenal de Expansão de Energia 2024, realizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), é um aumento na capacidade instalada de geração em 73 GW, sendo cerca da metade desta parcela constituída por fontes eólica, biomassa, solar e pequenas centrais hidrelétricas. Com esta crescente expansão de fontes renováveis de energia, o custo destes sistemas tende a ficar mais barato.

A disponibilidade de informações sobre potencial solar e eólico, através de base de dados, facilita a elaboração de projetos, ainda mais quando existem ferramentas apropriadas para simulação de sistemas híbridos.

A viabilidade de projetos favorece a criação de sistemas híbridos em locais isolados, proporcionando qualidade de vida à população e visando uma geração limpa de energia.

Sendo assim, um sistema híbrido de geração renovável é uma solução adequada para regiões com as características da Ilha do Mel: um local isolado e com área de preservação ambiental.

#### 1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Em um primeiro momento o trabalho foi limitado à pesquisa bibliográfica sobre os equipamentos e funcionamento dos painéis fotovoltaicos e aerogeradores. Junto desta etapa deu-se a continuidade da aprendizagem do HOMER PRO, focando no

manuseio das ferramentas que o *software* disponibiliza, dados de entrada e forma de resposta.

Uma etapa intermediária foi a coleta de dados. As informações referentes à irradiação solar e velocidade do vento são da SSE e do Atlas de Energia Solar do Paraná. O período de análise foi correspondente à demanda elétrica da Ilha do Mel no período de um ano, 2017.

A partir dos dados referentes às características da ilha, deu-se início a etapa de simulação do sistema híbrido no HOMER. Esta parte do trabalho foi a mais significativa, visto que simulações de diferentes configurações do sistema híbrido foram realizadas para posterior análise de resultados. Com as respostas fornecidas pelo *software* é apresentado o sistema mais viável tecnicamente e economicamente.

## 1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho foi estruturado da seguinte forma:

Capítulo 1: Introdução: apresentação do tema, dos problemas e premissas relacionados ao tema, objetivos do trabalho, procedimentos utilizados para a realização do trabalho e estruturação do mesmo.

Capítulo 2: Fundamentação teórica: conceitos teóricos relacionados aos sistemas de geração solar fotovoltaico e eólico, sistema híbrido de geração e HOMER PRO.

Capítulo 3: Simulação do Sistema Híbrido de Geração: montagem e simulação do sistema híbrido eólico-solar no *software* HOMER PRO.

Capítulo 4: Considerações finais: análise e conclusões.

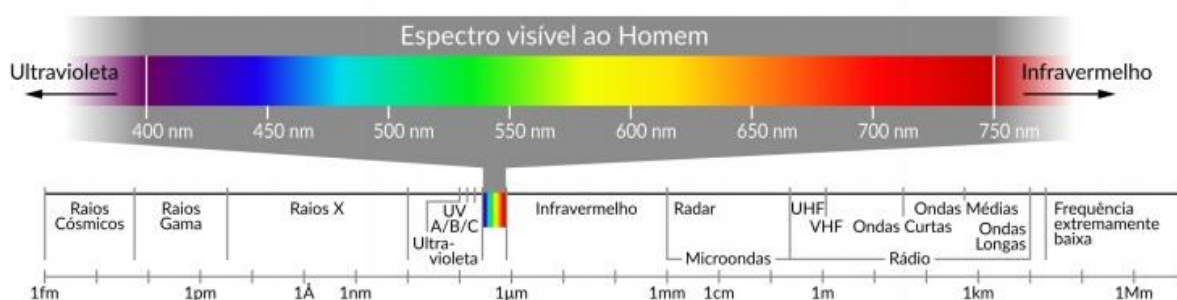
## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo denota os conceitos teóricos principais relacionados ao sistema solar fotovoltaico, energia eólica e sistema híbrido de geração, tal como a parte técnica para a modelagem de um sistema híbrido de geração no *software* HOMER PRO. Este capítulo será dividido em três tópicos principais: explanação conceitual da energia solar, eólica e sistemas híbridos de geração. Dentro deste último item será detalhado o funcionamento do programa HOMER PRO: quais são suas ferramentas principais, dados de entrada, desempenho e possíveis resultados gerados por ele.

### 2.1 ENERGIA SOLAR

A energia irradiada pelo Sol ocorre através de ondas eletromagnéticas, na forma de radiação eletromagnética, sendo esta conceituada como “a energia produzida por um campo elétrico e magnético oscilante, transmitido por fótons” (NREL, 2018). Esta energia proveniente do Sol contempla uma vasta faixa de energia da radiação, especificada pela frequência, comprimento de onda ou energia dos fótons (NREL, 2018), conhecida como espectro eletromagnético (Figura 1).

Figura 1 – Espectro da radiação solar



Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017).

Todo este espectro, independentemente de ser visível ao olho humano ou não, transporta energia, a qual participa de diversos processos no cotidiano como, por exemplo, na fotossíntese, ciclo hidrológico, aquecimento solar e na geração de

energia. Dentre estes procedimentos, este tópico tem foco na geração de energia elétrica através do Sol. A incidência da luz solar sobre determinados materiais modifica suas propriedades elétricas ou ainda originam tensões e correntes elétricas, ou seja, ocorre a transformação da energia eletromagnética em efeitos elétricos, como o efeito fotovoltaico e o fotoelétrico. Villalva e Gazoli (2012) explicam de forma sucinta e clara a diferença entre estes dois efeitos:

O efeito fotovoltaico, que é a base dos sistemas de energia solar fotovoltaica para a produção de eletricidade, consiste na transformação da radiação eletromagnética do Sol em energia elétrica através de uma diferença de potencial, ou uma tensão elétrica, sobre uma célula formada por um “sanduíche” de materiais semicondutores. [...]. O efeito fotoelétrico ocorre em materiais metálicos e não metálicos sólidos, líquidos ou gasosos. Ele ocasiona a remoção de elétrons, mas não é capaz de criar uma tensão elétrica sobre o material.

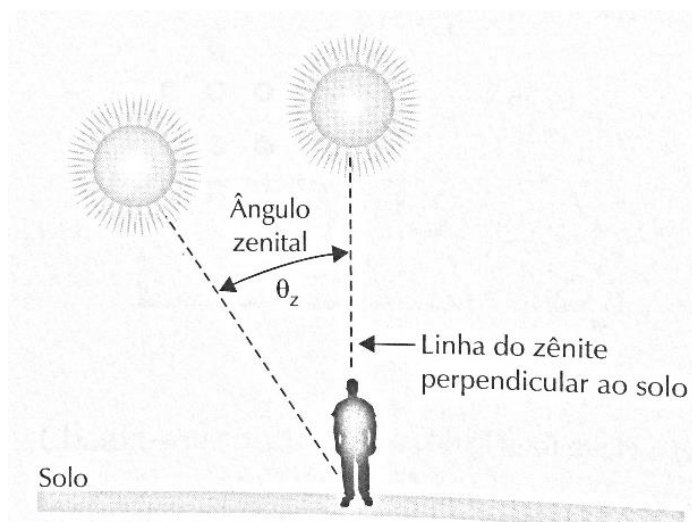
Neste sentido, Patel (2006) conceitua a energia fotovoltaica com a utilização de células semicondutoras, sendo estas basicamente uma junção p-n, posicionadas próximas à superfície do material. Maiores detalhes sobre células fotovoltaicas serão apresentados na seção 2.1.1.

É importante ressaltar a influência da massa de ar e dos processos físicos que ocorrem na atmosfera sobre a radiação solar, o que será evidenciado no decorrer desta seção.

Conforme descrito por Villalva e Gazoli (2012) “a espessura da camada de ar atravessada pelos raios solares depende do comprimento do trajeto até o solo”, o qual está sujeito ao ângulo zenital do Sol. Entende-se por ângulo zenital solar ( $\theta_z$ ) como o ângulo formado entre o zênite (segmento de linha perpendicular ao solo) e o segmento, partindo da mesma origem, que liga a superfície terrestre ao Sol (Figura 2).

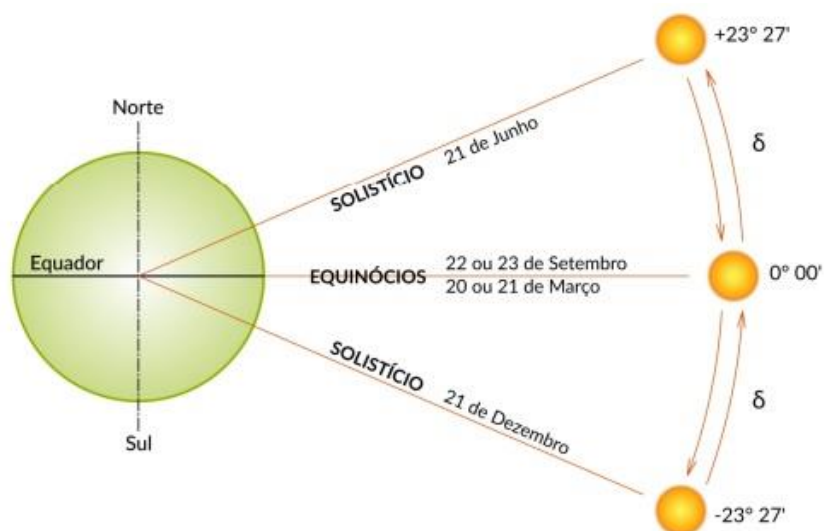
Outro ângulo notável neste estudo é o de declinação solar ( $\delta$ ), sendo o ângulo formado pelos raios solares com a linha do equador (Figura 3). A declinação solar varia ao longo do ano, conforme a posição do Sol.

Figura 2 – Linha do zênite e ângulo zenital



Fonte: Villalva e Gazzoli (2012).

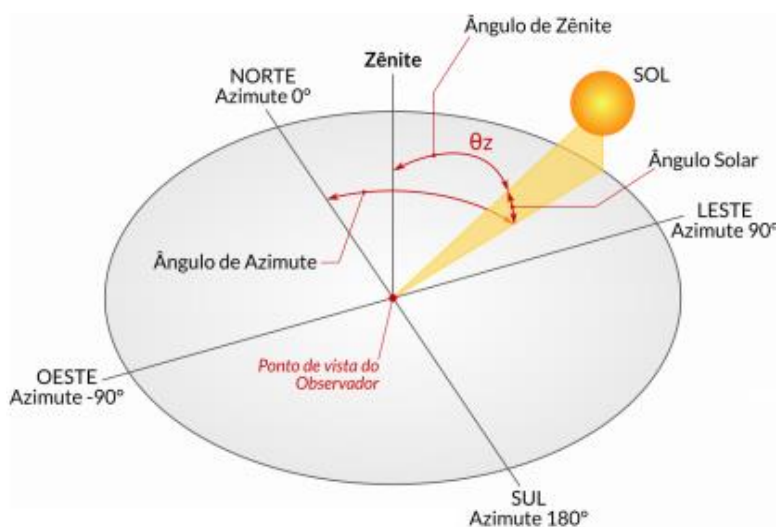
Figura 3 – Ângulo de declinação solar conforme as estações do ano



Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017).

Dois ângulos, também relevantes, são o ângulo azimutal ( $\theta_a$ ) e o ângulo da altura solar ( $\gamma_s$ ). O primeiro é o ângulo obtido entre a linha de projeção do Sol no plano horizontal e o meridiano do observador (ATLAS BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 2017), enquanto o ângulo da altura solar é formado pela trajetória do sol com o plano horizontal. A Figura 4 ilustra de forma clara a diferença entre essas duas medidas.

Figura 4 – Ângulo zenital, azimutal e da altura solar



Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017).

Através do ângulo zenital ( $\theta_z$ ) é possível calcular a massa de ar (AM, do inglês *air mass*), visto que o perfil de radiação solar em uma região varia em função desta grandeza (VILLALVA; GAZOLI, 2012). A massa de ar AM1,5 geralmente é utilizada para estudos de sistemas fotovoltaicos, que representa uma média da qualidade do ar, umidade e poluição atmosférica (PATEL, 2006) em países do hemisfério norte localizados entre o trópico de Câncer e o círculo Ártico. Porém é possível obter a massa de ar correspondente à área de estudo utilizando a equação (1).

$$AM = \frac{1}{\cos\theta_z} \quad (1)$$

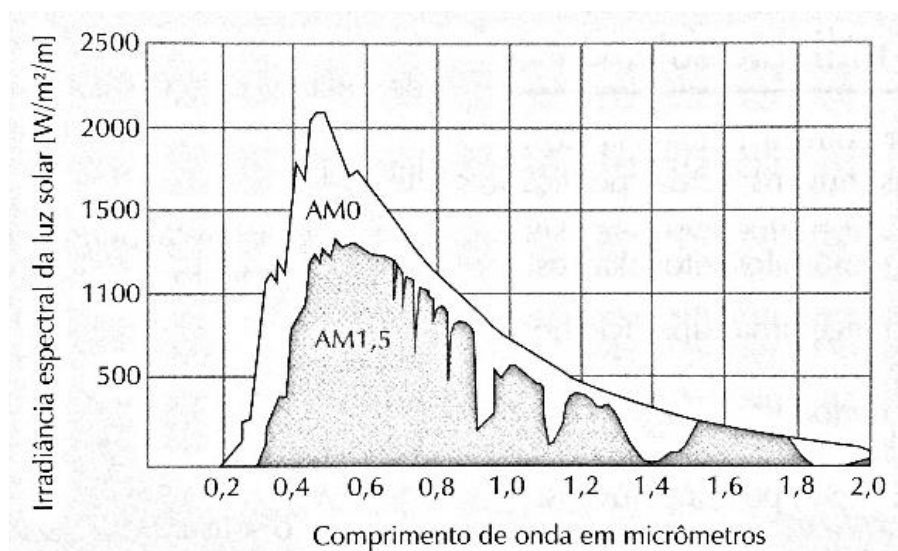
Estes ângulos notáveis são relevantes devido à sua influência na determinação da radiação solar incidente na atmosfera terrestre, única para cada região do globo, e diretamente relacionada com o potencial de geração solar.

Na Figura 5 pode-se comparar o efeito que a massa de ar tem na irradiância solar.

Quando a luz solar atravessa a atmosfera da Terra, ela sofre alterações na sua característica conforme a composição dos elementos suspensos e gases atmosféricos, ocorrendo processos de absorção e espalhamento, fenômenos que geralmente atenuam a irradiância solar. Moléculas de ozônio, oxigênio, dióxido de

carbono e vapor de água participam do processo de absorção de energia, enquanto moléculas de gases atmosféricos e particulados em suspensão são processos físicos de espalhamento da radiação solar (ATLAS BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 2017).

Figura 5 – Características da irradiância para as massas de ar AM0 e AM1,5



Fonte: Villava e Gazzoli (2012).

Conforme descrito no Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017) o dióxido de carbono absorve a radiação infravermelha; o vapor de água absorve a radiação eletromagnética (infravermelho e outras faixas do espectro); enquanto a camada de ozônio, que contém o gás ozônio, absorve parte da radiação em comprimentos de onda na faixa ultravioleta. Outro processo físico é o de espalhamento dos raios solares, no qual as nuvens influenciam na quantidade de radiação solar que atinge a superfície. Este espalhamento depende da espessura óptica e conteúdo da nuvem, distribuição de tamanhos de gotículas e estado físico da água (PALTRIDGE E PLATTA, 1976, apud Tiepolo et al., 2017). Estes processos físicos também interferem na radiação solar que chega à cada região terrestre, influenciando diretamente no potencial solar.

Para estimar a radiação solar, tem-se a grandeza chamada de irradiância dada em  $W/m^2$ , que indica a quantidade de energia solar que chega a uma área específica de uma superfície durante um dado intervalo de tempo (NREL, 2018). A partir da Tabela 1 é possível distinguir os conceitos relativos à radiação solar.



Tabela 1 – Conceitos relativos à radiação solar

Irradiância	Irradiação	Radiância	Radiação	Saída radiante
Fluxo radiante, relacionado à potência, incidente sobre uma superfície [W/m <sup>2</sup> ].	Energia, integrada ao longo de um intervalo de tempo, incidente sobre uma superfície [J/m <sup>2</sup> ].	Fluxo radiante emitido por uma superfície por unidade de ângulo sólido [W/m <sup>2</sup> sr].	Energia, integrada ao longo de um intervalo de tempo, emitido por uma superfície por unidade de ângulo sólido [J/m <sup>2</sup> sr].	Fluxo radiante, relacionado à potência, emitida por uma superfície [W/m <sup>2</sup> ].

Fonte: Brownson (2014), adaptado.

Conforme Tiepolo et al. (2017) e do glossário da NREL (2018), a Irradiação Direta Normal (DNI) é a quantidade de radiação solar oriunda diretamente do Sol, com incidência perpendicular na superfície. A Irradiação Difusa Horizontal (DHI) é consequência da difração atmosférica e reflexão da luz nos constituintes atmosféricos (poeira, moléculas e nuvens, por exemplo). Há também a Irradiação Direta Horizontal que consiste na quantidade de energia por área do feixe solar que incide direto em uma superfície horizontal. Por fim, tem-se a Irradiação Global Horizontal (GHI)<sup>1</sup> que corresponde à taxa de energia total, por unidade de área, incidente em uma superfície. Em suma, a GHI corresponde à equação (2):

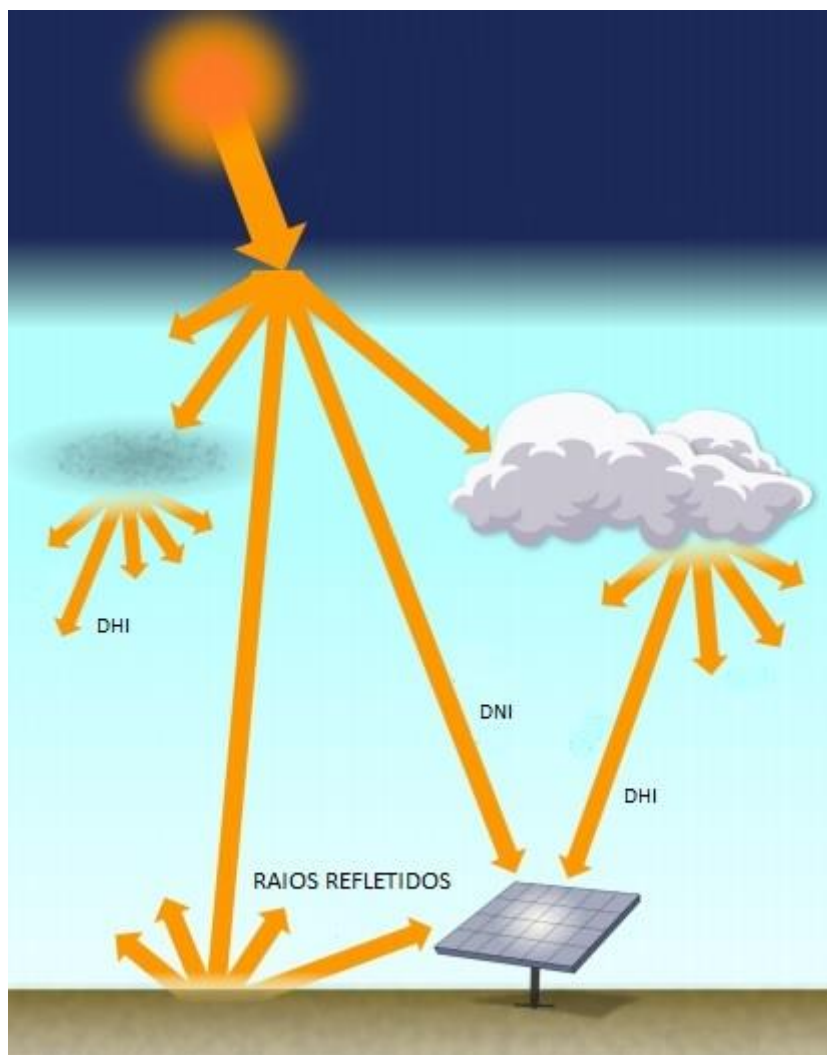
$$GHI = DHI + DNI \cdot \cos\theta_z \quad (2)$$

Outra maneira de obter a GHI é somar as componentes da Irradiação Difusa Horizontal (DHI) com a Irradiância Direta Horizontal, ou seja, a radiação global é a soma das radiações direta e difusa. A Figura 6 ilustra os tipos de radiação solar tratados nesta seção que serão utilizados no HOMER PRO.

Com os dados da irradiância solar no período de um dia, pode-se chegar à um perfil da irradiância de um determinado local (Figura 7). Integrando a região delimitada pela curva da Figura 7, tem-se a chamada insolação, medida em Wh/m<sup>2</sup>, correspondente a energia solar que incide sobre uma determinada área superficial plana em um determinado intervalo de tempo (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

<sup>1</sup>Optou-se pelo uso das siglas GHI, DNI e DHI, provenientes do idioma inglês, devido ao seu uso no *software* HOMER PRO utilizado neste estudo, correspondendo à *Global Horizontal Irradiance*, *Direct Normal Irradiance* e *Diffuse Horizontal Irradiance*, respectivamente.

Figura 6 – Diferença entre DNI e DHI.

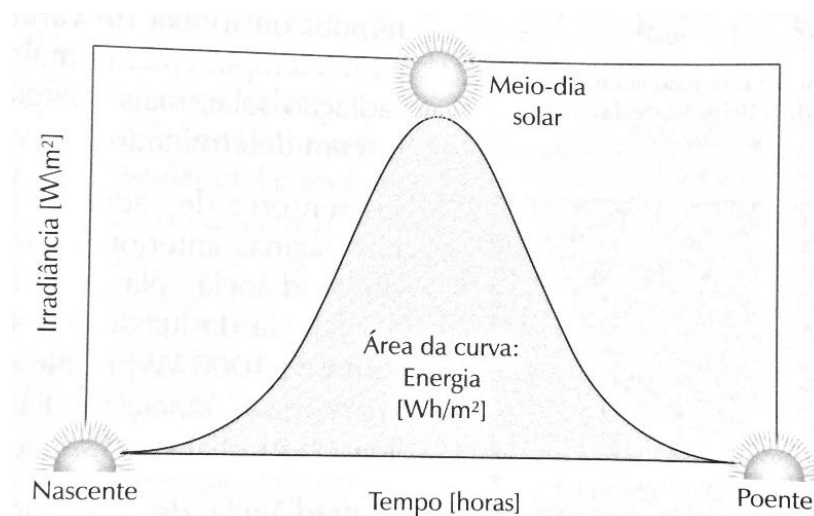


Fonte: Tiepolo et al. (2017), adaptado.

Para o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos, esta grandeza é a mais utilizada na forma de  $\text{Wh/m}^2/\text{dia}$ .

Os conceitos e variáveis tratados nessa seção afetam a etapa de captação da energia solar pelos módulos de um sistema fotovoltaico, portanto, extremamente relevantes para compreensão e dimensionamento destes sistemas. Na próxima seção será discorrido sobre as células e os módulos fotovoltaicos, assim como os principais componentes desse sistema.

Figura 7 – Perfil da irradiância solar ao longo de um dia.

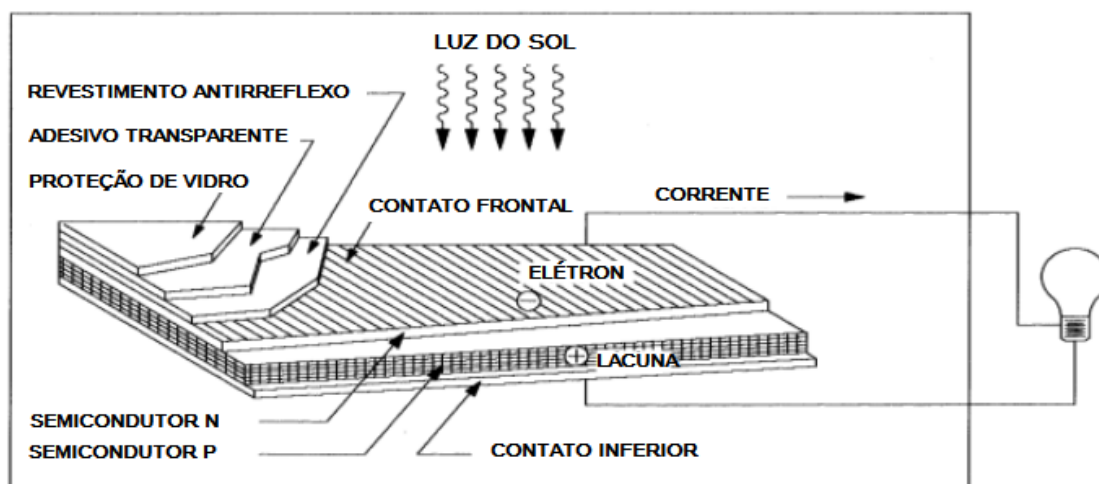


Fonte: Villalva e Gazzoli (2012).

### 2.1.1 Principais Componentes de um Sistema Fotovoltaico

Um sistema fotovoltaico é geralmente composto por módulos fotovoltaicos, banco de baterias, controlador de carga e inversor. Antes da descrição destes elementos, é pertinente entender o funcionamento de uma célula fotovoltaica. Como conceituado anteriormente, o efeito fotovoltaico é a capacidade de conversão da luz solar em eletricidade, neste caso, através de um elemento semicondutor pequeno que absorve a luz. A maioria das camadas semicondutoras de uma célula são compostas por silício devido ao seu baixo custo e abundância (VILLALVA; GAZOLI, 2012). Na Figura 8 observa-se a estrutura de uma célula fotovoltaica com seus elementos básicos: grade metálica para coleta da corrente, revestimento antirreflexo com o objetivo de evitar reflexão e aumentar a absorção de luz, proteção de vidro na cobertura da célula, semicondutor P, semicondutor N e os terminais elétricos conectados à uma lâmpada.

Figura 8 – Elementos básicos da estrutura de uma célula fotovoltaica.



Fonte: Patel (2006), adaptado.

A camada N da célula condutora é extremamente fina, possibilitando a passagem da luz solar para descarregar sua energia nos elétrons, dando início a movimentação para a camada P. Como o semicondutor N possui excedente de elétrons enquanto o semicondutor P tem falta deles, os elétrons em excesso passam para a camada P, criando um campo elétrico dentro de uma barreira de potencial (VILLALVA; GAZOLI, 2012). Esse processo de preenchimento de lacunas por elétrons é chamado de junção semicondutora. A corrente elétrica produzida pela célula ocorre da seguinte maneira:

Os elétrons em movimento são coletados pelos eletrodos metálicos. Se houver um circuito fechado os elétrons vão circular em direção aos eletrodos da camada N, formando uma corrente elétrica. Uma parte dos elétrons acaba sendo aprisionada pelas lacunas que existem na camada N, entretanto uma grande parte deles fica livre para formar a corrente elétrica quando um condutor elétrico forma um circuito entre as duas camadas. (VILLALVA; GAZOLI, 2012)

O conjunto de várias células fotovoltaicas compõe um módulo (placa ou painel) fotovoltaico, podendo este ser agrupado em série ou paralelo com outros módulos. Quando estão conectados em série, a tensão de saída é o somatório das tensões individuais de cada painel e a corrente é a mesma em todo o conjunto. Já quando estão em paralelo, a tensão de saída é a mesma fornecida por um módulo e a corrente é a soma de cada placa. Um conjunto de módulos é denominado como

arranjo fotovoltaico. Esses módulos fotovoltaicos não possuem uma tensão de saída constante, visto que há uma dependência da tensão e corrente, além da correlação da carga conectada aos terminais do painel.

A corrente elétrica fornecida pelos módulos depende da radiação solar, ou seja, a corrente máxima do painel varia proporcionalmente à irradiância (VILLALVA; GAZOLI, 2012). Já a tensão, em consequência a potência, é influenciada pela temperatura: em baixas temperaturas tem-se tensões maiores e vice-versa.

Os demais componentes de um sistema fotovoltaico são a bateria (ou bancos de baterias), inversor CC-CA e o controlador de carga.

As baterias geralmente são utilizadas em sistemas autônomos (sistemas que não possuem conexão com a rede elétrica da concessionária de energia) com o intuito de fornecer em tempo integral a eletricidade. Quando há pouco consumo a energia gerada pelos módulos é armazenada em baterias, viabilizando o uso desta em momentos com baixa ou nenhuma radiação solar.

O controlador de carga tem a função de regular a carga da bateria além de prolongar sua vida útil. São obrigatórios em sistemas que possuem baterias na sua composição, pois evita o carregamento (ou descarregamento) excessivo. Por fim, o inversor CC-CA realiza a conversão da corrente contínua gerada pelos módulos para corrente alternada solicitada pelos equipamentos.

### 2.1.2 Sistemas Fotovoltaicos isolados e conectados à rede

Existem duas possibilidades de arranjos fotovoltaicos destinados ao fornecimento de energia elétrica para residências: autônomos ou conectados à rede.

Os sistemas autônomos geralmente são utilizados para fornecimento de eletricidade em regiões isoladas da rede de distribuição da concessionária local ou regiões de difícil acesso, como ilhas e comunidades que vivem em áreas de preservação ambiental.

Já os sistemas conectados à rede operam em paralelo com a rede de eletricidade, ou seja, é empregado em regiões que já são atendidas por energia elétrica (VILLALVA; GAZOLI, 2012), visando gerar eletricidade para consumo local ou gerar excedente de energia elétrica. Este tipo de sistema é contemplado pela

Resolução Normativa nº482, de 12 de abril de 2012 da ANEEL, a qual estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuídas aos sistemas de distribuição de energia elétrica e o sistema de compensação de energia elétrica (ANEEL, 2012).

### 2.1.3 Sistemas Fotovoltaicos no Brasil

Esta parte apresenta os dados mais recentes<sup>2</sup> acerca do uso de energia solar no Brasil.

A partir de 2014 começaram os leilões para contratação de energia solar de geração pública centralizada, com o intuito da promoção do uso e desenvolvimento da energia solar no Brasil (MME, 2017), apresentando até 2015 um total de 94 projetos contratados. Segundo o Ministério de Minas e Energia (MME), em 09 de outubro de 2017, o Brasil contava com 438,3 MW de potência instalada de geração solar, equivalendo a 15,7 mil instalações (Tabela 2).

Tabela 2 – Instalações solares no Brasil

Tipo de Registro na Aneel	MW			Número de instalações		
	2015	2016*	2017**	2015	2016*	2017**
Outorga e Registro na Aneel	21,2	23,0	311,7	24	42	60
Distribuída (telhado)***	10,8	61,7	126,6	1.250	7.811	15.609
<b>Total</b>	<b>32,0</b>	<b>84,7</b>	<b>438,3</b>	<b>1.274</b>	<b>7.853</b>	<b>15.669</b>

\* dados de 30/12/16 \*\* dados de 09/10/17 \*\*\* informações das distribuidoras

Fonte: Ministério de Minas e Energia (2017).

A expansão da energia solar no Brasil faz parte do Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE), o qual estima que até 2026 a capacidade instalada de geração solar atinja 13 GW. A Empresa de Pesquisa Energética (EPE) é ainda mais otimista: em seus estudos do Plano Nacional de Energia (PNE), prevê 78 GW.

<sup>2</sup> Os dados mais recentes encontrados para este estudo tem como ano de referência 2016 com informações atualizadas em 16 de outubro de 2017. Todas as informações foram obtidas através do Ministério de Minas e Energia.

Em relação ao Estado do Paraná, conforme levantamento de uma notícia publicada na Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), em janeiro de 2018, o estado ocupa o terceiro lugar no número de microgeradores conectados ao sistema de energia elétrica, tendo 1,5 mil unidades geradoras de energia solar fotovoltaica.

## 2.2 ENERGIA EÓLICA

Esta seção descreve como é a conversão do vento em energia elétrica, os principais componentes de um aerogerador e a energia eólica no Brasil e no Paraná.

### 2.2.1 Energia elétrica através do vento

Para compreender a conversão do vento em eletricidade, uma etapa inicial é assimilar a origem dos ventos e quais fatores o influenciam.

Em razão da forma da Terra, da sua rotação e irregularidades da superfície, o aquecimento atmosférico acontece de forma não homogênea (MME, 2016), ocorrendo os deslocamentos de massas de ar: massas de ar quente sobem e as de ar frio descem, dando origem ao vento. Existem diferentes mecanismos de geração dos ventos, descritos pelo CRESESB (2008): ventos planetários ou constantes, ventos continentais ou periódicos e ventos locais. A caracterização de cada um deles está explícita na Tabela 3. Outro ponto relevante a respeito dos ventos são os fatores locais que influenciam na sua velocidade, como altitude e relevo, transformando cada projeto eólico exclusivo para determinada região.

Tabela 3 – Síntese dos tipos de ventos e suas características

Tipo de vento	Características	Classificação
Planetários ou constantes	Ventos sem interrupção devido à presença constante de aquecimento no equador e resfriamentos nos polos.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Alísios: dos trópicos para o Equador (baixas altitudes);</li> <li>2) Contra-Alísios: do Equador para os polos (altas altitudes);</li> <li>3) Ventos do Oeste: dos trópicos para os polos;</li> <li>4) Polares: dos polos para zonas temperadas.</li> </ol>
Continentais ou periódicos	Variação sazonal na intensidade e duração do vento devido à inclinação do eixo da Terra e variações na distribuição de radiação solar.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Monções: ventos que mudam de direção a cada seis meses, aproximadamente;</li> <li>2) Brisas: ventos periódicos que sopram do mar para o continente (brisa marítima) e do continente para o mar (brisa terrestre).</li> </ol>
Ventos locais	Ventos que sopram em determinadas regiões em razão das condições locais. São peculiares de cada região.	Exemplo: manifestação dos ventos em vales e montanhas.

Fonte: CRESESB (2008), adaptado.

Para a extração de energia elétrica a partir do vento tem-se o aerogerador, constituído basicamente por uma torre, nacela e rotor (Figura 9). A turbina eólica captura a energia cinética do vento em um rotor com duas ou mais pás acopladas mecanicamente ao gerador elétrico (PATEL, 2006). A potência proveniente do vento é dada pela equação (3).

$$P = 1/2 (\rho AV^3) \quad (3)$$

Onde:

P: potência mecânica no ar em movimento (W);

$\rho$ : densidade do ar ( $\text{kg/m}^3$ );



A: área varrida pelas pás do rotor ( $m^2$ );

V: velocidade do ar (m/s).

A energia extraída pelas pás é expressa pela equação (4):

$$P_o = 1/2 (\rho AV^3 C_p) \quad (4)$$

Sendo:

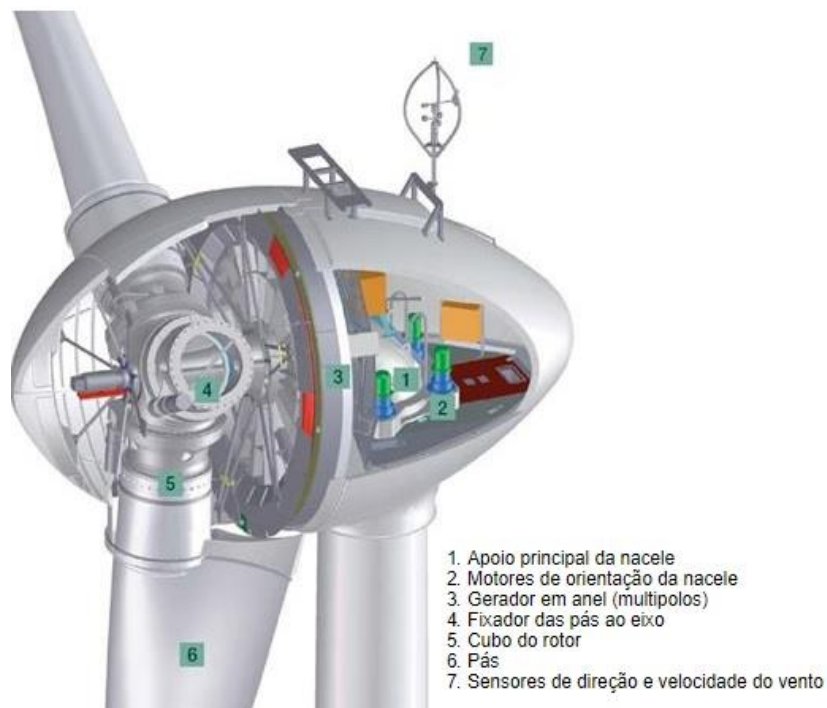
$$C_p = \frac{\left(1 + \frac{V_o}{V}\right) \left[1 - \left(\frac{V_o}{V}\right)^2\right]}{2} \quad (5)$$

$C_p$ : coeficiente de potência do aerogerador;

$V_o$ : velocidade do vento a jusante na saída das pás do rotor;

V: velocidade do vento à montante na entrada das pás do rotor.

Figura 9 – Principais componentes da nacele de um aerogerador



Fonte: CRESEB (2008).

Há outros parâmetros matemáticos envolvidos na modelagem dos aerogeradores, porém este estudo tem foco na simulação de sistemas híbridos no HOMER PRO. Sendo assim, apenas os conceitos mais básicos foram abordados.

### 2.2.2 Energia eólica no Brasil

Os primeiros estudos eólicos realizados no Brasil foram feitos na região Nordeste, resultando na publicação do Atlas Eólico da Região Nordeste em 1998 (ANEEL, 2010), desde então o país apresenta índices crescentes no investimento em geração eólica. Já em 2015, o Brasil foi o 8º país em geração e o 4º na expansão de potência (Tabela 4).

Tabela 4 – Potência Instalada e Geração Eólica por País no ano de 2014

País	Geração (TWh)	% do Total Gerado no País	Potência Instalada (MW)	Fator de Capacidade (%)	Expansão no Ano (MW)
EUA	192,9	4,5	74.740	31	8.594
China	185,1	3,1	145.109	16	30.500
Alemanha	88,0	14,6	45.018	24	5.825
Espanha	49,3	18,2	23.025	24	-
Índia	41,4	3,1	25.088	20	2.623
Reino Unido	40,4	12,8	14.191	34	1.204
Canadá	24,6	3,9	11.190	27	1.506
Brasil	21,6	3,5	7.633	38	2.745
França	20,2	3,7	10.269	23	932
Suécia	16,6	10,7	6.126	33	602
Itália	14,7	5,4	9.126	19	423
Dinamarca	14,3	44,6	4.932	34	154
Portugal	11,6	21,7	4.815	28	132
Turquia	11,6	4,6	4.503	34	873
Polônia	10,8	6,8	5.150	27	1.265
Austrália	10,7	4,3	4.436	29	380
México	7,9	2,6	3.224	32	714
Holanda	7,5	5,2	3.422	27	546
Romênia	7,0	11,9	2.985	27	23
Irlanda	6,6	24,8	2.546	31	224
Outros	58,5	0,8	27.195	26	3.565
<b>Total</b>	<b>841,2</b>	<b>3,5</b>	<b>434.722</b>	<b>23,8</b>	<b>62.829</b>
<b>%/total*</b>	<b>3,5</b>		<b>7,0</b>		<b>27,0</b>

\* % da eólica sobre os totais mundiais

Fonte: ANEEL (2016).

No Banco de Informações de Geração (BIG) da ANEEL, tem-se os dados mais atualizados da participação eólica na matriz energética. Em maio de 2018 haviam 527 empreendimentos em operação e 110 em construção, representando 8,11% e 30,21% da potência outorgada em kW, respectivamente.

No Paraná, em 1999, entrou em operação o primeiro parque eólico do sul brasileiro: a Usina de Palmas. Em 2018 foi anunciado a expansão do parque com previsão de geração de 200 MW.

### 2.3 SISTEMA HÍBRIDO DE GERAÇÃO

Os sistemas híbridos geralmente são utilizados para atendimento de consumidores residenciais que estão em região afastada ou isolada da rede elétrica convencional, tendo como função gerar e distribuir eletricidade, dependendo da disponibilidade dos recursos, de forma otimizada e com custos mínimos (LEONI et al., 2016).

Em 2010 três pesquisadores brasileiros publicaram um estudo sobre um projeto piloto de geração híbrida através de energia solar e células de combustível para uma área de preservação ambiental em Tocantins. O projeto piloto usa a energia solar como fonte primária de produção de energia elétrica, na qual a energia excedente é armazenada em hidrogênio proveniente da eletrólise da água. Posteriormente ocorre a transformação em eletricidade pelas células de combustível em períodos de escassez solar (SILVA, S. B.; et al., 2010). Neste estudo os pesquisadores também utilizaram o HOMER PRO para as análises econômicas.

Outro estudo empregando o HOMER PRO foi uma modelagem e análise de custos de um sistema híbrido de energia para a ilha de St. Martin, em Bangladesh, em 2013, o qual concluiu, através da otimização do HOMER, que devido ao aumento do custo do diesel e a diminuição do uso de fontes não renováveis de geração, a melhor solução para a ilha foi um sistema composto por fonte solar, baterias, eólica e diesel (MAHMUD; et al., 2013). Um projeto recente, 2017, foi proposto para dois casos: um sistema híbrido de energia para uma comunidade costeira e outra rural na África. Na região costeira, Mbandana, o sistema é composto por fonte solar e eólica e na comunidade rural, Dikgomo, um sistema com fonte biomassa e solar. Ambos foram otimizados no HOMER PRO. Uma das conclusões

relevantes desse projeto foi quantificar o potencial de geração híbrida em duas regiões distintas da África Subsaariana, a qual grande parte da população não tem acesso à energia elétrica (LAMBANI; et al., 2017).

No ano de 1986 foi instalado o primeiro sistema híbrido no Brasil, composto por fonte eólica e diesel, na ilha Fernando de Noronha. Entre 2014 e 2015 foram inauguradas duas usinas solares nessa ilha, e, segundo Leoni (2016), evita-se o consumo de aproximadamente 400 mil litros de diesel por ano. Também em 2014, em Tacaratu (Pernambuco), deu-se início a operação de uma usina híbrida eólico-solar, produzindo cerca de 17 GWh por ano, podendo suprir a demanda de aproximadamente 90 mil casas. Outra usina eólica-solar está em operação desde 2016 em Caetitê, na Bahia. Possui 19.200 módulos fotovoltaicos e oito aerogeradores, com capacidade de geração de 12 MW sendo possível atender 130 mil pessoas. Estes são alguns empreendimentos brasileiros para ilustrar que os sistemas híbridos fazem parte do cenário elétrico atual.

### 2.3.1 *Software* HOMER PRO

Inicialmente é fundamental compreender as ferramentas e limitações do *software* utilizado no estudo. O HOMER PRO é um programa pago que projeta a configuração dos componentes de um sistema de geração híbrido da forma mais otimizada e econômica (MAHMUD; et al., 2013). Para isso, são necessários alguns dados de entrada relacionados aos painéis fotovoltaicos, turbinas dos aerogeradores, rede elétrica da concessionária e perfil de carga.

Após a inserção do perfil de carga elétrica da região analisada, o programa solicita uma fonte de geração. Quando painéis fotovoltaicos são selecionados, é preciso colocar alguns parâmetros intrínsecos desta opção: marca do módulo (há uma lista com marcas conhecidas no mercado de energia solar e possibilidade de seleção de um módulo genérico), capacidade do painel (kW), preço unitário e preço de reposição. Em seguida, o programa solicita um inversor CC-CA e os dados inerentes à radiação solar (GHI e DNI) e temperatura. O usuário pode inserir manualmente ou por meio de arquivo, caso já possua estes dados, ou ainda utilizando a latitude e longitude da região estudada, assim o HOMER PRO apresenta

essas informações pelo banco de dados da NASA<sup>3</sup>. Neste estudo as informações de DNI foram retiradas do banco de dados disponibilizado pelo Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná, 2017.

Basicamente os mesmos requisitos são válidos para um aerogerador. Inicialmente pede-se as características do modelo (potência, custo, preço da energia eólica, etc.). Os dados da velocidade do vento também são cedidos pela NASA. Por fim, com a opção de ligação à rede elétrica (*grid*) da concessionária, o programa solicita o preço comercializado de energia, custo do empreendimento e custo de operação.

O *software* desempenha três funções principais: simulação, otimização e análise de sensibilidade. Na etapa de simulação, como o próprio nome já esclarece, o programa irá simular um sistema viável para todas as combinações possíveis dos equipamentos utilizados. Já na otimização, os sistemas simulados passarão por uma filtragem conforme as especificações do usuário (aumento no número de painéis solares, por exemplo). Por fim, na análise de sensibilidade, que é um opcional, é possível explorar como o sistema se comporta com as variações de velocidade de vento, custo de combustível, entre outros aspectos que estão fora do controle de quem utiliza a ferramenta. Cabe ressaltar que o programa é basicamente um modelo de utilização econômica.

Os conceitos abordados nesse capítulo são base para compreensão das métricas utilizadas na etapa de simulação. O próximo capítulo apresentará os dados necessários para a simulação e otimização dos sistemas híbridos no HOMER PRO.

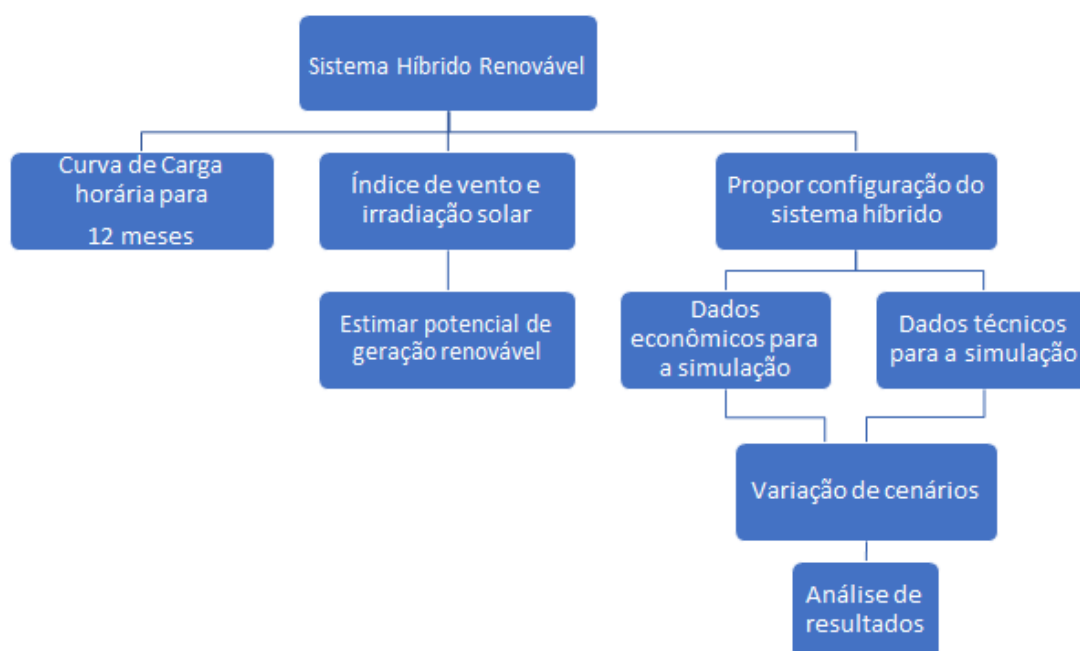
---

<sup>3</sup>Banco de dados disponibilizados pela *NASA Surface meteorology and Solar* através das coordenadas geográficas da Ilha do Mel. Medições: média mensal e anual de 22 anos, entre os períodos de julho de 1983 a junho de 2005.

### 3 SIMULAÇÃO DO SISTEMA HÍBRIDO DE GERAÇÃO

Este capítulo apresenta todos os requisitos necessários para a simulação e otimização no HOMER PRO. O fluxograma da Figura 10 ilustra as etapas para cumprir as condições da simulação.

Figura 10 – Fluxograma da metodologia das etapas principais do trabalho

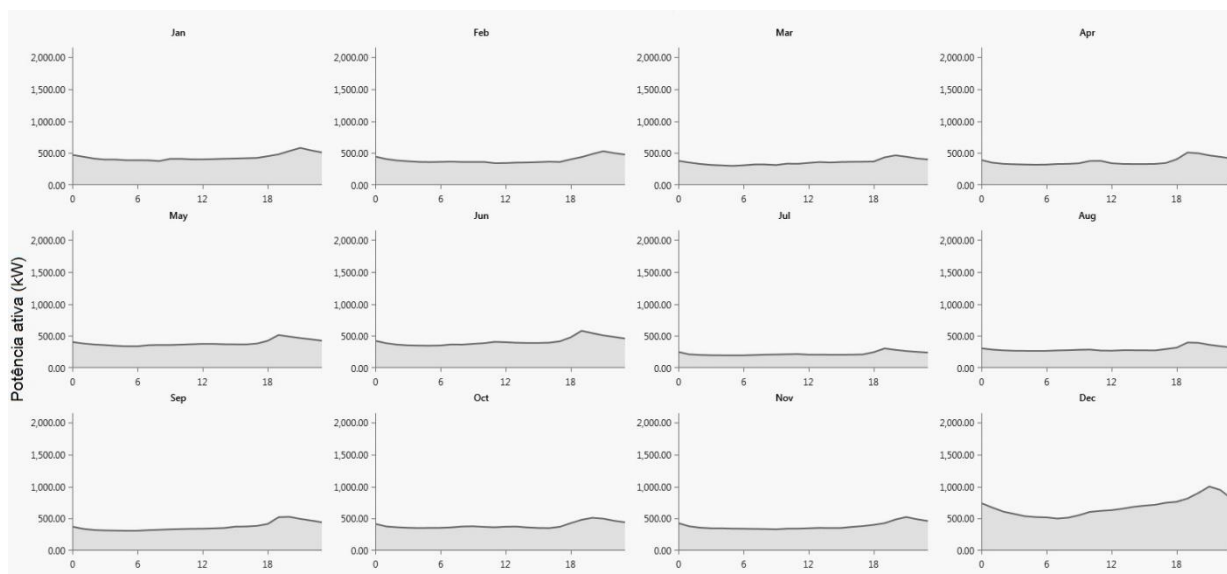


Fonte: a autora (2018).

#### 3.1 Perfil de carga da Ilha do Mel

O primeiro dado solicitado pelo HOMER PRO é o perfil de carga, neste caso, da Ilha do Mel. O *software* permite a criação de uma carga sintética ou inserção dos dados (em kW, contendo a carga elétrica no período de um ano, com medições horárias). O período para este estudo foi o ano de 2017 (janeiro a dezembro), apresentando as curvas de cargas mensais a seguir (Figura 11). Na Figura 11 o eixo das ordenadas apresenta a potência ativa consumida (kW) e o eixo das abscissas contém o período de um dia (em horas), dividido em intervalos de 6 horas.

Figura 11 – Curvas de carga da Ilha do Mel no período de 2017



Fonte: Monteiro et al. (2018).

O perfil de carga da Ilha do Mel é majoritariamente residencial, apresentando picos no final de dezembro devido ao aumento de fluxo de turistas ocasionado pelo verão brasileiro e recessos de fim de ano, chegando horários que atingem até 1,5 MW. O consumo médio da Ilha do Mel, em 2017, foi de 10.384,58 kWh/dia. Na Tabela 5 encontram-se as médias diárias por mês.

Tabela 5 – Consumo médio diário (kWh/dia) no ano de 2017 na Ilha do Mel

Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho
10.487	9.466	8.631	8.866	9.334	9.912
Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
9.642	10.021	9.577	9.486	9.241	19.952
<b>Média: 10.384,58</b>					

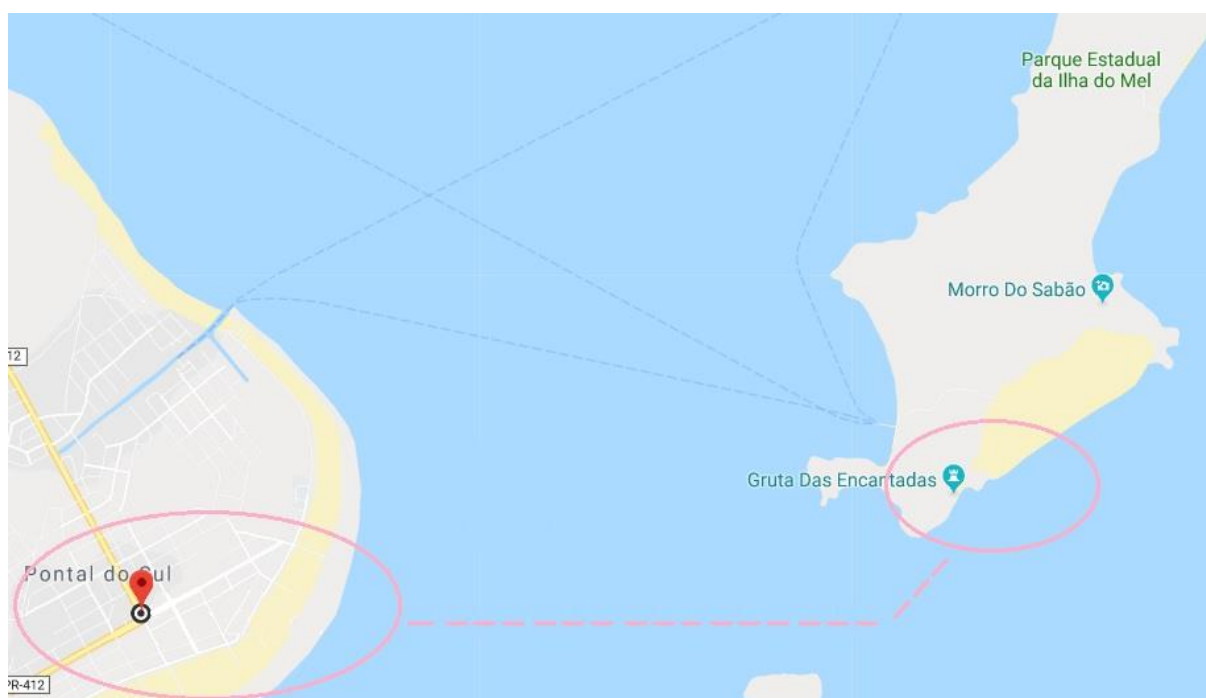
Fonte: a autora (2018), adaptado.

Após a inserção do perfil de carga da Ilha, o programa solicita a inserção das fontes de geração, sendo elas já existentes ou como parte de um projeto futuro. Serão consideradas três fontes de geração: a rede elétrica da concessionária (*grid*), energia solar fotovoltaica e energia eólica.

### 3.2 Rede elétrica da concessionária

A Ilha do Mel é alimentada por dois circuitos de 13,6 kV que saem do continente (Paranaguá), da subestação de Pontal, chegando nas ilhas do Mel, das Peças e Superagui. A Figura 12 apresenta, de forma aproximada, a conexão entre esses pontos.

Figura 12 – Ligação da subestação Pontal do Sul (POS) à Ilha do Mel



Fonte: Google Maps (2018), adaptado.

Os cabos foram dimensionados para uma tensão de até 34,5 kV e atendimento de uma demanda de 1.300 kVA, podendo suportar até o triplo de carga (COPEL, 1998). Uma síntese das ligações do continente às ilhas encontra-se na Tabela 6.

Ao total são três trechos através de uma linha de distribuição submarina totalizando 6,2 km, assentados no fundo da Baía de Paranaguá (COPEL, 1998).



Tabela 6 – Ligações elétricas da Subestação de Pontal do Sul até as Ilhas do Mel, das Peças e Superagui

Origem	Destino	Extensão	Via dos cabos
Subestação Pontal	Cabos submarinos	3,5 km	Aérea
Cabos submarinos	Praia das Encantadas (Ilha do Mel)	3,3 km	Submerso
Praia das Encantadas	Cassual	*	Aérea
Cassual	Pedra da Galiça (Ilha das Peças)	1,9 km	Submerso
Pedra da Galiça	Praia do Indaiazeiro (Barra do Superagui)	11 km	Aérea
Praia do Indaiazeiro	Vila do Superagui	1 km	Submerso

\*dado não encontrado

Fonte: COPEL (1998), adaptado.

O HOMER PRO solicita a entrada dos dados de tensão e preço da tarifa para as fontes de geração existentes. A tarifa considerada neste trabalho é referente ao ano de 2017, considerando o perfil de carga da ilha no Grupo de Tarifação B1<sup>4</sup>. O valor referente ao ano de estudo é R\$ 0,69118 por kWh, considerando os impostos (ICMS, PIS e COFINS). O *software* trabalha com valores em dólares, para isso, usou-se a cotação do dólar de 2017 disponibilizado pelo Ministério da Fazenda (Tabela 7).

Tabela 7 – Cotação do dólar – ano de referência: 2017

(continua)

Mês	Data de cotação	Compra (R\$)	Venda (R\$)
Janeiro	31/01/2017	3,1264	3,1270
Fevereiro	24/02/2017	3,0987	3,0993
Março	31/03/2017	3,1678	3,1684
Abril	28/04/2017	3,1978	3,1984
Mai	31/05/2017	3,2431	3,2437
Junho	30/06/2017	3,3076	3,3082

<sup>4</sup> A concessionária de fornecimento de energia elétrica possui tarifas específicas conforme os níveis de tensão. O Grupo B1 são consumidores com fornecimento de tensão inferior a 2,3 kV, do tipo residencial e tarifa monômnia, ou seja, tarifa sobre o consumo de energia elétrica ativa.

(continuação)

Mês	Data de cotação	Compra (R\$)	Venda (R\$)
Julho	31/07/2017	3,1301	3,1307
Agosto	31/08/2017	3,1465	3,1471
Setembro	29/09/2017	3,1674	3,1680
Outubro	31/10/2017	3,2763	3,2769
Novembro	30/11/2017	3,2610	3,2616
Dezembro	29/12/2017	3,3074	3,3080
Valor médio Compra		R\$ 3,2025	
Valor médio Venda		R\$ 3,2031	

Fonte: Receita Federal, Ministério da Fazenda (2018), adaptado.

Sendo assim, o valor de entrada no HOMER PRO para o preço de venda de energia elétrica, pela concessionária, foi US\$ 0,21582.

### 3.3 Sistema fotovoltaico

Com a inserção do perfil de carga e dos dados da concessionária, tem-se início a montagem do sistema híbrido de geração. Como a proposta inclui uma parcela constituída por um sistema fotovoltaico, o HOMER PRO solicita, primeiramente, os recursos naturais inerentes a este sistema, assim como a inserção do potencial de geração, dados dos painéis e inversores.

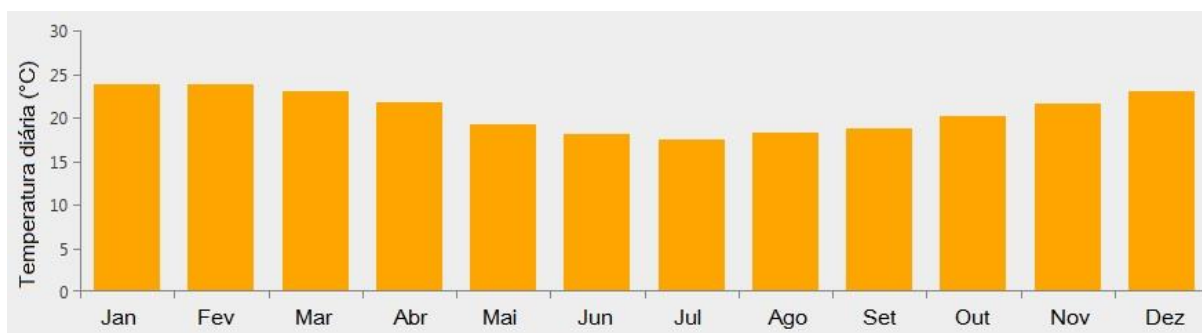
#### 3.3.1 Recursos naturais: geração solar fotovoltaica

O HOMER PRO requer três recursos naturais para a implantação de um sistema fotovoltaico: temperatura, Irradiação Global Horizontal (GHI) e Irradiação Direta Normal (DNI). O *software* utiliza os dados da temperatura ambiente para o cálculo da temperatura nas células fotovoltaicas, que podem ser inseridos através de arquivo ou baixados pelo banco de dados disponibilizados pela NASA no próprio HOMER PRO.

Usando as coordenadas geográficas da Ilha do Mel, latitude  $-25,57^\circ$  e longitude  $-48,31^\circ$ , o HOMER PRO utiliza os dados da NASA *Surface meteorology*

and Solar database, o qual apresenta valores médios mensais medidos no período de 22 anos, de julho de 1983 a junho de 2005. Na figura a seguir (Figura 13) tem-se graficamente o perfil de temperatura obtido para a região e na Tabela 8 os valores médios.

Figura 13 – Temperatura diária na Ilha do Mel durante o período de um ano



Fonte: NASA Surface meteorology and Solar Energy (2005), adaptado.

Tabela 8 – Dados das temperaturas médias mensais na Ilha do Mel (em °C)

<b>Janeiro</b>	23,740	<b>Julho</b>	17,490
<b>Fevereiro</b>	23,830	<b>Agosto</b>	18,200
<b>Março</b>	23,070	<b>Setembro</b>	18,730
<b>Abril</b>	21,740	<b>Outubro</b>	20,150
<b>Maio</b>	19,220	<b>Novembro</b>	21,580
<b>Junho</b>	18,170	<b>Dezembro</b>	22,950

Fonte: NASA Surface meteorology and Solar Energy (2005), adaptado.

O GHI da Ilha do Mel foi obtido pelo mesmo banco de dados da temperatura, apresentando o seguinte perfil diário de irradiação (Figura 14), com uma média anual de 4,01 kWh/m<sup>2</sup>/dia (Tabela 9).

Figura 14 – Irradiação Global Horizontal (GHI) na Ilha do Mel



Fonte: NASA Surface meteorology and Solar Energy (2005), adaptado.

Tabela 9 – Média mensal da Irradiação Global Horizontal (GHI) na Ilha do Mel

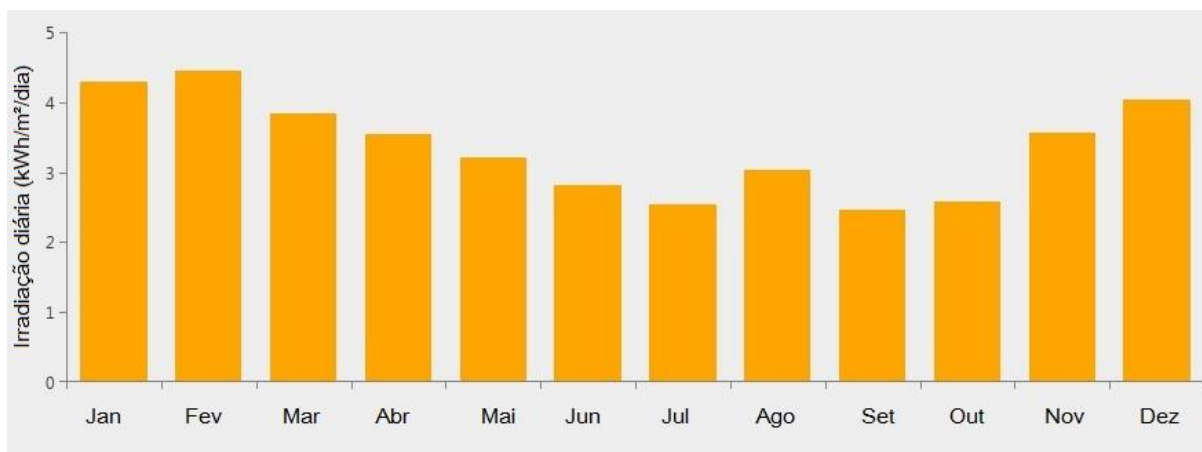
Mês	Índice de Clareza <sup>5</sup>	Irradiância diária (kWh/m²/dia)	Mês	Índice de Clareza	Irradiância diária (kWh/m²/dia)
Janeiro	0,422	4,990	Julho	0,486	3,010
Fevereiro	0,425	4,720	Agosto	0,492	3,650
Março	0,436	4,270	Setembro	0,389	3,530
Abril	0,448	3,620	Outubro	0,398	4,220
Mai	0,465	3,070	Novembro	0,433	5,020
Junho	0,481	2,830	Dezembro	0,430	5,150

Fonte: NASA Surface meteorology and Solar Energy (2005), adaptado.

Já os dados da Irradiação Direta Normal (DNI) foram retirados do Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná (TIEPOLO G. M., et al., 2017) inseridos no *software* para geração dos gráficos (Figura 15) e dimensionamento do sistema híbrido, tendo uma média anual de 3,36 kWh/m²/dia (Tabela 10).

<sup>5</sup> O Índice de Clareza (*Clearness Index*) é um valor adimensional, entre 0 e 1, que indica a fração da radiação solar que atinge a atmosfera e atinge efetivamente a superfície terrestre.

Figura 15 – Irradiação Direta Normal (DNI) na Ilha do Mel



Fonte: Tiepolo et al. (2017), adaptado.

Tabela 10 – Média mensal da Irradiação Direta Normal (DNI) na Ilha do Mel

Mês	Irradiação diária (kWh/m²/dia)	Mês	Irradiação diária (kWh/m²/dia)
<b>Janeiro</b>	4,290	<b>Julho</b>	2,530
<b>Fevereiro</b>	4,440	<b>Agosto</b>	3,038
<b>Março</b>	3,840	<b>Setembro</b>	2,460
<b>Abril</b>	3,540	<b>Outubro</b>	2,580
<b>Maio</b>	3,210	<b>Novembro</b>	3,559
<b>Junho</b>	2,810	<b>Dezembro</b>	4,039

Fonte: Tiepolo et al. (2017), adaptado.

### 3.3.2 Potencial fotovoltaico

Para a estimativa da potência de geração fotovoltaica, primeiramente, deve-se ter os dados da energia média consumida (Tabela 5), a qual foi considerada a média anual para os cálculos. Outro dado essencial é irradiação no plano inclinado na latitude ( $\text{kWh/m}^2$ ), retirado do Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná (Tabela 11). A Irradiação no Plano Inclinado na Latitude é aquela incidente em uma superfície com inclinação igual à latitude do local, com orientação para o norte geográfico (TIEPOLO G. M., et al., 2017), apresentando as condições ideais para a instalação de sistemas fotovoltaicos.

Tabela 11 – Irradiação Plano Inclinado na Latitude na Ilha do Mel em valores diários (kWh/m<sup>2</sup>/dia)

Mês	Valores diários (kWh/m <sup>2</sup> /dia)	Mês	Valores diários (kWh/m <sup>2</sup> /dia)
Janeiro	4,93	Julho	3,29
Fevereiro	5,21	Agosto	3,87
Março	4,77	Setembro	3,68
Abril	4,36	Outubro	3,89
Maio	3,85	Novembro	4,59
Junho	3,38	Dezembro	4,93
<b>Anual: 4,23</b>			

Fonte: Tiepolo et al. (2017), adaptado.

Aplicando os valores da energia média consumida (10.384,58 kWh/dia) e da irradiação no plano inclinado anual (4,23 kWh/m<sup>2</sup>/dia), na equação (6), obtém-se a potência total do sistema fotovoltaico, sendo 3.147,41 kWp.

$$P_{FV} = \frac{E \cdot G}{I \cdot PR} \quad (6)$$

Onde:

$P_{FV}$ : potência do painel fotovoltaico (kWp);

E: energia média consumida (Wh/dia);

G: irradiância nas condições STC<sup>6</sup>;

I: irradiação no plano (Wh/m<sup>2</sup>/dia);

PR: rendimento do conjunto (considerado, neste estudo, como 0,78).

O modelo de painel fotovoltaico utilizado nesta análise foi da *CanadianSolar* (CS6X-P-FG) com uma potência de 320 W e eficiência ( $E_f\%$ ) de 16,39%<sup>7</sup>. Para o cálculo da área do sistema (A), utilizou-se a equação (7).

$$A = \frac{P_{FV}}{E_f\%} \cdot 10 \quad (7)$$

<sup>6</sup> Condições padrões de teste (*Standard Testing Conditions*): 1000 W/m<sup>2</sup> a 25°C de temperatura na célula fotovoltaica, com AM 1,5, conforme a IEC 60904-3.

<sup>7</sup> Eficiência do painel retirada da folha de dados do módulo da CanadianSolar.

Obeve-se uma área de 19.203,23 m<sup>2</sup>. Considerando a área unitária do painel com 1,95 m<sup>2</sup>, tem-se um total de 9.848 módulos.

### 3.3.3 Equipamentos: geração solar fotovoltaica

Os equipamentos utilizados para a simulação do sistema fotovoltaico consistem nos módulos e nos conversores CC-CA, descritos na Tabela 12. A especificação foi escolhida de acordo com as opções fornecidas pelo HOMER PRO.

Tabela 12 – Especificações dos equipamentos do sistema fotovoltaico

Equipamento	Características	Investimento <sup>8</sup>
Módulo fotovoltaico	CanadianSolar MaxPower CS6U-330P	\$224,00/ unidade
Conversor CC-CA e acessórios	ABB string inverters OVS-120-TL-Power Moldule; String Box ABB WB-SX2-PVS-100/120-TL/24 entradas; ABB Bracket PVS 100/120	\$160,00/ unidade

Fonte: Monteiro *et al.* (2018).

## 3.4 Sistema eólico

Outra parte do sistema híbrido de geração é a eólico, dependente diretamente do vento da Ilha do Mel. Para o dimensionamento desse sistema são necessários os dados de recursos naturais (velocidade do vento) e as especificações do modelo do aerogerador.

### 3.4.1 Recursos naturais: geração eólica

A velocidade do vento (Figura 16) foi obtida através do banco de dados da NASA *Surface meteorology and Solar Energy database*, com velocidade do vento a 50 metros da superfície (semelhante a aeroportos), e medições entre julho de 1983 a junho de 1993 (Tabela 13).

<sup>8</sup> Os valores de mercado foram obtidos através da L8 Energy.

Figura 16 – Velocidade média (m/s) mensal na Ilha do Mel



Fonte: NASA Surface meteorology and Solar Energy (1993), adaptado.

Tabela 13 – Média mensal da velocidade do vento (m/s) na Ilha do Mel

Mês	Velocidade do vento (m/s)
Janeiro	4,200
Fevereiro	4,100
Março	4,120
Abril	4,010
Mai	4,130
Junho	4,040
Julho	4,280
Agosto	4,490
Setembro	4,930
Outubro	4,800
Novembro	4,810
Dezembro	4,620
<b>Média anual</b>	<b>4,380</b>

Fonte: NASA Surface meteorology and Solar Energy (1993), adaptado.

### 3.4.2 Equipamentos: geração eólica

O HOMER PRO disponibiliza sugestões de aerogeradores comerciais acompanhados de suas características. Considerando a média anual de ventos na região como 4,380 m/s (Tabela 13) e um consumo médio diário de 10.384,58 kWh/dia (Tabela 5), o equipamento selecionado foi da empresa Leitwind, modelo LTW80, com potência nominal de 1500 kW. Seu rotor possui diâmetro de 80,3



metros e suas pás varrem uma área de 5.064 m<sup>2</sup>. O HOMER PRO, através dos dados do manual técnico do aerogerador, disponibiliza a curva característica da potência de saída da turbina em função da velocidade do vento (Figura 17) na altura do eixo do rotor (60 metros).

O critério de escolha para o aerogerador foi baseado nas opções disponíveis no HOMER PRO que atendessem, não necessariamente toda a demanda, mas suprissem parte dela. A equação (3), na página 30, permite o cálculo da potência no ar, utilizada para o cálculo da potência extraída pelas pás do aerogerador. Considerando 1,225 kg/m<sup>3</sup> para a densidade do ar, 5.064 m<sup>2</sup> para a área varrida pelas pás e velocidade média do ar na região como 4,380 m/s, tem-se uma potência no ar de 260,63 kW. O coeficiente de potência utilizado foi a média entre 0,35 e 0,40, sendo valores do percentual de energia disponível em condições padrões (RAGHEB, 2017). Utilizando a equação (4), página 31, tem-se que potência extraída pelas pás é de 97,74 kW. A princípio o equipamento apresenta uma potência nominal alta, porém, nesta simulação foram considerados no máximo três aerogeradores, tendo uma potência de saída em torno de 73 e 151 kW.

Figura 17 – Potência de saída (kW) em função da velocidade do vento (m/s)



Fonte: Leitwind (2018), adaptado.

Tabela 14 – Potência de saída (kW) em função da velocidade do vento

Velocidade do vento (m/s)	Potência de saída (kW)
3	3
4	73
5	151
6	278
13	1500
25	1500

Fonte: Leitwind (2018), adaptado.

O custo do equipamento é estimado por Megawatt instalado, sendo aproximadamente US\$2.576.112,41<sup>9</sup> dólares, incluindo aerogerador, fundação, acessos, rede de média tensão, subestação e linhas de transmissão. Os custos de operação e manutenção são, geralmente, 2% do custo do equipamento (HOMER PRO, 2016), sendo US\$51.522,25 dólares. Devido às limitações de terreno da Ilha do Mel (distribuição populacional e Área de Preservação Ambiental), a quantidade máxima de aerogeradores considerada neste trabalho foi três.

### 3.5 Parâmetros de simulação

A otimização do sistema em estudo no HOMER PRO requer parâmetros elétricos e econômicos. Nos parâmetros elétricos (Tabela 15) são estipulados os intervalos de potência e equipamentos utilizados na otimização do sistema, indicando o quanto é possível cada fonte fornecer a carga caracterizada. Para o *grid*, que é o sistema base, foram considerados o atendimento de 2.200 kW, 5.000 kW e 10.000 kW. Nos painéis fotovoltaicos foi utilizado o intervalo de otimização, sendo o atendimento de 0 kW a 3.100 kW. Já no sistema eólico é recomendável utilizar o *search space* para quantidades pequenas de turbinas, neste caso, considerou-se de 0 a 3 aerogeradores.

Tabela 15 – Parâmetros elétricos para otimização no HOMER PRO

Componente	Espaço de otimização
Rede elétrica (concessionária)	Atende toda a demanda
Sistema solar fotovoltaico	0 – 3,1 MW
Conversores sistema fotovoltaico	0 – 3,1 MW
Sistema eólico	0 – 3 aerogeradores

Fonte: a autora (2018).

Em relação aos indicadores econômicos (Tabela 16), o *software* solicita a inflação (%) e a taxa de desconto (%) do ano de referência da análise.

<sup>9</sup> Dados fornecidos pela empresa Wobben Windpower.

Tabela 16 – Parâmetros econômicos para otimização no HOMER PRO<sup>10</sup>

Indicador econômico	% ao ano
Inflação	4,10
Taxa de desconto	13,75

Fonte: Monteiro *et al.* (2018).

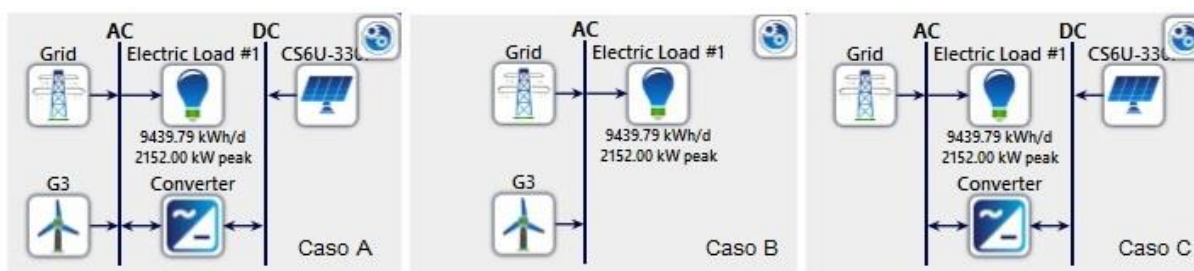
### 3.6 Condições de simulação

A análise do sistema híbrido de geração considerou as seguintes situações (Figura 18):

- Caso A: Sistema de geração híbrido (*grid/ eólico/ solar*);
- Caso B: Sistema de geração híbrido (*grid/ eólico*) e
- Caso C: Sistema de geração híbrido (*grid/ solar*).

Em todas as situações a presença da rede elétrica da concessionária (*grid*) foi considerada, devido a existência atual da mesma, assim como o uso dos parâmetros elétricos e econômicos das Tabelas 15 e 16.

Figura 18 – Configurações dos casos de estudo do sistema híbrido de geração na Ilha do Mel



Fonte: HOMER PRO (2018), adaptado.

<sup>10</sup> Projeções retiradas originalmente do Banco Central do Brasil e do IndexMundi (plataforma de dados globais), ano de referência: 2017.

### 3.7 Métricas das respostas de otimização

O HOMER PRO fornece como resposta uma parte elétrica, sendo a complementariedade das fontes de geração, e outra econômica, com todos os indicadores inerentes à análise de viabilidade econômica de um projeto.

As medidas econômicas obtidas na otimização são o valor presente e anual, retorno de investimento, taxa interna de retorno, *payback* simples e com desconto. Essas métricas são comparadas com um sistema base, que pode ser qualquer um dos simulados no *software*. Os valores apresentados na comparação de dois sistemas de geração são a diferença entre as opções.

O Valor Presente (US\$) considera o valor temporal do dinheiro, e é o valor equivalente no presente de um conjunto de fluxos de caixas futuro (HOMER, 2016). Na comparação entre os dois sistemas, o Valor Presente positivo indica economia de dinheiro ao longo da vida do projeto. O Valor Anual (US\$/ano) é o Valor Presente multiplicado por um fator de recuperação de capital. O Retorno de Investimento (%) é o quociente da divisão entre a diferença no caixa no ano inicial, ou seja, ano zero, e do caixa final pelo tempo de vida do projeto. Por fim, esse resultado é dividido pelo caixa no ano zero. O fluxo de caixa no ano zero varia em cada caso analisado, visto que o caixa é a diferença entre o sistema base e o sistema atual simulado. A Taxa Interna de Retorno (%) é a taxa de desconto na qual o caso base e o sistema atual têm o mesmo custo presente líquido (HOMER, 2016). O *Payback* Simples (ano) é o tempo no qual o projeto deixa de ter um fluxo de caixa negativo e passa a ser positivo. Graficamente é a partir do momento no qual o fluxo atravessa o eixo da abscissa. O *Payback* com Desconto (ano) tem o mesmo significado do *Payback* Simples, a única diferença é que esse considera os descontos intrínsecos do projeto.

Além disso, o HOMER PRO fornece os custos de cada configuração simulada: o custo de energia e o capital inicial de investimento. A base de cálculo para o custo da tarifa no HOMER PRO é o custo anualizado de produção de eletricidade pela carga elétrica total atendida (HOMER PRO, 2016). O cálculo do

custo total anualizado é o produto do NPC *Net Present Cost*)<sup>11</sup>, pela função do fator de recuperação de capital que envolve as variáveis taxa de desconto anual (%) e tempo de vida do projeto. Todo o cálculo é feito internamente no programa.

Utilizando as métricas econômicas, intervalos de potência para a otimização do sistema e os recursos naturais de cada fonte de geração, tem-se os resultados obtidos nas simulações dos três casos, apresentados no Capítulo 4.

---

<sup>11</sup> O NPC corresponde ao valor presente de todos os custos incorridos ao longo da vida do projeto (custos de capital, manutenção e operação, compra de energia, etc.) menos o valor presente de toda a receita que ganha nesse mesmo intervalo (receita de venda da rede, por exemplo).

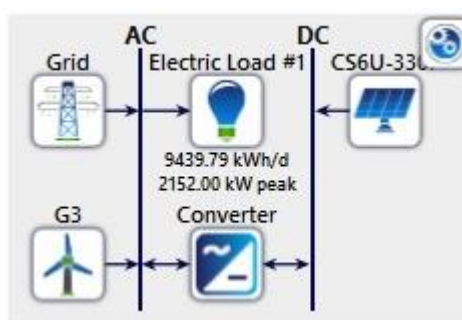
## 4. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Os três casos analisados foram embasados nas respostas fornecidas pelo HOMER PRO, considerando as métricas econômicas e elétricas, explicitadas no item 3.7.

### 4.1 Caso A – Sistema de geração híbrido *grid/* eólico/ solar

O primeiro caso analisado possui contribuição de três fontes de geração distintas, apresentando a configuração a seguir (Figura 19).

Figura 19 – Topologia do sistema de geração híbrido *grid/* eólico/ solar



Fonte: HOMER PRO (2018).

Para escolha do caso ótimo, primeiro utilizou-se a classificação de resultados gerais do sistema, o qual mostra todas as possibilidades calculadas. Com isso, aplicaram-se os seguintes filtros: maior participação das fontes renováveis (eólica e solar) no sistema de geração e o menor NPC, ou seja, o custo líquido atual. Com esses filtros, a maior participação corresponde a 88,2% de fontes renováveis (eólica e solar), contendo três aerogeradores. Comparando o Caso A com o sistema base (rede elétrica da concessionária), obteve-se os resultados da Tabela 17.

Tabela 17 – Métricas econômicas do Caso A: Sistema de geração híbrido *grid/* eólico/ solar na Ilha do Mel – Filtro por classificação geral

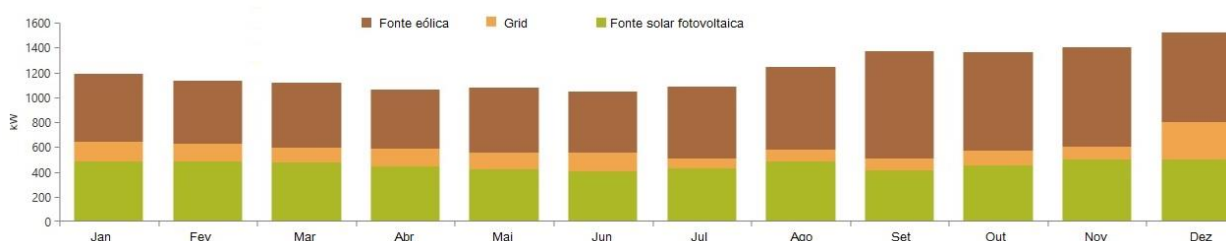
Parâmetro	Valor
Valor Presente (US\$)	- US\$951.119
Valor Anual (\$/ ano)	- US\$158.067
Retorno de Investimento (%)	7%
Taxa Interna de Retorno (%)	8,7%
<i>Payback</i> simples (ano)	8,3
<i>Payback</i> com Desconto (ano)	n/a

Fonte: a autora (2018).

O *payback* com desconto do Caso A não teve resposta para os parâmetros dados, significando que possivelmente extrapolou o tempo de vida do projeto, considerado 10 anos. O custo da venda de energia é de US\$0,0638 dólares por kWh, equivalente a R\$0,20. Os valores negativos no valor presente e no valor anual indicam que o retorno do projeto, em dez anos, é menor que o investimento inicial, neste caso não sendo viável economicamente.

No aspecto elétrico, a complementariedade entre as fontes de geração (Figura 20) apresentou percentuais de 51,3% para fonte eólica, 37,5% de solar fotovoltaica e 11,2% da rede elétrica da concessionária. Analisando isoladamente o resultado de fração de fontes renováveis eólica e solar no sistema de geração, tem-se a ideia de sucesso do projeto neste aspecto, sendo tecnicamente possível, porém, economicamente inviável.

Figura 20 – Complementariedade entre as fontes de geração do Caso A: Sistema de geração híbrido *grid/* eólico/ solar na Ilha do Mel – Filtro por classificação geral



Fonte: a autora (2018).

Outro resultado para este mesmo caso foi através da opção Categorizado do HOMER PRO. Nesta opção o *software* mostra o sistema com o menor custo.

Comparando o Caso A com o caso base (somente rede da concessionária), tem-se os seguintes resultados (Tabela 18).

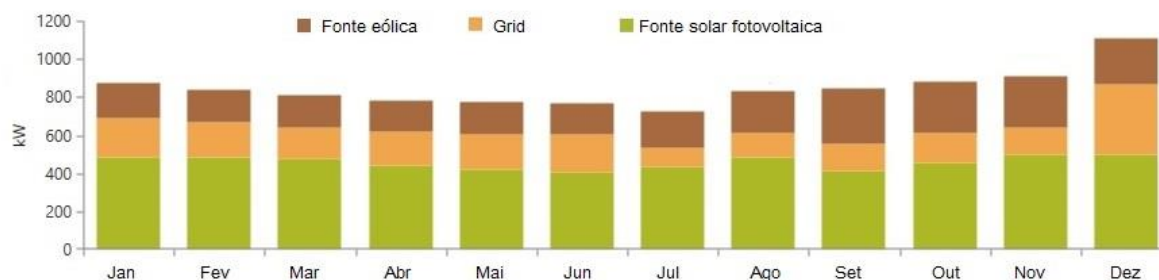
Tabela 18 – Métricas econômicas do Caso A: Sistema de geração híbrido *grid/* eólico/ solar na Ilha do Mel – Filtro categorizado

Parâmetro	Valor
Valor Presente (US\$)	US\$645.529
Valor Anual (US\$/ ano)	US\$107.281
Retorno de Investimento (%)	10,7%
Taxa Interna de Retorno (%)	12,9%
<i>Payback</i> simples (ano)	6,40
<i>Payback</i> com Desconto (ano)	9,48

Fonte: a autora (2018).

Neste segundo filtro de resultados aplicado no Caso A, obteve-se valores positivos para o valor presente e valor anual, indicando que o projeto paga o investimento inicial, que é da ordem de US\$5,12 milhões de dólares, dentro de 10 anos. O custo de venda de energia é de US\$0,0564 dólares, em torno de R\$0,18 por kWh. A contribuição de geração renovável (Figura 21) é de 54% da fonte solar, 24,7% da geração eólica e 21,3% da concessionária.

Figura 21 – Complementariedade entre as fontes de geração do Caso A: Sistema de geração híbrido *grid/* eólico/ solar na Ilha do Mel – Filtro categorizado



Fonte: a autora (2018).

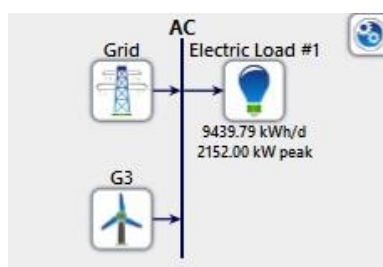
Comparando as duas situações, o melhor caso, evidentemente, é através do filtro categorizado, o qual será utilizado para a comparação final entre os três casos.



#### 4.2 Caso B – Sistema de geração híbrido *grid*/ eólico

O segundo caso simulado (Figura 22) considera somente a concessionária e a fonte de geração eólica. Os critérios para a melhor situação foi a maior participação da fonte eólica no sistema e, em seguida, o menor NPC, utilizando o filtro por classificação geral.

Figura 22 – Topologia do sistema de geração híbrido *grid*/ eólico



Fonte: HOMER PRO (2018).

Na Tabela 19 constam os valores de comparação do Caso B (modo classificação geral de resultados) com o sistema base (*grid*).

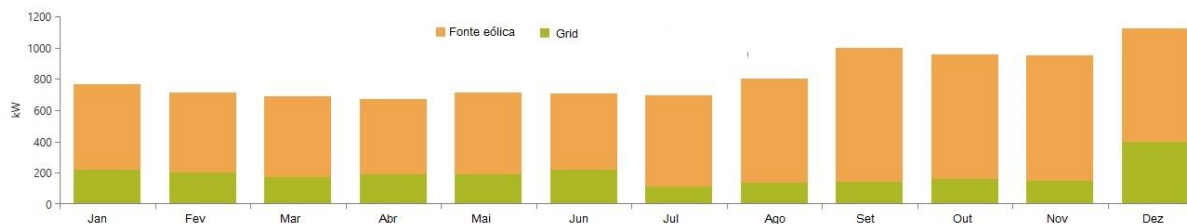
Tabela 19 – Métricas econômicas do Caso B: Sistema de geração híbrido *grid*/ eólico na Ilha do Mel – Filtro por classificação geral

Parâmetro	Valor
Valor Presente (US\$)	- US\$2.256.041
Valor Anual (US\$/ ano)	- US\$374.993
Retorno de Investimento (%)	3,7
Taxa Interna de Retorno (%)	4,7
<i>Payback</i> simples (ano)	9,37
<i>Payback</i> com Desconto (ano)	n/a

Fonte: a autora (2018).

No Caso B o projeto tem um custo inicial de US\$7,73 milhões de dólares, não tendo retorno de investimento dentro de 10 anos. O preço de venda de energia é de US\$0,15 dólares, aproximadamente R\$0,48 centavos. A complementariedade entre as fontes (Figura 23) foi de 76,5% de geração eólica e 23,5% da concessionária.

Figura 23 – Complementariedade entre as fontes de geração do Caso B: Sistema de geração híbrido *grid/* eólico na Ilha do Mel – Filtro por classificação geral



Fonte: a autora (2018).

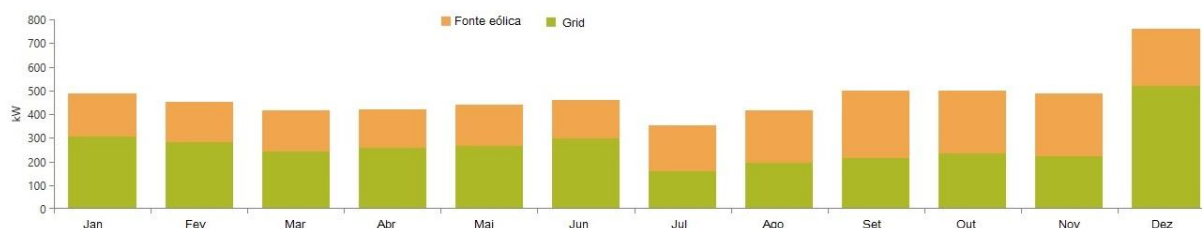
Utilizando o filtro categorizado, o sistema mais viável economicamente para uma geração eólica com o *grid* apresentou as características econômicas dispostas na Tabela 20. O investimento inicial deste caso é de US\$3,88 milhões de dólares, com uma tarifa de US\$0,15 dólares, equivalente a R\$0,48 centavos. Em relação à fração de geração eólica no sistema (Figura 24), o Caso B no filtro categorizado, tem participação de 43,9%, enquanto o *grid* supre, em média, 56,1% ao ano.

Tabela 20 – Métricas econômicas do Caso B: Sistema de geração híbrido *grid/* eólico na Ilha do Mel – Filtro categorizado

Parâmetro	Valor
Valor Presente (US\$)	- US\$752.014
Valor Anual (US\$/ ano)	- US\$124.978
Retorno de Investimento (%)	3,7
Taxa Interna de Retorno (%)	4,7
Payback simples (ano)	9,37
Payback com Desconto (ano)	n/a

Fonte: a autora (2018).

Figura 24 – Complementariedade entre as fontes de geração do Caso B: Sistema de geração híbrido *grid/* eólico na Ilha do Mel – Filtro categorizado



Fonte: a autora (2018).

Nota-se que tanto utilizando a seleção por maior participação de fonte eólica quanto buscando o melhor projeto em questões econômicas, ambos não apresentam retorno de investimento em menos de 10 anos, sendo inviáveis neste cenário analisado.

#### 4.3 Caso C – Sistema de geração híbrido *grid*/ solar

Para a seleção do melhor caso utilizando a classificação geral, levou-se em consideração a maior contribuição de energia solar fotovoltaica no sistema híbrido, sendo 64,8%. Comparando o sistema híbrido *grid*/ solar com o sistema base, somente *grid*, tem-se os seguintes resultados na Tabela 21.

Tabela 21 – Métricas econômicas do Caso C: Sistema de geração híbrido *grid*/ solar na Ilha do Mel – Filtro por classificação geral

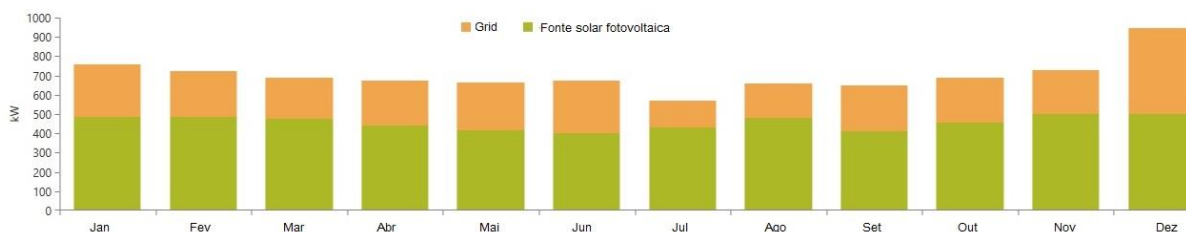
Parâmetro	Valor
Valor Presente (US\$)	US\$1.304.922
Valor Anual (US\$/ ano)	US\$216.866
Retorno de Investimento (%)	16,6
Taxa Interna de Retorno (%)	19,8
<i>Payback</i> simples (ano)	4,60
<i>Payback</i> com Desconto (ano)	6,61

Fonte: a autora (2018).

O Caso C apresenta um *payback* baixo, o que economicamente é um sinal positivo, ou seja, em menos de 7 anos o projeto terá um retorno de investimento. O retorno de investimento, até então, é o mais alto comparado com os demais casos, sendo de quase 17%, indicando a relação entre o capital ganho e o investido.

A complementariedade entre as fontes de geração (*grid* e solar fotovoltaica) apresentam a seguinte característica ao longo de um ano (Figura 25).

Figura 25 – Complementariedade entre as fontes de geração do Caso C: Sistema de geração híbrido *grid/* solar na Ilha do Mel – Filtro por classificação geral



Fonte: a autora (2018).

Nota-se que a fonte solar fotovoltaica consegue suprir mais da metade da demanda de energia durante todo o ano, inclusive nos meses de julho e agosto, os quais apresentam baixa irradiação comparada com o restante do ano.

O custo de energia no Caso C é de US\$0,0497 por kWh, equivalente a R\$0,16 centavos, com um capital inicial de US\$1,83 milhões de dólares.

Utilizando o filtro categorizado (Tabela 22), o sistema de geração *grid/* solar mais viável economicamente tem um custo inicial de US\$2,55 milhões de dólares e tarifa de energia elétrica na grandeza de US\$0,0474 dólares, em torno de R\$0,15 centavos.

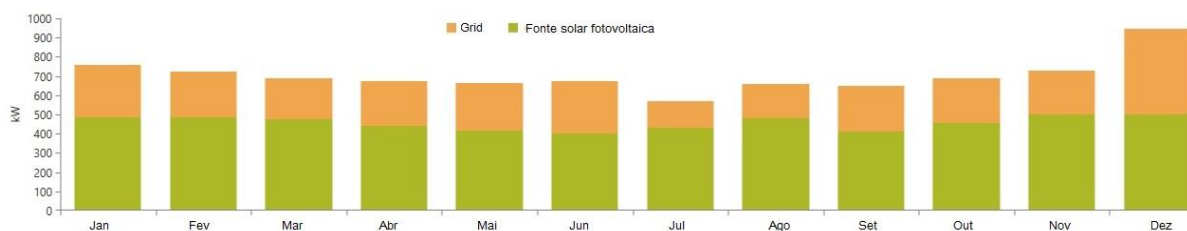
Tabela 22 – Métricas econômicas do Caso C: Sistema de geração híbrido *grid/* solar na Ilha do Mel – Filtro categorizado

Parâmetro	Valor
Valor Presente (US\$)	US\$1.397.542
Valor Anual (US\$/ ano)	US\$232.258
Retorno de Investimento (%)	17,7
Taxa Interna de Retorno (%)	20,8
<i>Payback</i> simples (ano)	4,42
<i>Payback</i> com Desconto (ano)	6,26

Fonte: a autora (2018).

O *payback*, no filtro categorizado, é ainda mais baixo comparando com o filtro anterior. O projeto tem retorno dentro de 6 anos e a complementariedade de geração solar fotovoltaica (Figura 26) é da ordem de 64,6%, suprimindo mais da metade da demanda da Ilha.

Figura 26 – Complementariedade entre as fontes de geração do Caso C: Sistema de geração híbrido grid/ solar na Ilha do Mel – Filtro categorizado



Fonte: a autora (2018).

#### 4.4 Comparação dos resultados

Nos três casos foram filtrados os resultados de duas maneiras: primeiro, considerando somente o aspecto elétrico (qual a maior contribuição do sistema eólico ou solar na geração). Em um segundo momento, o filtro categorizado, o qual lista os melhores casos econômicos de cada topologia. Para a comparação desses cenários, foram selecionados apenas os resultados provenientes da categorização, visto que de fato, mostraram valores mais viáveis economicamente nas três situações (A, B e C).

Na Tabela 23 pode-se comparar os resultados obtidos nos três casos em relação ao custo inicial de investimento, complementariedade, tempo de recuperação de investimento e custo da tarifa com a implementação do projeto.

Tabela 23 – Comparação entre os Casos A, B e C

Caso	Custo inicial (R\$) *	Complementariedade entre as fontes de geração (%)	Payback com desconto (anos)	Custo da tarifa (R\$)
A	16,4	78,7	9,48	0,18
B	12,4	43,9	n/a	0,48
C	8,17	64,6	6,26	0,15

\*valores na ordem de milhões de reais

Fonte: a autora (2018).

Os valores obtidos na otimização são intrínsecos para os parâmetros de entrada do caso de estudo, sendo assim, há muitos resultados possíveis ao variar pequenos detalhes do cenário. Ao total, o HOMER PRO calculou 140.688 soluções

contendo as três fontes de geração, intercalando entre *grid-solar*, *grid-eólica* e *grid-solar-eólica*, não significando que economicamente todas as soluções dadas são eficientes. Portanto, apesar do grande número de respostas e cenários, deve-se selecionar o caso mais adequado com o local analisado.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar da Ilha do Mel já possuir alimentação via cabos, é interessante utilizar a ferramenta HOMER PRO para variar cenários de geração e sugerir possíveis modelos híbridos, podendo estes serem estendidos à outras regiões com características similares.

Para os dados de entrada iniciais, foi possível simular diferentes topologias de sistemas híbridos de geração para a Ilha do Mel. Os resultados poderiam ser mais refinados com obtenção dos dados de velocidade do vento, temperatura e GHI de medições mais recentes na região, porém, para análise do projeto, os valores destes recursos são coerentes com a realidade. Outros parâmetros que melhorariam a veracidade dos resultados da otimização são os valores de emissões (monóxido e dióxido de carbono, hidrocarbonetos, etc.) e as perdas nas turbinas dos aerogeradores, os quais não foram considerados pela ausência de dados confiáveis.

O primeiro caso simulado, Caso A (geração híbrida com fontes eólica, solar e *grid*) apresentou resultados economicamente possíveis, com um projeto pago em menos de dez anos e uma parcela altíssima de participação de fontes eólica e solar fotovoltaica no sistema (78,7%). Tecnicamente, o projeto torna-se viável, visto que seria composto de apenas um aerogerador e, aproximadamente, 9.800 módulos fotovoltaicos. O empecilho da instalação é a dispersão da população no território da Ilha. Desta forma, o aerogerador deve ser localizado na região que possui mais carga concentrada, enquanto os painéis podem ser distribuídos conforme a demanda. Cabe ressaltar que apesar do valor relativamente baixo da velocidade de vento, o sistema visa operar simultaneamente com as outras duas fontes de geração (solar e *grid*), realizando a complementariedade das fontes, não sendo crucial o atendimento integral da demanda pela fonte eólica.

Já o Caso B (geração híbrida com fonte eólica e *grid*) é inviável para todos os cenários simulados. O custo de implantação de aerogeradores para suprir a demanda da Ilha é muito alto e não se paga em menos de dez anos. Neste trabalho aspectos ambientais não foram discutidos, como por exemplo, o impacto de aerogeradores na Ilha do Mel no sentido de prejudicar a fauna existente (principalmente as aves da região). Uma sugestão seria a implantação de aerogeradores *offshore* (localizados no espaço marítimo) para não afetar a

paisagem da Ilha do Mel, porém outras questões teriam que ser analisadas, como o transporte dessa energia.

Por fim, o Caso C (geração híbrida solar fotovoltaica e *grid*), apresentou as melhores condições econômicas, além de uma contribuição da fonte solar relativamente alta (64,6%). O projeto simulado tem o menor *payback* comparado com os demais casos, sendo pago em menos de sete anos, contando, também, com o menor capital de investimento inicial (R\$8,17 milhões de reais). A área ocupada é em torno de 20.000 m<sup>2</sup>. Devido a concentração de carga em locais distintos da Ilha, a construção de uma usina solar de 9.800 módulos não é a melhor solução. Nesta conjunção, a distribuição dos módulos ao longo da Ilha pode ser mais efetiva, ainda mais com as novas resoluções que permitem injetar o excedente de energia no sistema da concessionária em troca de créditos para abater o consumo.

Uma possível continuidade desta pesquisa é a implementação de sistemas de armazenamento, um item que pode ser capaz de suprir toda a demanda da Ilha apenas com sistema solar e baterias. Tal análise pode ser feita no HOMER PRO, visto que este disponibiliza opções de armazenamento.



## REFERÊNCIAS

ANEEL. **Banco de Informações de Geração: Capacidade de Geração do Brasil, 2017.** Disponível em <  
<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>.  
 Acesso em: 12 jun. 2018.

ANEEL. **Banco de Informações de Geração: Capacidade de Geração no Estado, 2017.** Disponível em:  
 <  
<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/ResumoEstadual/CapacidadeEstado.cfm>>.  
 Acesso em: 12 jun. 2018.

ANEEL. **Energia Eólica, 2010.** Disponível em:  
 <[http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia\\_eolica\(3\).pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia_eolica(3).pdf)>. Acesso  
 em: 02 jun. 2018.

ATLAS BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR. **Atlas Brasileiro de Energia Solar. 2.**  
 ed. [s.l.] INPE, 2017. Disponível em: <[http://labren.ccst.inpe.br/atlas\\_2017.html](http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html)>.  
 Acesso em: 02 jun. 2018.

BRASIL. **Decreto n. 7.246, de 28 de julho de 2010.** Regulamenta a Lei n. 12.111,  
 de 9 de dezembro de 2009, que dispõe sobre o serviço de energia elétrica dos  
 Sistemas Isolados, as instalações de transmissão de interligações internacionais no  
 Sistema Interligado Internacional. Disponível em:<  
[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2007-2010/2010/Decreto/D7246.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Decreto/D7246.htm)>.  
 Acesso em: 10 set. 2017.

BROWNSON, Jeffrey R.S., 2013. **Solar Energy Conversion Systems.** 1st ed.

CRESESB. **O Recurso Eólico,** 2008. Disponível em:  
[http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com\\_content&lang=pt&cid=211](http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=211).  
 Acesso em: 02 jun. 2018.

COPEL. **Copel Informações: Copel até debaixo d'água.** Ano XXX - Nº 233. 1998.

EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2024.** Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Decenal-de-Expansao-de-Energia-2024>>. Acesso em: 12 jun. 2018.

**FALTA de energia afetou abastecimento de água na Ilha do Mel.** Paranaguá Saneamento, 12 de setembro de 2017. Disponível em: <<http://www.iguasa.com.br/paranagua-saneamento/servicos-e-informacoes/abastecimento/>, 2017>. Acesso em: 15 out. 2017.

HOMER PRO. **Homer Pro 3.12 User Manual.** Disponível em: <<https://www.homerenergy.com/products/pro/docs/3.12/index.html>>. Acesso em: 12 jun. 2018.

IAP. **Plano de Manejo do Parque Estadual da Ilha do Mel, 2012.** Disponível em: <[http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/Plano\\_de\\_Manejo/PE\\_Ilha\\_do\\_Mel/item2\\_en\\_carte2.pdf](http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/Plano_de_Manejo/PE_Ilha_do_Mel/item2_en_carte2.pdf)>. Acesso em: 23 out. 2017.

LAMBANI, N. E.; BUQUE, C.; CHOWDHURY, S. **Design of a cost effective hybrid renewable energy system for coastal and inland rural community in Africa.** 2017 IEEE PES PowerAfrica. **Anais...IEEE**, jun. 2017 Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7991266/>>. Acesso em: 23 set. 2017

LEONI, P.; CARVALHO, C.; ABREU, L.; BARBOSA, D. **Projeto híbrido eólico-solar: Uma alternativa para aumentar a competitividade e facilitar a penetração de projetos fotovoltaicos de maior porte no país.** Revista O Setor Elétrico, São Paulo, a.12, ed. 134, p. 60-66, mar. 2017.

MAHMUD, N.; HASSAN, A.; RAHMAN, M. S. Modelling and cost analysis of hybrid energy system for St. Martin Island using HOMER. **2013 International Conference on Informatics, Electronics and Vision, ICIEV 2013**, 2013.

MME. **Energia Eólica no Brasil e Mundo.** Origem do Vento Expansão Eólica no Brasil e Mundo Entraves e Soluções Inclusão Social nos Parques. n. 55 61, p. 8–11, 2016. Disponível em: < <http://www.mme.gov.br/documents/10584/3580498/15+-+Energia+E%C3%B3lica+-+Brasil+e+Mundo+-+ano+ref.+2016+%28PDF%29+-+NOVO/f63a15ea-9d2c-4d27-9400-5d7c3fd97b22?version=1.4>>. Acesso em: 02 jun. 2018.

MME. **Energia Solar no Brasil.** Tipos de Aproveitamentos Expansão Mundial Leilões de Geração Centralizada Geração Distribuída ( GD ) Tecnologias de Geração Solar. n. 55 61, 2017. Disponível em: < <http://www.mme.gov.br/documents/10584/3580498/17+-+Energia+Solar+-+Brasil+e+Mundo+-+ano+ref.+2015+%28PDF%29/4b03ff2d-1452-4476-907d-d9301226d26c;jsessionid=41E8065CA95D1FABA7C8B26BB66878C9.srv154>>. Acesso em: 02 jun. 2018.

MONTEIRO, A. L.; NETTO, U. C.; AMALIO DE SOUZA, M. **Utilização do software Homer para análise da viabilidade econômica de um sistema híbrido de geração na Ilha do Mel.** p. 1–10, [s.d.]. Anais do XI Congresso Brasileiro de Planejamento Energético. ISBN: 978-85-65931-03-8.

NREL. **Glossary of Solar Radiation Resource Terms.** Disponível em: <[http://rredc.nrel.gov/solar/glossary/gloss\\_p.html](http://rredc.nrel.gov/solar/glossary/gloss_p.html)>. Acesso em: 02 jun. 2018.

PATEL, Mukund R., 2006. **Wind and solar power systems: design, analysis, and operation.** 2nd ed.

**Paraná tem 1,5 mil unidades geradoras de energia solar.** ABSOLAR, 12 de janeiro de 2018. Disponível em: <<http://www.absolar.org.br/noticia/noticias-externas/parana-tem-15-mil-unidades-geradoras-de-energia-solar-cidades-do-norte-noroeste-e-oeste-tem-o-maior-.html>>. Acesso em: 12 jun. 2018.

RAGHEB, M. **Wind Energy Conversion Theory** , Betz. 2017. Disponível em: <<http://mragheb.com/NPRE%20475%20Wind%20Power%20Systems/Wind%20Energy%20Conversion%20Theory%20Betz%20Equation..pdf>>. Acesso em: 08 out. 2018.

Receita Federal. Subsecretaria de Tributação e Contecioso. **Tabelas de conversão de moeda estrangeira para reais**. 2018. Disponível em: <<http://idg.receita.fazenda.gov.br/orientacao/tributaria/declaracoes-e-demonstrativos/ecf-escrituracao-contabil-fiscal/taxas-de-cambio-incluindo-valor-do-dolar-para-fins-fiscais-irpj-AC-anteriores>>. Acesso em: 17 mai. 2018.

**Resolução Normativa n. 482, de 17 de abril de 2012**. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica. Disponível em <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 02 jun. 2018.

**SEM energia elétrica, 200 doses de vacinas são perdidas no Paraná**. G1 Paraná. Curitiba, 14 de março de 2017. Disponível em: <<http://g1.globo.com/pr/parana/noticia/2017/03/sem-energia-eletrica-200-doses-de-vacinas-sao-perdidas-no-parana.html>>. Acesso em: 10 set. 2017.

SILVA, S. B.; OLIVEIRA, M. A. G. DE; SEVERINO, M. M. **Economic evaluation and optimization of a photovoltaic – fuel cell – batteries hybrid system for use in the Brazilian Amazon**. v. 38, p. 6713–6723, 2010.

TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, E. B.; URBANETZ JR, J.; PEREIRA, S. V.; GONCALVES, A. R. .; LIMA, F. J. L.; COSTA, R. S., ALVES, A. R. **Atlas Solar Paraná** Manual do Usuário. p. 1–14, 2018.

TURISMO PARANÁ. **Guia do Litoral 2017**. Disponível em: <<http://www.turismo.pr.gov.br/arquivos/File/GUIADOLITORAL2017.pdf>>. Acesso em 23 out. 2017.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. 1ª ed. Editora Érica, São Paulo, 2012.

WAN, C. et al. **Photovoltaic and Solar Power Forecasting for Smart Grid Energy Management**. v. 1, n. 4, p. 38–46, 2015.

XUESHU CAO; LAPTHORN, A.; PEIMANKAR, A. **An isolated hybrid renewable energy system: Ha'apai island group in the Kingdom of Tonga**. The 2nd IEEE Conference on Power Engineering and Renewable Energy (ICPERE) 2014. **Anais...IEEE**, dez. 2014. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7067240/>>. Acesso em: 23 set. 2017