UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

WÊNIO FHARÁ ALENCAR BORGES

UMA ANÁLISE DO POTENCIAL EÓLICO E SOLAR EM DUAS REGIÕES DISTINTAS: Estudo de caso para Gravatá-PE e Osório-RS

RECIFE

2018

WÊNIO FHARÁ ALENCAR BORGES

UMA ANÁLISE DO POTENCIAL EÓLICO E SOLAR EM DUAS REGIÕES DISTINTAS: Estudo de caso para Gravatá-PE e Osório-RS

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: **Processos e Sistemas Térmicos**

Orientador**: Prof. Dr. Alex Maurício Araújo**

RECIFE

2018

Catalogação na fonte
Bibliotecária: Rosineide Mesquita Gonçalves Luz / CRB4-1361 (BCTG)

B732a Borges, Wênio Fhará Alencar.
Uma análise do potencial eólico e solar em duas regiões distintas: estudo de caso para Gravatá-PE e Osório-RS / Wênio Fhará Alencar Borges. – 2018.
103f., il., figs., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Alex Maurício Araújo.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2018.
Inclui Referências, Apêndices e Anexos.

1. Engenharia Mecânica. 2. Radiação Solar. 3. Potencial Eólico. 4. Parâmetros de Weibull. 5. SHE. 6. Otimização no HOMER. I. Araújo, Alex Maurício (Orientador). II.Título.

621 CDD (22.ed) UFPE/BCTG-2018/207

28 de fevereiro de 2018

"UMA ANÁLISE DO POTENCIAL EÓLICO E SOLAR EM DUAS REGIÕES DISTINTAS: ESTUDO DE CASO PARA GRAVATÁ-PE E OSÓRIO-RS"

WÊNIO FHARÁ ALENCAR BORGES

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PROCESSOS E SISTEMAS TÉRMICOS

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA/CTG/EEP/UFPE

_____

Prof. Dr. ALEX MAURÍCIO ARAÚJO
ORIENTADOR/PRESIDENTE

_____

Prof. Dr. CEZAR HENRIQUE GONZALEZ
COORDENADOR DO PROGRAMA

BANCA EXAMINADORA:

_____

Prof. Dr. ALEX MAURÍCIO ARAÚJO (UFPE)

_____

Prof. Dr. JOÃO PEREIRA DE BRITO FILHO (UFPE)

_____

Profª. Drª. OLGA DE CASTRO VILELA (UFPE)

Este trabalho é dedicado ao grande criador desse universo, Deus. E a minha família.

"*Jamais considere seus estudos como uma obrigação, mas como uma oportunidade invejável para aprender...*"

— Albert Einstein —

AGRADECIMENTOS

Externo os meus profundos agradecimentos:

À Deus por ter me dado saúde, fé, força e determinação. Sempre tudo a ti, primeiramente.

Aos meus pais Carlos Fhará e Maria Borges, meus irmãos Moema Karla, Antônio Jefferson e Leonília e a toda minha família, especialmente minha madrinha, Neomísia Alencar, por acreditarem sempre no meu potencial.

Ao meu orientador, prof. Alex, por ter aceitado essa tarefa árdua de me orientar. Pela força e ajuda em todo o processo.

À todos os meus amigos, especialmente àqueles que estiveram ao meu lado durante os dois anos de mestrado, que fazem parte do laboratório de mecânica dos fluídos e que estiveram todos os momentos presentes, desde as brincadeiras, as idas ao RU e aos lanches da tarde.

Obrigado Oyama Douglas, Eduardo Corte Real, Lucas Yolanda, Guilherme Arruda, Pedro Henrique, Gilberto, Ciro, Augusto Coutinho e Cândido Requião. Agradeço também a Sthefanny Rodrigues, Guilherme Laonth, Igor Sousa e Diego Lopes, meus *housemates*.

Agradeço especialmente à Maria Eduarda Rabelo, pois tudo isso só foi possível devido a sua inestimável ajuda no início.

À banca presente nessa defesa: Prof.ª Dr. Olga Vilela e ao Prof. Dr. João Brito.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal do Ensino Superior) e a UFPE (Universidade Federal de Pernambuco) pelo auxílio financeiro.

E a todos que direta ou indiretamente me influenciaram e me deram forças para continuar na pesquisa.

Meu muito obrigado!

Energy is an eternal delight.

- William Blake -

RESUMO

O potencial energético de um local é de grande importância para o seu desenvolvimento social e econômico. Nesta perspectiva, esta dissertação tem por objetivo analisar o potencial eólico e solar em duas regiões distintas do Brasil: um sítio localizado no município de Gravatá, estado de Pernambuco, e outro no município de Osório, estado do Rio Grande do Sul. Ambos os sítios estão em locais onde o recurso eólico e solar apresentam suas particularidades. Gravatá-PE tem um perfil de radiação solar diferente do perfil apresentado por Osório-RS. Em relação ao recurso eólico, ambos os sítios estão sob influência de regimes de ventos diferentes: Gravatá-PE, ventos alísios, e Osório-RS, ventos de oeste. A metodologia utilizada neste trabalho consiste de uma busca de dados de coeficientes utilizados na determinação da radiação solar, no cálculo da radiação para cada um dos sítios, na determinação dos parâmetros de forma, *k*, e de escala, *c*, da distribuição de probabilidade de Weibull, e da aplicação em estudo de caso de sistemas híbridos de energia (SHE) usando o programa HOMER, visando determinar a densidade de potência de cada local e a capacidade de geração de eletricidade. Na determinação da radiação solar foi utilizado a equação de *Ångström-Prescott*. Os parâmetros de Weibull foram determinados utilizando-se de nove diferentes métodos e ordenados de acordo com a análise estatística. Foram utilizados dados de vento a 50 m de altura, obtidos por meio do programa *Windographer*®, do projeto MERRA-2. Os resultados para o recurso solar, apesar de algumas inconsistências, estão próximos daqueles obtidos das bases de dados para Gravatá-PE e Osório-RS. Quanto ao recurso eólico, os parâmetros de Weibull encontrados para ambos os sítios estão condizentes com a literatura. A densidade de potência média encontrada para Gravatá-PE é de 153,97 W/m^2 e para o sítio de Osório-RS é de 154,64 W/m^2. Portanto, ambos os sítios apresentam bom potencial de geração eólica. A partir do estudo de caso, pôde-se concluir ainda que Gravatá-PE assim com Osório-RS possuem um bom potencial para geração de eletricidade a partir de fontes renováveis, especificamente pela fonte eólica. Entretanto, os custos de projeto associados ao segundo sítio são maiores.

Palavras-chave: Radiação solar. Potencial eólico. Parâmetros de Weibull. SHE. Otimização no HOMER.

ABSTRACT

Energy potential of a place is of great importance for its social and economic development. In this perspective, this master's thesis aims to analyze the wind and solar potential in two distinct regions of Brazil: a site located in Gravatá's city, state of Pernambuco, and another in Osório's city, state of Rio Grande do Sul. Both sites are in places where the wind and solar resources have their particularities. Gravatá-PE has a profile of solar radiation different from the profile presented by Osório_RS. In relation to the wind resource, both sites are influenced by different wind regimes: Gravatá-PE, trade winds, e Osório-RS, westerlies winds. The methodology used in this work consists of a search for coefficient data used in the determination of solar radiation, in the calculation of the radiation for each of the sites, in the determination of the parameters of form, *k*, and scale, *c*, of the Weibull probability distribution, and the application in a case study of hybrid energy systems (HES) using HOMER program, in order to determine the power density of each site and the electricity generation capacity. In the determination of solar radiation, the *Ångström-Prescott* equation was used. The Weibull parameters were determined using nine different methods and ordered according to the statistical analysis. Wind data of the MERRA-2 project at 50 m height were obtained using the *Windographer*® program. The results for the solar resource, despite some inconsistencies, are close to what is obtained in the databases for Gravatá-PE and Osório-RS. About the wind resource, the Weibull parameters found for both sites are consistent with the literature. The mean power density found for Gravatá-PE is 153.97 W/m^2 and for the Osório-RS site is 154.64W/m^2. Therefore, both sites present great potential for wind generation. From the case study, it can be concluded that Gravatá-PE and Osório-RS have a good potential for generating electricity from renewable sources, specifically from wind source. However, the project's costs associated with the second case are more expensive.

Keywords: Solar radiation. Wind potential. Weibull parameters. HES. HOMER optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Radiação solar (adaptada). 28
Figura 2 – Variação da radiação extraterrestre durante o ano. 31
Figura 3 – Circulação de ventos (adaptada). 33
Figura 4 – PDF para c = 2 e k variando de 1 a 5. 36
Figura 5 – Nordeste brasileiro. 43
Figura 6 – Região Sul do Brasil. 45
Figura 7 – Tipos de sistemas solares fotovoltaicos (adaptado). 46
Figura 8 – Sistema solar fotovoltaico autônomo. 47
Figura 9 – Sistema solar fotovoltaico conectado à rede elétrica. 48
Figura 10 – Sistema solar fotovoltaico híbrido (adaptado). 48
Figura 11 – Interface inicial do programa HOMER®. 49
Figura 12 – Estrutura abrangente do procedimento de otimização do HOMER. (Adaptada). 51
Figura 13 – Fluxograma da metodologia. 54
Figura 14 – Localização geográfica dos dois sítios no Brasil: (1) Gravatá-PE, (2) Osório-RS. 56
Figura 15 – PDF da velocidade de vento a 50 m para Gravatá-PE. 64
Figura 16 – PDF da velocidade de vento a 50 m para Osório-RS. 65
Figura 17 – Distribuição de Weibull usando os diferentes métodos para Gravatá-PE. 69
Figura 18 – Distribuição de Weibull usando os diferentes métodos para Osório-RS. 69
Figura 19 – Modelo esquemático do SHE simulado no HOMER. 75

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Evolução global da capacidade solar fotovoltaica total instalada (2000-2016) em GW mostrando o domínio do mercado europeu e o rápido crescimento na América, China e PAP. 18
Gráfico 2 – Participação de energias renováveis na matriz elétrica. 19
Gráfico 3 – Radiação solar global / Gravatá-PE. 60
Gráfico 4 – Radiação solar global / Osório-RS. 60
Gráfico 5 – Radiação solar global / Gravatá-PE e Osório-RS. 62
Gráfico 6 – Erro relativo percentual no cálculo da radiação global. 63
Gráfico 7 – Curva de carga para um dia qualquer da comunidade. 72
Gráfico 8 – Dados médios mensais de radiação solar global e índice de claridade para Gravatá-PE. 73
Gráfico 9 – Dados de velocidade do vento para Gravatá-PE. 74
Gráfico 10 – Dados médios mensais de radiação solar para Osório-RS. 74
Gráfico 11 – Dados de velocidade do vento para Osório-RS. 75
Gráfico 12 – Fluxo de caixa para o sistema híbrido de Gravatá-PE. 79
Gráfico 13 – Produção elétrica média mensal para Gravatá-PE. 80
Gráfico 14 – Fluxo de caixa para sistema híbrido de Osório-RS. 81
Gráfico 15 – Produção elétrica média mensal para Osório-RS. 82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coeficientes da equação de *Ångström-Prescott* para várias cidades no Brasil. 23
Tabela 2 – Dias médios recomendados para os meses (Dia Juliano). 31
Tabela 3 – Diferentes métodos usados para determinar os parâmetros de Weibull. 39
Tabela 4 – Localização geográfica e elevação dos dois sítios. 56
Tabela 5 – Dados necessários para o cálculo da radiação solar para Gravatá-PE. 58
Tabela 6 – Dados necessários para o cálculo da radiação solar para Osório-RS. 58
Tabela 7 – Dados de radiação solar global determinados para Gravatá-PE e Osório-RS. 59
Tabela 8 – Radiação solar global para Gravatá-PE e Osório-RS. 61
Tabela 9 – Estatística descritiva dos dados medidos para os sítios a 50 m. 65
Tabela 10 – Avaliação dos nove métodos para 50m usando análises estatísticas para Gravatá-PE. 66
Tabela 11 – Ranking dos métodos de determinação dos parâmetros para Gravatá-PE. 67
Tabela 12 – Avaliação dos nove métodos para 50 m usando análises estatísticas para Osório-RS. 67
Tabela 13 – Ranking dos métodos de determinação dos parâmetros para Osório-RS. 68
Tabela 14 – Densidade de potência média para Gravatá-PE e Osório-RS. 70
Tabela 15 – Demanda elétrica: 1 casa e a comunidade por 1 dia. 72
Tabela 16 – Dados de entrada dos preços de equipamentos no HOMER. 76
Tabela 17 – Resultado da simulação para Gravatá-PE. 78
Tabela 18 – Resultado da simulação para Osório-RS. 78
Tabela 19 – Custo presente líquido (CPL) para Gravatá-PE. 79
Tabela 20 – Produção de eletricidade por componentes / Gravatá-PE. 80
Tabela 21 – Carga que deve ser suprida para o caso de Gravatá-PE. 80
Tabela 22 – Outros valores para o caso de Gravatá-PE. 80
Tabela 23 – Custo presente líquido (CPL) para Osório-RS. 81
Tabela 24 – Produção de eletricidade por componentes / Osório-RS. 81
Tabela 25 – Carga que deve ser suprida para o caso de Osório-RS. 81
Tabela 26 – Outros valores para o caso de Osório-RS. 82
Tabela 27 – Comparação de geração elétrica. 83

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	Corrente Alternada
BEN	Balanço Energético Nacional
CDF	Função de Distribuição Acumulada
COE	Custo de Energia/Eletricidade
CPL	Custo Presente Líquido
CRESESB	Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito
DC	Corrente Contínua
FPR	Fator de Recuperação de Capital
G10	Gerador Eólico de 10kW
GD	Gerador Diesel
HOMER	*Hybrid Optimization Model for Electric Renewables*
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
MAMV	Método Alternativo da Máxima Verossimilhança
MEJ	Método Empírico de Justus
MEL	Método Empírico de Lysen
MG	Método Gráfico
MM	Método do Momento
MMQ	Método dos Mínimos Quadrados
MMV	Método da Máxima Verossimilhança
MW	Método WAsP
NREL	Laboratório Nacional de Energia Renovável
PDF	Função Densidade de Probabilidade
PDM	Método da Densidade de Potência
PV	Painel Fotovoltaico
SHE	Sistema Híbrido de Energia
SSF	Sistema Solar Fotovoltaico
VAC	Volts de Corrente Alternada
VDC	Volts de Corrente Contínua
VPL	Valor Presente Líquido
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Coeficiente da Equação de *Ångström-Prescott* (-)
b	Coeficiente da Equação de *Ångström-Prescott* (-)
c	Parâmetro de Escala (m/s)
$C_{CPL,total}$	Custo Total Anualizado ($/ano)
H	Radiação Solar Média Mensal em uma Superfície Horizontal (kWh/m^2·d)
H_0	Radiação Extraterrestre Diária Média Mensal (MJ/m^2·d)
i	Taxa de Juros Anual (%)
I_o	Constante Solar (W/m^2)
k	Parâmetro de forma (-)
n	Número de Horas de Brilho Solar Diário Médio Mensal (-)
n_d	Número que caracteriza o Dia Juliano (-)
N	Quantidade Máxima de Horas de Brilho Solar Diário (-)
N^*	Quantidade de Anos do Projeto (Vida Útil) (-)
P	Potência (W)
P/A	Potência por unidade de área ou densidade de potência (W/m^2)
$\overline{P}/A$	Densidade de potência média (W/m^2)
R	Coeficiente de Correlação (-)
R^2	Coeficiente de Determinação (-)
$R_{proj.}$	Vida Útil do Projeto (anos) (-)
$RMSE$	Raiz do Erro Quadrático Médio (-)
V ou v	Velocidade do Vento (m/s)
V_m ou $\overline{v}$	Velocidade Média do Vento (m/s)
Γ	Função Gama (-)
δ	Ângulo de Declinação solar (º)
φ	Ângulo de Latitude (º)
χ^2	Teste *Chi-Square* (-)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 17
1.1 OBJETIVOS 20
1.1.1 Geral 20
1.1.2 Específicos 20
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO 21
2 ESTADO DA TÉCNICA 22
2.1 COEFICIENTES DA EQUAÇÃO DE ÅNGSTRÖM–PRESCOTT 22
2.2 PARÂMETROS DA FUNÇÃO DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL 24
2.3 OTIMIZAÇÃO DE SHE USANDO O SOFTWARE HOMER 26
3 CONCEITOS FUNDAMENTAIS 28
3.1 RADIAÇÃO SOLAR 28
3.1.1 Equação de Ångström-Prescott 29
3.2 RECURSO EÓLICO 32
3.2.1 Regimes de vento 32
3.2.2 Distribuição de Weibull 34
3.2.3 Métodos de determinação dos parâmetros de Weibull 36
3.2.3.1 Estimativa do valor inicial de *k* 40
3.2.4 Potencial de energia eólica 40
3.2.5 Análise estatística dos diferentes métodos 41
3.2.6 Caracterização de vento na região nordeste 42
3.2.7 Caracterização de vento na região sul 44
3.3 TIPOS DE SISTEMAS DE ENERGIA RENOVÁVEL 46
3.3.1 Sistemas autônomos 46
3.3.2 Sistemas conectados à rede elétrica (*grid-connected*) 47
3.3.3 Sistemas híbridos 48
3.4 O *SOFTWARE* HOMER 49
3.5 PROJETO MERRA E O WINDOGRAPHER® 52
4 METODOLOGIA 53
4.1 FLUXOGRAMA 53
5 OBTENÇÃO DE DADOS E ESTUDO DE CASO 56
5.1 INFORMAÇÕES SOBRE GRAVATÁ-PE E OSÓRIO-RS 56

5.2 RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL (*H*) 57
5.3 PARÂMETROS DE WEIBULL 64
5.4 ESTUDO DE CASO 70
5.4.1 Otimização de sistema no programa HOMER 70
5.4.2 Estimativa da demanda elétrica 71
5.4.3 O modelo 73
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES 78
7 CONCLUSÃO 84
7.1 CONTRIBUIÇÕES 86
7.2 TRABALHOS FUTUROS 87
REFERÊNCIAS 88
APÊNDICE - TRABALHOS PUBLICADOS DURANTE O MESTRADO. 97
ANEXO A - MODELOS UTILIZADOS PELO PROGRAMA HOMER 98
ANEXO B - PARQUES EÓLICOS INSTALADOS 102

1 INTRODUÇÃO

As principais nações do mundo buscam constantemente chegar a um consenso para que se reduzam as emissões de gases responsáveis pela elevação da temperatura global. O aquecimento global, por exemplo, que é causado pela intensificação nas emissões de gases do efeito estufa, associado com outros poluentes é uma das principais preocupações da humanidade.

Assim, o desenvolvimento tecnológico combinado com o aumento contínuo de demanda de eletricidade e a tentativa de redução na utilização de combustíveis fósseis tem motivado pesquisadores e ambientalistas a desenvolverem métodos de obtenção de energia limpa a partir de fontes renováveis de energia, a exemplo da eólica, solar, biomassa, marés e ondas, até aqui tidas como alternativas aos combustíveis fósseis (FAZELPOUR, SOLTANI e ROSEN, 2014). As aplicações dessas fontes incluem desde sistemas de geração de eletricidade muito pequenos até sistemas muito grandes, podendo ser isolados, conectados à rede, ou sistemas híbridos.

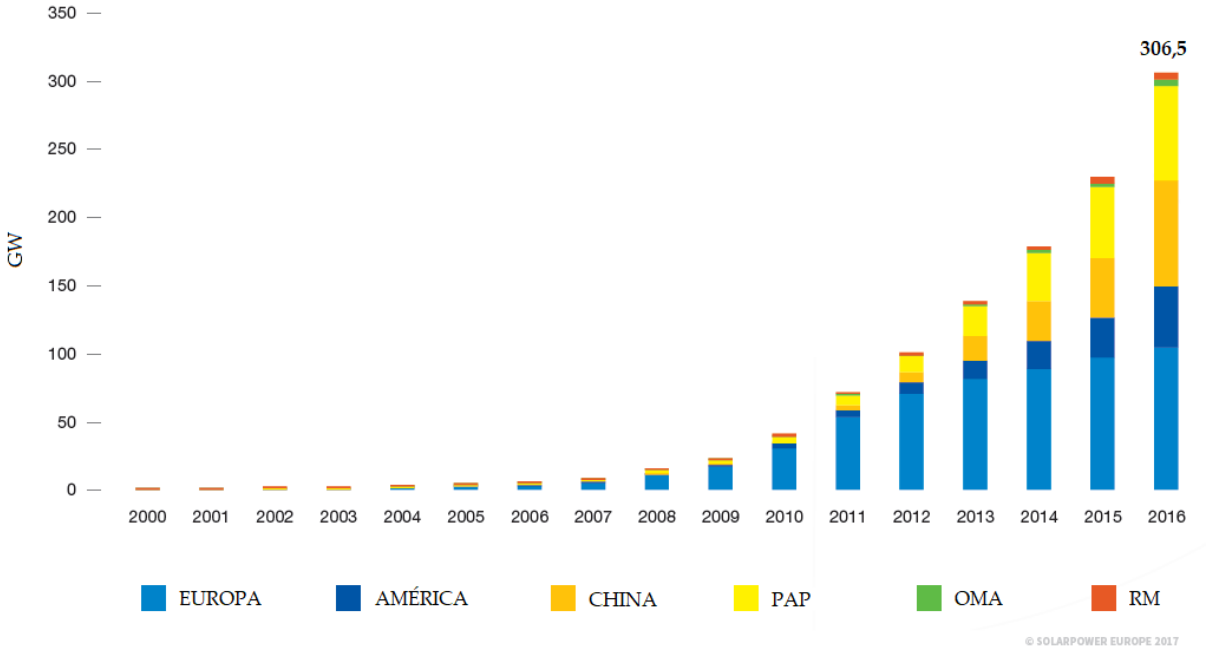
Sistema Híbrido de Energia (SHE) é um sistema de geração de potência que combina duas ou mais fontes distintas de energia (REHMAN *et al.*, 2012). O SHE apresenta maior confiabilidade e menor custo de geração do que aqueles que usam apenas uma fonte de energia (MUSELLI, NOTTON e LOUCHE, 1999; BAGEN e BILLINTON, 2005). Adicionalmente, além de serem econômicos, consumem menos combustíveis fósseis e produzem menos gases do efeito estufa (PERERA *et al.*, 2013; NANDI e GHOSH, 2010; DÍAZ *et al.*, 2010). Dentre as opções de sistemas híbridos, pode-se mencionar: 1) fotovoltaico-eólico; 2) fotovoltaico-diesel; 4) fotovoltaico-eólico-diesel; etc.

Nos Sistemas Solares Fotovoltaicos (SSF), a luz que é recebida diretamente do sol é convertida em energia. O conhecimento do recurso solar tem se tornado bastante atrativo nos últimos anos (RAHIMI *et al.*, 2012). Desse modo, um conhecimento preciso sobre a disponibilidade de recursos solar e eólico é um pré-requisito importante para aplicação de um sistema solar fotovoltaico ou eólico em um determinado local. Isto é devido a intermitência dos recursos tanto solar quanto eólico, uma vez que são dependentes das condições meteorológicas e geográficas (SUEHRCKE, 2000).

A energia solar é a fonte de energia mais abundante na terra. Utilizando-se painéis fotovoltaicos, a energia solar assumiu a terceira posição em termos de capacidade instalada

mundialmente (EPIA, 2014). Já em relação a 2016, essa capacidade instalada cresceu avassaladoramente. Enquanto em 2015 esse valor foi de 209,9 GW, em 2016 a capacidade instalada aumentou em 96,6 GW, um percentual de 46% de um ano para o outro, passando para 306,5 GW. O **gráfico 1** mostra o crescimento global da capacidade solar fotovoltaica total instalada, na Europa, nas Américas (norte, central, sul), na China, nos países da Ásia e Pacífico (PAP), nos países do Oriente Médio e África (OMA), e no restante do Mundo (RM).

Gráfico 1 – Evolução global da capacidade solar fotovoltaica total instalada (2000-2016) em GW mostrando o domínio do mercado europeu e o rápido crescimento na América, China e PAP.



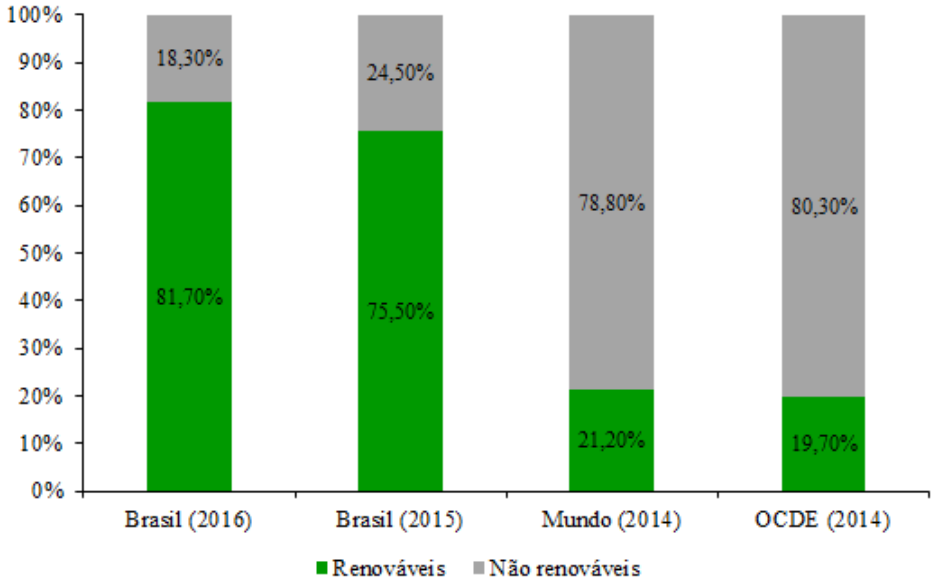
Fonte: (EPIA, 2017)

Em 2016, pela primeira vez a capacidade instalada anual de energia solar ultrapassou a energia eólica. As perspectivas atuais são superar a capacidade de instalação, a nível mundial, em termos de geração solar, em 400 GW em 2018, em 500 GW em 2019, em 600 GW em 2020 e em 700 GW em 2021 (EPIA, 2017). Portanto, pode-se afirmar que é perceptível o crescimento exponencial da energia solar.

No Brasil, segundo dados da Associação Brasileira de Energia Solar (ABSOLAR, 2018), o país teve destaque em termos de capacidade instalada de energia solar fotovoltaica, com uma potência de mais de 1 GW. Em 2016, a geração eólica também foi destaque. De acordo com a Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEÓLICA, 2018), houve um crescimento de 26,5%, em 2017 comparado com 2016, resultando em uma potência instalada de 13 GW. Dessa forma, a sua participação associada com a fonte hídrica contribuiu para uma elevação da

participação de fontes renováveis de energia na matriz elétrica, passando de 75,5% para 81,7%, como mostra o **gráfico 2**.

Gráfico 2 – Participação de energias renováveis na matriz elétrica.



Fonte: (BEN, 2017)

Diante de tais informações, percebe-se que a geração de energia a partir de fontes renováveis tenderá a se expandir ainda mais no Brasil, com a participação das fontes renováveis especialmente a solar e a eólica.

Em termos de recurso solar, há a necessidade de se estudar o potencial solar por regiões, uma vez que o Brasil possui uma imensa extensão territorial (SILVA *et al.*, 2016). Então, nas cinco regiões brasileiras são encontrados dados de radiação solar para diversos locais no país. Esses dados são de domínio público e o INMET (2017) (Instituto Nacional de Meteorologia) é o seu responsável. Embora haja alguns dados inconsistentes, para algumas poucas localidades, em grande parte os seus valores podem ser utilizados com bastante precisão. Em caso de não haver dados para uma certa localização, pode-se resolver essa deficiência de dados utilizando-se modelos para a sua determinação, mas ainda dependendo de dados já medidos em um local próximo.

Um exemplo de dado que pode ser obtido é a radiação solar média mensal incidente em uma superfície horizontal, ou simplesmente radiação global. Em relação à radiação solar, a equação mais utilizada é a de *Ångström-Prescott*. Na utilização dessa equação, dois coeficientes precisam ser obtidos e são característicos da região estudada, além disso, são utilizados dados

obtidos a partir de medições realizadas em pontos de coleta de dados, como os do INMET (2017).

Em termos de potencial eólico, é importante mencionar novamente que o Brasil por possuir uma grande extensão territorial, apresenta diferentes regimes de vento atuando nas cinco regiões do país. Dos três sistemas de ventos que existem no planeta, dois predominam no Brasil: os ventos alísios (*trade winds*) e os ventos de oeste (*westerlies*). No desenvolvimento de sistemas de conversão de energia eólica em energia elétrica ou mecânica, é importante o conhecimento da distribuição de frequência de velocidade do vento (SUCHAROV, DOMINGUES e SILVA, 1990). Como modelo estatístico que melhor representa essa distribuição de velocidades, o mais utilizado é o modelo de distribuição de Weibull.

Dessa forma, este trabalho busca avaliar o potencial solar e eólico no Brasil, especificamente em duas localidades de duas regiões distintas, uma no Nordeste e a outra no Sul do Brasil, objetivando a aplicação dos resultados encontrados em sistemas híbridos de energia solar e eólica, em um estudo de caso. Para isso, será apresentado os resultados encontrados acerca de dados meteorológicos para cada localidade. E por último, será feito uma análise do potencial de geração de eletricidade.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Geral

Este trabalho tem como objetivo geral analisar o potencial eólico e solar de duas localidades distintas no Brasil, uma em Pernambuco, no Nordeste e a outra no Rio Grande do Sul, no Sul.

1.1.2 Específicos

Para alcançar o objetivo deste trabalho, propõe-se os seguintes objetivos específicos:

- Buscar dados sobre os coeficientes *a* e *b* da equação de *Ångström-Prescott*, a fim de se determinar a radiação solar média mensal no Nordeste e Sul do Brasil, focando nos estados de Pernambuco e Rio Grande do Sul;
- Fazer uma comparação entre os dados de radiação solar global calculados e obtidos por base de dados;
- Aplicar os dados de radiação solar obtidos nas simulações computacionais do programa HOMER;
- Fazer um estudo de caracterização do vento em dois regimes diferentes: ventos alísios (*trade winds*) para o Nordeste e ventos de oeste (*westerlies*) para o Sul a fim de se determinar os parâmetros de Weibull;
- Determinar a densidade de potência eólica dos dois locais selecionados no estudo de caso, Gravatá-PE e Osório-RS, analisando a influência da localização e dos diferentes regimes de vento atuantes;
- Identificar a melhor configuração para os sistemas propostos de acordo com os estudos de casos e compará-los.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Com o propósito de apresentar o encadeamento das ideias deste trabalho de forma clara, concisa e didática, a seguinte estruturação foi adotada:

- ✓ Capítulo 1: mostra o contexto no qual o trabalho está inserido, a motivação para o seu desenvolvimento, os principais objetivos a serem alcançados e a estrutura do trabalho;
- ✓ Capítulo 2: apresenta o estado da técnica sobre a avaliação do recurso solar e eólico e otimização de sistemas híbridos de energia;
- ✓ Capítulo 3: apresenta os conceitos fundamentais envolvendo os recursos solar e eólico assim como as informações dos programas computacionais utilizados;
- ✓ Capítulo 4: apresenta a metodologia utilizada no trabalho;
- ✓ Capítulo 5: apresenta os valores dos dados obtidos a partir da análise dos recursos solar e eólico nos dois sítios considerados e o estudo de caso com a modelagem do problema;
- ✓ Capítulo 6: apresenta os resultados e discussões a partir do estudo de caso;
- ✓ Capítulo 7: apresenta as conclusões deste trabalho, principais contribuições e proposta de trabalhos futuros.

2 ESTADO DA TÉCNICA

2.1 COEFICIENTES DA EQUAÇÃO DE ÅNGSTRÖM–PRESCOTT

A radiação solar global na superfície terrestre (*H*) é utilizada na meteorologia, climatologia, estimativas de radiação e energia, processos de tratamento de água, aquecimento e iluminação natural, agricultura, silvicultura e uso de energia renovável, dentre outros (SANTOS *et al.*, 2014). De acordo com De Souza *et al.* (2016), o método mais apropriado para quantificar *H* é usando dados de piranômetros. Entretanto, as medições de *H* não são globalmente operacionais devido ao alto custo de aquisição, manutenção, calibração e complexidades técnicas. (DE SOUZA *et al.*, 2016) apresentam ainda diversas citações em que mencionam métodos empíricos no qual empregam diferentes variáveis meteorológicas frequentemente utilizadas para superar as dificuldades operacionais. Dentre esses métodos, o mais utilizado, devido a sua simplicidade e melhor desempenho estatístico, é o de *Ångström–Prescott*.

A estimativa dos parâmetros *a* e *b* na equação de *Ångström–Prescott* é importante para a determinação da radiação global em diferentes localidades. Uma vez determinados esses valores, pode-se relacioná-los por meio de uma função de 1° grau:

$$\frac{H}{H_0} = a + b\left(\frac{n}{N}\right), \tag{1}$$

em que a razão entre a radiação solar na superfície terrestre (*H*) e a radiação extraterrestre (H_0) é chamada de índice de claridade (*clearness index*) e a razão (*n/N*) é chamada de razão de insolação (*cloudless index*).

Dessa forma, é possível determinar a radiação solar global na superfície terrestre (*H*), uma vez que já se tenha os valores dos parâmetros *a* e *b* que podem ser obtidos da literatura, a radiação extraterrestre, a quantidade máxima de horas de brilho solar (*N*), e o número de horas de brilho solar (*n*), este último sendo obtido a partir de base de dados, sendo portanto valores coletados. A validação da radiação global é feita por meio da comparação da radiação global fornecida pelas bases de dados e os valores encontrados na equação de *Ångström–Prescott*.

Devido a esse fato, é possível encontrar na literatura diversos trabalhos apresentando os valores dos parâmetros da equação de *Ångström–Prescott* visando determinar a radiação solar global na superfície terrestre (*H*). Após a revisão dessas publicações, foi criada a **Tab. 1**, que contém uma síntese dos parâmetros *a* e *b* para as principais cidades do Nordeste e Sul do país, sendo consideradas aquelas com elevados coeficientes de regressão (R^2), propiciando uma maior confiabilidade nos dados.

Tabela 1 – Coeficientes da equação de *Ångström-Prescott* para várias cidades no Brasil.

	Localização		**Coord. Geográficas**			**Coef. de Ångström**			**Ref.**
	Cidade	Estado	Lat. (S)	Long. (O)	Alt. (m)	*a*	*b*	R^2	
Nordeste	Água Branca	AL	9°15’	37°56’	570	0,24	0,48	0,95	[1]
	Pão de Açucar	AL	9°43’	37°26’	19	0,34	0,38	0,95	[1]
	Palm. dos Índios	AL	9°24’	36°37’	296	0,30	0,43	0,95	[1]
	Barreiras	BA	12°10’	45°00’	441	0,31	0,41	0,94	[2]
	Ilhéus	BA	14°80’	39°00’	65	0,28	0,45	0,90	[2]
	Paulo Afonso	BA	9°40’	38°30’	250	0,30	0,38	0,98	[2]
	Salvador	BA	12°58’	38°28’	8	0,23	0,49	0,77	[2]
	Barbalha	CE	7°30’	39°30’	406	0,25	0,45	0,95	[2]
	Cratéus	CE	5°20’	40°70’	277	0,24	0,50	0,91	[2]
	Sobral	CE	3°70’	40°40’	84	0,30	0,37	0,92	[2]
	Fortaleza	CE	3°43’	38°32’	21	0,27	0,36	-	[3]
	Barra do Corda	MA	5°50’	45°30’	153	0,29	0,36	0,97	[2]
	Carolina	MA	7°30’	47°50’	185	0,27	0,35	0,96	[2]
	São Luiz	MA	2°50’	44°30’	36	0,28	0,34	0,95	[2]
	João Pessoa	PB	7°10’	34°90’	7	0,33	0,32	0,82	[2]
	Monteiro	PB	7°90’	37°10’	250	0,33	0,38	0,80	[2]
	Patos	PB	7°00’	37°30’	249	0,25	0,47	0,97	[2]
	Pombal	PB	7°00’	38°10’	200	0,26	0,46	0,82	[2]
	Cabrobó	PE	8°50’	39°30’	325	0,27	0,45	0,86	[2]
	Recife	PE	8°10’	34°90’	18	0,27	0,44	0,94	[2]
	Petrolina	PE	9°23’	40°30’	376	0,29	0,38	0,90	[4]
	Surubim	PE	7°80’	35°80’	418	0,34	0,38	0,90	[2]
	Floriano	PI	6°80’	43°00’	123	0,25	0,45	0,94	[2]
	M. do Cavalo	PI	7°80’	41°90’	242	0,28	0,39	0,84	[2]
	Parnaíba	PI	03°05’	41°46’	46,8	0,32	0,46	0,63	[5]
	Teresina	PI	5°05’	42°48’	87	0,31	0,37	-	[3]
	Cruzeta	RN	6°40’	36°80’	266	0,33	0,35	0,80	[2]
	Propriá	SE	10°20’	36°90’	35	0,31	0,44	0,89	[2]
Sul	Palotina	PR	24º17’	53º50’	333	0,21	0,39	0,84	[6]
	Telêmaco Borba	PR	24°13'	50°32'	885	0,19	0,41	0,95	[7]
	Erechim	RS	27º37’	52º16’	760	0,19	0,47	0,43	[8]
	Osório	RS	29º50’	50º13’	32	0,17	0,50	0,45	[8]
	Rio Grande	RS	32º01’	52º15’	15	0,27	0,32	0,52	[8]
	Santa Maria	RS	29º41'	53°48'	153	0,21	0,43	0,94	[9]

Fonte: (De Souza *et al.*, 2016 [1]; Tiba, 2001 [2]; Alves e Vianello, 1991 [3]; Teixeira, 1999 [4]; Andrade Júnior *et al.*, 2012 [5]; Dallacort *et al.*, 2004 [6]; Jerszurki e Souza, 2013 [7]; Fontana e Oliveira, 1996 [8]; Estefanel *et al.*, 1990 [9])

2.2 PARÂMETROS DA FUNÇÃO DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL

A avaliação do potencial eólico a partir da distribuição de Weibull de dois parâmetros é o modelo mais utilizado para expressar a distribuição de frequência de velocidades de vento e assim calcular a sua potência. Diversos pesquisadores ao redor do mundo a têm utilizado.

Chaurasiya, Ahmed e Warudkar (2018) apresentaram uma tentativa para aumentar a confiança na técnica de sensoriamento remoto visando calcular os parâmetros de Weibull em alturas elevadas para avaliação do recurso eólico. Para isso, utilizaram nove métodos diferentes para se calcular os parâmetros de Weibull. O estudo foi desenvolvido para a cidade de Kayathar, no estado de Tamil Nadu, Índia. Wais (2017) utilizou a distribuição de Weibull para caracterizar sítios em diversas regiões da Polônia; Shoaib *et al.* (2017) para caracterizar Baburband no Paquistão; Kaplan e Temiz (2017) para caracterizar a cidade de Ancara, na Turquia, a partir de dois anos de dados de vento entre 2013 e 2014.

De forma similar, vários estudos foram publicados referentes à distribuição de Weibull para diferentes sítios no Brasil. Entretanto, todos fazem análises para sítios na mesma região. Comparando duas localidades de regiões distintas e sujeitas a regimes diferentes de vento, nenhum trabalho foi encontrado na literatura.

Em relação ao Nordeste Brasileiro, Carneiro *et al.* (2016) compararam a performance de cinco métodos numéricos com o desempenho do método de otimização por enxame de partículas (PSO) para calcular os parâmetros de distribuição de Weibull. Dados de vento foram obtidos para três torres instaladas a 80 m de altura, em três sítios diferentes localizados nos Estados do Piauí (Parnaíba), Ceará (Maracanaú) e Pernambuco (Petrolina). Os dados de vento foram obtidos no período de agosto de 2012 a julho de 2013, fevereiro de 2012 a janeiro de 2013 e maio de 2012 a março de 2013, respectivamente. O melhor desempenho entre todos os sítios foi obtido pelo método PSO, com uma correlação maior que 99% e um erro próximo de zero.

Benevit *et al.* (2016) estudaram a influência do parâmetro de forma de Weibull na combinação ótima de componentes de um sistema híbrido diesel-eólico para diversos locais no estado do Rio Grande do Sul, Brasil, por meio de simulações computacionais usando o software HOMER. O trabalho mostra especificamente a influência dos parâmetros nas combinações de componentes selecionados.

Andrade *et al.* (2014) apresentaram uma nova abordagem para a avaliação de métodos numéricos utilizados no cálculo dos parâmetros de Weibull para a previsão de recursos eólicos. Realizaram ainda uma análise estatística de sete modelos matemáticos para estimar os parâmetros de forma, *k*, e de escala, *c*, da distribuição de Weibull. Foram utilizados dados de velocidade de vento e de potência coletados para duas cidades costeiras do estado do Ceará, Icapuí e Camocim, no Nordeste Brasileiro. Os dados apresentaram resultados precisos quando submetidos aos testes estatísticos.

Grah, Ponciano e Botrel (2014) caracterizaram o potencial eólico para a cidade de Piracicaba - SP. Os dados de vento foram obtidos em uma estação da Universidade de São Paulo, campus de Piracicaba. Utilizou-se a função distribuição de Weibull de dois parâmetros, *k* e *c*. Foi realizada uma análise do perfil de vento variando com a altura para se analisar o ganho de densidade de potência. Entretanto, os resultados mostraram que a região não é propícia para a aplicação de turbinas eólicas com vista à produção de energia.

Lima *et al.* (2011) avaliaram o potencial eólico para o município de Jaguaruana, no litoral cearense. Neste trabalho, os autores fizeram uma avaliação do potencial eólico utilizando dados de velocidade do vento de uma estação da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCENE). Utilizou-se dados de vento para uma altura de 110 m e estimaram os parâmetros da distribuição de Weibull com o objetivo de determinar a potência eólica da região. A região apresentou um potencial eólico satisfatório, com ótimos resultados de densidade de potência.

Lima, Rosendo e Filho (2010) apresentaram um estudo de avaliação de potencial eólico e uma simulação para uma fazenda eólica na cidade de Triunfo - PE, na região Nordeste do Brasil. Os autores utilizaram dados de estações do projeto SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais) para altura de 50 m durante 30 meses. Nesse estudo, a caracterização e avaliação do potencial eólico foi mostrada, tendo obtido como resultados a velocidade média do vento, a densidade de potência média e os parâmetros de forma (*k*) e escala (*c*) da distribuição de Weibull.

2.3 OTIMIZAÇÃO DE SHE USANDO O SOFTWARE HOMER

Nos últimos anos, estudos têm mostrado as vantagens obtidas a partir da otimização de sistemas de energias renováveis. Em várias partes do mundo, o HOMER tem sido o programa de simulação e otimização mais empregado no estudo de sistemas híbridos.

Phurailatpam, Rajpurohit e Wang (2018) desenvolveram o planejamento e otimização de um sistema de microgeração isolado em corrente contínua (DC), usando o HOMER, para áreas rurais e urbanas na Índia. Shahzad *et al.* (2017) propuseram um estudo econômico e a otimização de 15 projetos de sistemas híbridos solar fotovoltaico/biomassa usando o HOMER, para 16 fazendas agrícolas e uma comunidade localizada em uma pequena vila no Paquistão. Ainda usando o HOMER para otimização de sistemas isolados, Bhattarai e Thompson (2016) fizeram a otimização para Brochet, Manitoba, no Canadá; Chmiel e Bhattacharyya (2015) analisaram um sistema para a Ilha de Eigg (Escócia); Kim *et al.* (2014) analisaram e projetaram um sistema híbrido para a ilha de Jeju, na Coreia do Sul; Li *et al.* (2013) otimizaram um sistema na China; Rehman *et al.* (2012) para uma vila na Arábia Saudita, dentre outros.

Segundo Borges Neto *et al.* (2010), os sistemas híbridos de energia foram inicialmente instalados na década de 1990, especialmente nas regiões Norte e Nordeste, e voltados para regiões isoladas como ilhas. No Nordeste foi instalado o primeiro sistema híbrido do país, na ilha de Fernando de Noronha (PE), em 1992, inicialmente com uma turbina eólica de 75 kW associada a geradores diesel já existentes. Em 2008 foi instalado outro sistema, desta vez nas ilhas dos lençóis, no arquipélago de Maiaú, Maranhão, consistindo de uma turbina de 22,5 kW, de um sistema fotovoltaico de 21 kWp e de um gerador diesel de 53 kW. No Norte, um sistema fotovoltaico/diesel entrou em funcionamento em 1996, na vila Campinas, no Amazonas. Em 1997, um sistema eólico/fotovoltaico foi instalado na vila de Joanes, no Pará; dentre outros, todos voltados para áreas isoladas.

Devido à busca por novas fontes que substituíssem os combustíveis fosseis, os trabalhos de otimização no Brasil são, na grande maioria, voltados a sistemas isolados. Por esse motivo, os trabalhos publicados utilizando o HOMER como software de simulação e otimização têm dado ênfase nesse tipo de sistema.

Sepulveda e Martinez (2016) analisaram a implementação de um sistema renovável de energia para uma comunidade isolada na região amazônica do Brasil. Eles investigaram os

custos associados com o sistema e utilizaram o HOMER para otimizar a melhor combinação associada com baixo custo de energia. Os resultados mostraram que é mais vantajoso adicionar mais painéis fotovoltaicos com um gerador diesel e baterias do que turbinas eólicas, reduzindo em 54% as despesas anuais quando esta configuração foi adotada.

Silveira, De Oliveira e Brasil Junior (2015) apresentaram um estudo com diferentes cenários de sistemas híbridos de energias renováveis para o arquipélago de Fernando de Noronha, Brasil. Os cenários foram construídos a partir de medições locais armazenados em bancos de dados, de dados reais dos equipamentos e o do programa de modelagem de sistemas híbridos HOMER. Nas simulações e modelagens, foram considerados a avaliação de diferentes tamanhos e quantidades de componentes e a variação na disponibilidade de recursos naturais (solar e eólico). Como resultado, encontrou-se um sistema híbrido com 67% de participação de energia renovável.

Silva, De Oliveira e Severino (2010) apresentaram as características técnicas e econômicas de um projeto piloto para uma área de proteção ambiental localizada em Tocantins, Brasil. O projeto utiliza energia solar como fonte primária de energia. Assim, os autores realizaram um estudo comparativo usando o HOMER, de tecnologias e potenciais configurações para suprir as necessidades de comunidades isoladas na região amazônica. Como resultado, o trabalho apresenta algumas recomendações a fim de se expandir o uso de renováveis para regiões isoladas do país a partir da experiência dos autores no projeto piloto.

3 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

A radiação solar e os dados de vento, assim como seu tratamento estatístico são necessários para o correto dimensionamento de um sistema de energia (NOGUEIRA *et al.*, 2014). Desta forma, neste capítulo os conceitos fundamentais sobre as fontes solar e eólica de energia renováveis serão apresentados.

3.1 RADIAÇÃO SOLAR

A radiação solar que incide na superfície terrestre é relativamente constante. Entretanto a radiação que propriamente chega na superfície da terra, **Fig. 1**, apresenta variações consideráveis e é principalmente devido a (WILD *et al.*, 2015):

1) efeitos da atmosfera, que inclui a absorção e a dispersão;

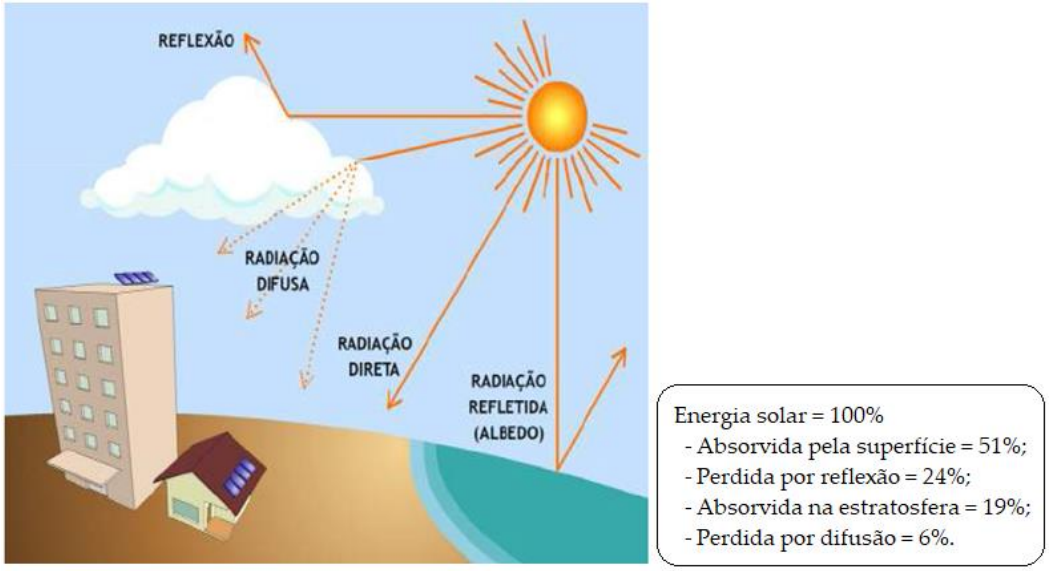
2) variações apresentadas em cada local, como vapor de água, nuvens e poluições;

3) latitude e a longitude;

4) período do ano – estações; e

5) dia do ano.

Figura 1 – Radiação solar (adaptada).



Fonte: (Electronica PT, 2017)

Isso explica a variabilidade da radiação solar em diferentes locais. A associação de efeitos locais, como a presença de nuvens dependendo da estação do ano, somado a duração do dia do ano em uma determinada localidade são algumas das causas para essa variabilidade. As regiões desérticas, por exemplo, são as mais bem dotadas de recurso solar, uma vez que apresentam poucas variações devido à pouca presença de nuvens.

Dados de radiação solar são essenciais para se avaliar o potencial solar de um determinado local. Em problemas de otimização, quando se utiliza programas computacionais, é preciso fornecer informações especificas, como radiação solar média na forma de dados horários ou mensal (BEKELE e TADESSE, 2012).

Em certos lugares, quando existem estações de coleta de dados próximas, como as do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), o trabalho de coleta e análise de informações torna-se mais fácil. Dados de horas de sol e radiação solar média mensal são exemplos de informações que podem ser obtidas por estas estações. Todavia, segundo Duffie e Beckman (2013), para as regiões onde não se possui estações coletoras de dados meteorológicos, os dados de radiação solar podem ser obtidos por meio de equações empíricas, entretanto, necessita-se ainda utilizar dos valores de alguns parâmetros medidos em um local próximo.

Os dados de radiação solar quando estimados usando essas equações são referentes à radiação ao nível do solo (BEKELE e PALM, 2010). Uma forma de validação dos dados estimados usando-se essas equações pode ser feita por meio da comparação com os dados armazenados em bases, como o Meteonorm (Meteonorm Global Meteorological Database) (METEOTEST, 2017) e do website de fontes de energias renováveis administrado pela NASA (NASA Surface Meteorology and Solar Energy) (NASAa, 2017), e em relação a base de dados brasileira, temos o CRESESB (Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito) (CRESESB, 2017).

3.1.1 Equação de Ångström-Prescott

Uma forma de se obter dados de radiação solar média mensal é utilizando a equação de *Ångström-Prescott*, **Eq. 2**.

$$H = H_0 \cdot \left(a + b \frac{n}{N} \right), \qquad (2)$$

em que H é a radiação solar média mensal em uma superfície horizontal (J/m^2/dia), H_0 é a radiação extraterrestre diária média mensal (J/m^2/dia), n é o número de horas de brilho solar diário, N é a quantidade máxima de horas de brilho solar diário, a e b são coeficientes de regressão característicos da região analisada.

Os valores numéricos dos coeficientes *a* e *b* são determinados por meio da utilização da técnica de mínimos quadrados para locais onde existem dados medidos de radiação global e número de horas de brilho solar.

Uma vez que esses parâmetros são estimados para todos os lugares possíveis e a partir de dados meteorológicos disponíveis para uma região, então, de acordo com as similaridades climatológicas e geográficas, os valores dos coeficientes para outras regiões podem ser determinados (SEN, ÖZTOPAL e SAHIN, 2001). Dessa maneira, a equação de *Ångström-Prescott* pode ser utilizada para se conhecer os valores de radiação global, para qualquer outro local, desde que se tenha além dos outros parâmetros contidos na **Eq. 1**, os valores dos coeficientes *a* e *b* para lugares próximos e com similaridades ao local a ser estudado.

A radiação solar global em uma superfície horizontal para a localidade de interesse é um dos parâmetros mais empregados no projeto e previsão do desempenho de um sistema de energia solar (ALMOROX, BENITO e HONTORIA, 2005; HUSSAIN, RAHMAN e RAHMAN, 1999). Assim, uma série de equações, como as mostradas a seguir, são necessárias para se estimar as médias mensais de radiação solar.

Utilizando-se a **Eq. 3**, é possível determinar a radiação extraterrestre diária média mensal (H_0),

$$H_0 = \frac{24 \cdot 3600 \cdot I_0}{\pi} \left(1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{360 n_d}{365} \right) \right) * \left(\cos\phi \cos\delta \operatorname{sen} \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \operatorname{sen}\phi \operatorname{sen}\delta \right), \qquad (3)$$

em que I_0 é a constante solar, padronizado como sendo igual a 1.367 W/m^2, n_d é o número que caracteriza o dia típico de cada mês (dia Juliano), começando pelo dia 1º de janeiro como sendo 1 até o último dia do ano sendo igual a 365, φ é a latitude referente ao local estudado, δ é o ângulo de declinação solar, dado pela **Eq. 4** e ω_s é o ângulo horário do pôr do sol, dado pela **Eq. 5**.

$$\delta = 23,45 \cdot \operatorname{sen}\left(360\frac{284+n_d}{365}\right), \tag{4}$$

$$\omega_s = \cos^{-1}\left(-\tan\phi\tan\delta\right). \tag{5}$$

O número de dias Julianos (n_d), pode ser determinado segundo a metodologia utilizada por Klein (1977) *apud* Duffie e Beckman (2013), conforme a **Tab. 2**.

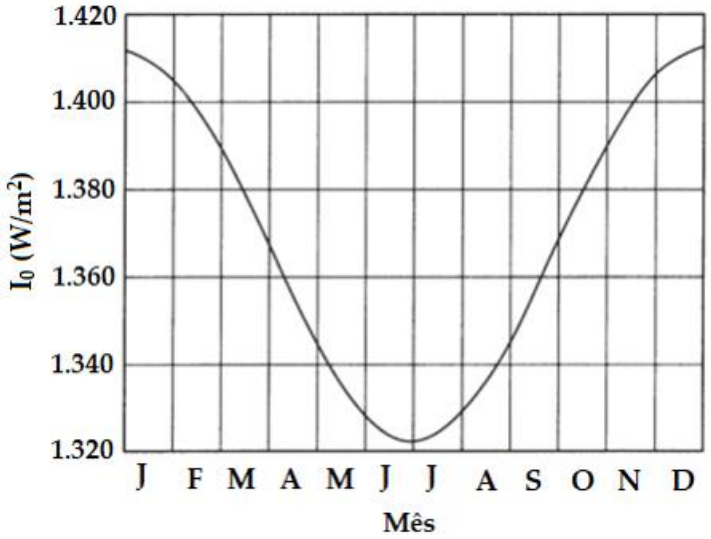
Tabela 2 – Dias médios recomendados para os meses (Dia Juliano).

Mês	n_d para o i-ésimo dia do mês	dia médio do mês	
		dia médio	n_d considerado
Janeiro	i	17	17
Fevereiro	31+i	16	47
Março	59+i	16	75
Abril	90+i	15	105
Maio	120+i	15	135
Junho	151+i	11	162
Julho	181+i	17	198
Agosto	212+i	16	228
Setembro	243+i	15	258
Outubro	273+i	15	288
Novembro	304+i	14	318
Dezembro	334+i	10	344

Fonte: (Duffie e Beckman, 2013)

De acordo com Duffie e Beckman (2013), a variação na distância terra-sol provoca uma variação do fluxo de radiação solar extraterrestre da ordem de ± 3,3%. A **Fig. 2** apresenta a variação da radiação solar extraterrestre efetiva em função do mês do ano.

Figura 2 – Variação da radiação extraterrestre durante o ano.



Fonte: (Duffie e Beckman, 2013)

A última incógnita da equação de *Ångström-Prescott*, *n*, o número de horas de brilho solar diário, que é a insolação, é obtida a partir dos dados obtidos nas estações de coleta de dados meteorológicos. Já a quantidade máxima de horas de brilho solar diária, *N*, é determinada por meio da **Eq. 6**, que é dependente da latitude do local. A razão entre *n/N* é chamada de razão de insolação ou heliofania relativa[1].

$$N = \frac{2}{15}\omega_s \tag{6}$$

Em aplicações práticas, de acordo com Sen, Öztopal e Sahin (2001), uma das dificuldades em se usar a equação de *Ångström-Prescott*, é que geralmente nos valores dos coeficientes, *a* e *b*, são acompanhados dados de dispersões temporais e espaciais.

3.2 RECURSO EÓLICO

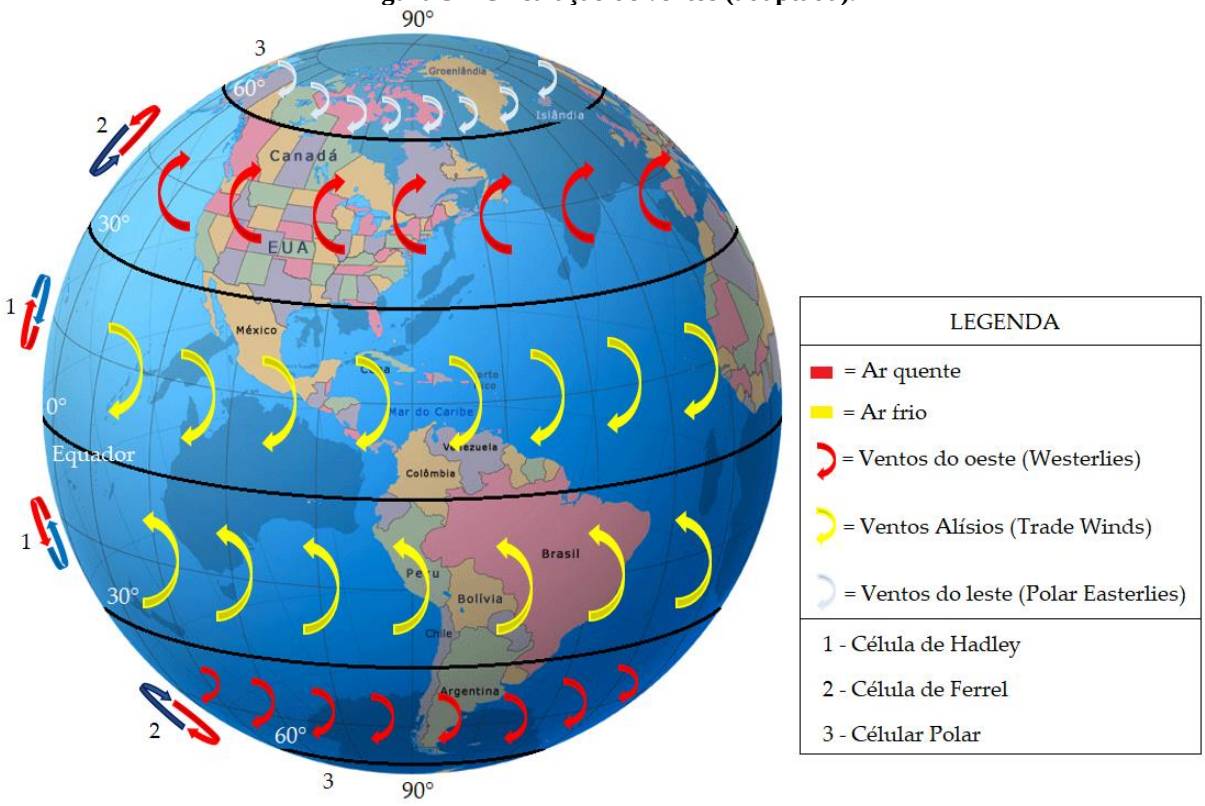
3.2.1 Regimes de vento

Na atmosfera, as camadas de ar se comportam de maneiras distintas. Tanto no hemisfério norte, quanto no hemisfério sul, a massa de ar que parte do equador descende aos 30° de latitude (trópico de câncer ao norte e trópico de capricórnio ao sul) devido ao resfriamento dessa camada de ar. Já a massa de ar que parte dos polos ascende aos 60° de latitude devido ao seu aquecimento.

Devido a esse movimento de ascensão e descensão, são formadas três células em cada hemisfério, sendo a primeira a célula de *Hadley* (na região subtropical), a segunda é a célula de *Ferrell* (nas médias latitudes), e a terceira e última é a célula polar (nos polos). É proveniente desse modelo a explicação de que nos polos há a influência dos centros de alta pressão e nas regiões equatoriais e subpolares, a presença de centros de baixa pressão. A **Fig. 3** ilustra este fenômeno.

[1]Terminologia utilizada na língua espanhola (Ceballos e Rodrigues, 2008).

Figura 3 – Circulação de ventos (adaptada).



Fonte: (Mendes e Gomes, 2007)

A partir das células, são consequentemente gerados na atmosfera 3 sistemas de ventos:

1. **Ventos alísios** (*trade winds*) – São ventos que ocorrem entre 0° (linha do equador) e 30° de latitude, do hemisfério norte para o equador (ventos alísios de nordeste) e do hemisfério sul para o equador (ventos alísios de sudeste), soprando de leste para o oeste;
2. **Ventos de oeste** (*westerlies*) – São ventos que ocorrem entre 30° e 60º de latitude, no hemisfério norte e ao sul, e que sopram do oeste para o leste;
3. **Ventos de leste** – São ventos que ocorrem nas regiões polares, em ambos os hemisférios, e que sopram do leste para o oeste.

São esses sistemas de vento os responsáveis pelo equilíbrio térmico no planeta.

Nas regiões onde há encontros de células (0°, 30°N e 30°S), geralmente não existem ventos, ou se ocorrerem, são ventos muito fracos e irregulares.

- ✓ A **região do equador** (0°), é conhecida como ***doldrum*** ou ***calma equatorial***. Além da falta de ventos nessa região, é ainda caracterizada pela ocorrência de chuvas causadas pela evaporação. Há a condensação do vapor de água que se eleva e se resfria, ocorrendo precipitação pluvial, típica dessa região.

- ✓ **Latitudes de cavalo** é como são conhecidas as regiões próximas aos 30° de latitude, tanto no hemisfério norte quanto no hemisfério sul. É conhecida por esse nome devido à ausência de ventos, o que causava a morte dos cavalos trazidos nas embarcações, que ficavam por meses paradas nessas latitudes, acabavam as rações, e então, morriam.

A *Zona de Convergência Intertropical* (ZCIT) é uma zona de convergência em baixos níveis (divergência em altos níveis) na região de fronteira entre os hemisférios norte e sul, área onde os ventos alísios provenientes dos hemisférios convergem. Assemelha-se a um cinturão de nuvens que circula a faixa equatorial (± 3 a 5º) do globo terrestre com atividades convectivas (MENDES e GOMES, 2007). A ZCIT muda de posição ao longo do ano devido à variações na circulação atmosférica. A mesma sai da posição mais ao norte em agosto e setembro (em torno de 14°N) para uma posição mais ao sul em março e abril (entre 5 e 6°S), implicando em condições distintas sobre o nordeste brasileiro (LIMA *et al.*, 2011).

3.2.2 Distribuição de Weibull

Dentre as cinco regiões do Brasil, três possuem um grande potencial de geração de energia eólica. A maior delas é a região Nordeste, onde o potencial eólico teórico é em torno de 75 GW a 50m de altura, à altura do cubo da turbina. As outras duas regiões são a Sudeste (com 29,7 GW) e a Sul (com 22,8 GW). Esses valores poderiam dobrar, caso fossem consideradas alturas de cubo a 80 e 100m do nível do solo (PES *et al.*, 2017).

A maioria dos estudos relacionados à potência dos ventos se concentram no problema do ajuste de distribuições estatísticas aos dados de velocidade do vento. Dessa forma, foi constatado por meio de estudos já publicados que, para a maioria das ocorrências de vento, a distribuição de Weibull fornece um bom ajuste (SILVA, 2003; BASUMATARY, SREEVALSAN e SASI, 2005; LIMA *et al.*, 2011; USTA, 2016; ARSLAN, BULUT e YAVUZ, 2014).

A distribuição de velocidade de vento é modelada pela função distribuição de Weibull, que é uma função de dois parâmetros, cuja função de distribuição acumulada (CDF), **Eq. 7**, é descrita matematicamente como (LYSEN, 1983):

$$F(V) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^{k}\right], \tag{7}$$

em que V é a velocidade do vento, e k e c são os parâmetros de forma e escala, respectivamente.

O parâmetro de forma, k, determina a forma da curva da distribuição de Weibull. Este revela a regularidade dos ventos, ou seja, quanto maior o valor de k, maior será a regularidade dos ventos em termos de velocidade e mais estreita será a curva de distribuição. Já o parâmetro de escala c, que tem unidade de *m/s*, é o fator característico da distribuição (KUMARAVEL, VARUN e SARFUDEEN, 2014).

A função de distribuição acumulada (CDF) indica a probabilidade de se encontrar um valor de velocidade entre 0 e V. Ao multiplicar esse valor pelo número de horas do período em que os dados foram coletados, tem-se a fração do tempo em que a velocidade permaneceu entre esses dois valores.

A função densidade de probabilidade de Weibull (PDF), **Eq. 8**, é obtida por meio da derivada da função de distribuição acumulada (CDF).

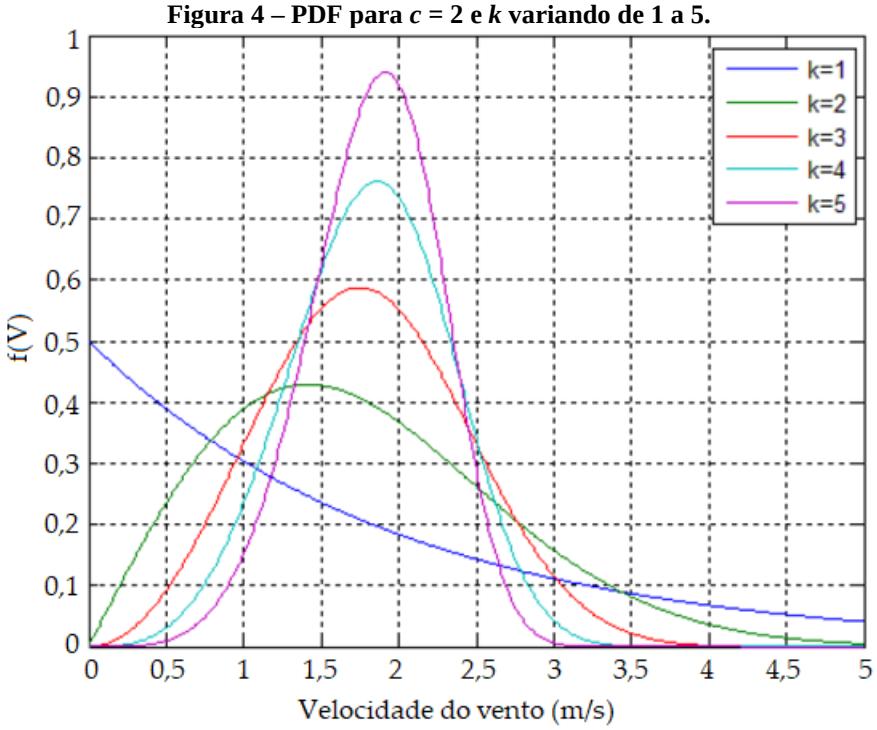
$$f(V) = \left(\frac{k}{c}\right)\left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^{k}\right], \tag{8}$$

em que $k > 0$, $V > 0$ e $c \geq 1$.

A **Fig. 4** mostra curvas da função densidade de probabilidade de Weibull. Nesse caso, o parâmetro de escala c foi mantido constante e se variou o parâmetro de forma k, para se analisar como a distribuição se comporta. À medida que os valores de k aumentam, a propagação da distribuição diminui, o que significa que a velocidade do vento se torna mais estável.

Segundo o estudo de Fernandes (2005), uma porção significativa dos regimes de vento conhecidos, tanto no continente europeu, como na América do Norte, são caracterizados por k situados entre 1,8 e 2,5. Como uma aproximação generalista, em muitos casos é tomado o valor de k igual a 2 para descrever o regime de ventos, ficando livre apenas o parâmetro de escala c. Neste caso, a função de Weibull assume a forma da função densidade de Rayleigh.

Figura 4 – PDF para *c* = 2 e *k* variando de 1 a 5.



Fonte: (Oliveira Filho, 2017)

A velocidade média do vento (V_m), **Eq. 9**, da função de Weibull pode ser obtida utilizando-se a função gama (Γ).

$$V_m = c\Gamma\left(1+\frac{1}{k}\right), \tag{9}$$

Dessa forma, pode-se expressar *F(V)* e *f(V)*, **Eq. 10** e **Eq. 11**, respectivamente, como:

$$F(V) = 1-\exp\left[\Gamma^k\left(1+\frac{1}{k}\right)\left(\frac{V}{V_m}\right)^k\right], \tag{10}$$

$$f(V) = \left(\frac{k}{V}\right)\left(\frac{V}{V_m}\right)^k \cdot \Gamma^k\left(1+\frac{1}{k}\right)\cdot\exp\left[-\Gamma^k\left(1+\frac{1}{k}\right)\left(\frac{V}{V_m}\right)^k\right]. \tag{11}$$

3.2.3 Métodos de determinação dos parâmetros de Weibull

Nesta seção serão apresentados os nove métodos utilizados para se determinar os parâmetros da função distribuição de Weibull. Os métodos são: método gráfico (MG), método dos mínimos quadrados (MMQ), método empírico de Justus (MEJ), método empírico de Lysen (MEL),

método do momento (MM), método da densidade de potência (MDP), método da máxima verossimilhança (MMV), método alternativo da máxima verossimilhança (MAMV), método WAsP (MW).

i. Método Gráfico (MG)

O MG é obtido a partir da função de distribuição acumulada (CDF). Aplicando o logaritmo duas vezes na CDF, **Eq. 7**, a mesma se torna uma equação linear da forma $y=ax+b$. A ordenada $ln[-ln[1-F(v)]]$ está no eixo y e $ln(v)$ no eixo x; a é a inclinação da reta (AKDAG e DINLER, 2009; MOHAMMADI *et al.*, 2016; BILIR *et al.*, 2015). A **Tab. 3** apresenta a equação para o MG e como obter os coeficientes a e b da reta.

ii. Método dos Mínimos Quadrados (MMQ)

O MMQ foi publicado por Carl Friedrich Gauss em 1809 e é comumente aplicado em problemas de engenharia e matemática. O MMQ tem um tratamento semelhante ao MG. A única diferença é porque no MG a linha de tendência é ajustada manualmente e no MMQ é determinada por meio de analises de regressão (CHANG, 2011; AZAD *et al.*, 2015).

iii. Método Empírico de Justus (MEJ)

O MEJ foi introduzido por Justus *et al.* (1977). Este método tem uma solução bem direta, baseada na velocidade média do vento $\bar{v}$ e no desvio padrão σ (MOHAMMADI *et al.*, 2016). Ambos os parâmetros, k e c, são obtidos de acordo com o que está mostrado na **Tab. 3**.

iv. Método Empírico de Lysen (MEL)

O MEL foi sugerido por Lysen em 1983. O cálculo do parâmetro k é igual ao do MEJ. Nesse método, o parâmetro c é calculado usando uma equação diferente como mostrada na **Tab. 3** (MOHAMMADI *et al.*, 2016; LYSEN, 1983).

v. Método do Momento (MM)

Além do MG, Justus e Mikhail (1976) sugeriram o Método do Momento. Este método é também baseado na velocidade média do vento $\bar{v}$ e no desvio padrão σ. Os parâmetros k e c são encontrados por meio da solução iterativa das equações mostradas na **Tab. 3**. O valor inicial de k utilizado no processo iterativo é descrito na subseção 3.2.3.1.

vi. Método da Densidade de Potência (MDP)

O MDP emprega o fator padrão de energia (K_e), que precisa ser primeiro determinado. Este fator depende da velocidade média do vento ao cubo e do cubo da velocidade média. Em seguida, os parâmetros *k* e *c* da função distribuição de Weibull podem ser obtidos como mostrada na **Tab. 3**. Nesse método, o parâmetro de escala *c* é calculado como no MEJ e no MM (ALLOUHI *et al.*, 2017; CHAURASIYA, AHMED e WARUDKAR, 2017).

vii. Método da Máxima Verossimilhança (MMV)

Foram Stevens e Smulders que pela primeira vez empregaram o MMV com uma aplicação a dados de velocidade de vento (MOHAMMADI *et al.*, 2016; WERAPUN, TIRAWANICHAKUL e WAEWSAK, 2015). Este método precisa de extensivas iterações numéricas para se encontrar os parâmetros de forma *k* e de escala *c*. Embora seja um método complexo, os resultados encontrados são muito eficazes. O valor inicial de *k* utilizado no processo iterativo é descrito na subseção 3.2.3.1.

viii. Método Alternativo da Máxima Verossimilhança (MAMV)

O MAMV foi desenvolvido a partir do MMV. Se dados de velocidade de vento estiverem disponíveis na forma da distribuição de Weibull, é possível utilizar o MAMV. Este método também precisa de diversas iterações para se encontrar os parâmetros de Weibull (ARSLAN, BULUT e YAVUZ, 2014; CHAURASIYA, AHMED e WARUDKAR, 2017; ROCHA *et al.*, 2012). O valor inicial de *k* utilizado no processo iterativo é descrito na subseção 3.2.3.1.

ix. Método WAsP (WM)

O WM utiliza um processo iterativo para determinar o parâmetro de forma *k*. A distribuição de Weibull deve se ajustar aos dados de velocidade de vento. Entretanto, este método não busca se ajustar ao histograma de frequência dos dados medidos. Desse modo, este método considera dois aspectos. O primeiro é que a densidade de potência média dos dados ajustados na distribuição de Weibull deve ser a mesma da distribuição observada. O segundo aspecto é que a frequência dos valores acima da velocidade média de vento observada deve corresponder aos dados ajustados da distribuição de Weibull, assim como para a distribuição observada (AUKITINO, KHAN e AHMED, 2017). O valor inicial de *k* utilizado no processo iterativo é descrito na subseção 3.2.3.1.

Tabela 3 – Diferentes métodos usados para determinar os parâmetros de Weibull.

Métodos	Equações Matemáticas
1. MG	$\ln[-\ln[1-F(v)]] = k\ln v - k\ln c$ $y = a\cdot x + b$, onde: $a = k$ $b = -k\cdot\ln c \Rightarrow c = \exp(-b/k)$
2. MMQ	$k = \left[\frac{n\sum_{i=1}^{n}\ln(v_i)\cdot\ln[-\ln(1-F(v))] - \sum_{i=1}^{n}\ln(v_i)\cdot\sum_{i=1}^{n}\ln[-\ln(1-F(v))]}{n\sum_{i=1}^{n}\ln(v_i)^2 - \left[\sum_{i=1}^{n}\ln(v_i)\right]^2}\right]$ $c = \exp\left[\frac{k\sum_{i=1}^{n}\ln(v_i) - \sum_{i=1}^{n}\ln[-\ln(1-F(v))]}{nk}\right]$
3. MEJ	$k = \left(\frac{\sigma}{\overline{v}}\right)^{-1.086}$ e $c = \frac{\overline{v}}{\Gamma\left(1+\frac{1}{k}\right)}$
4. MEL	$k = \left(\frac{\sigma}{\overline{v}}\right)^{-1.086}$ e $c = \overline{v}\left(0.568+\frac{0.433}{k}\right)^{-\frac{1}{k}}$
5. MM	$\overline{v} = c\Gamma\left(1+\frac{1}{k}\right)$ e $\sigma = c\left[\Gamma\left(1+\frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1+\frac{1}{k}\right)\right]^{\frac{1}{2}}$
6. MDP	$k = \left(1+\frac{3.69}{(K_e)^2}\right)$, onde: $K_e = \frac{\overline{v^3}}{\overline{v}^3}$ e $c = \frac{\overline{v}}{\Gamma\left(1+\frac{1}{k}\right)}$
7. MMV	$k = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}v_i^k\ln(v_i)}{\sum_{i=1}^{n}v_i^k} - \frac{\sum_{i=1}^{n}\ln(v_i)}{n}\right]^{-1}$ e $c = \left(\frac{1}{n}\sum_{i=n}^{n}v_i^k\right)^{\frac{1}{k}}$
8. MAMV	$k = \frac{\pi}{\sqrt{6}}\left[\frac{n(n-1)}{n\left(\sum_{i=1}^{n}\ln^2(v_i)\right) - \left(\sum_{i=1}^{n}\ln(v_i)\right)^2}\right]^{\frac{1}{2}}$ e $c = \left(\frac{1}{n}\sum_{i=n}^{n}v_i^k\right)^{\frac{1}{k}}$
9. MW	$\ln[1-F(\overline{v})] = -\Gamma\left(1+\frac{1}{k}\right)^k$ e $c = \sqrt[3]{\frac{\overline{v}^3}{\Gamma\left(1+\frac{3}{k}\right)}}$

3.2.3.1 Estimativa do valor inicial de *k*

A metodologia utilizada para obter o valor inicial do parâmetro de forma *k* foi proposta pelo CIEMAT (2002) conforme citado por Silva (2003). Utilizando-se dos valores de velocidade média, v_m, e desvio padrão, σ, e dos dados de vento, as primeiras estimativas do parâmetro *k* podem ser obtidas pelo cálculo direto das seguintes equações:

a. Ventos de baixa variabilidade $(\sigma/v_m \approx 0,1)$: $k = 1,05 \cdot \sqrt{v_m}$; (12)

b. Ventos de média variabilidade $(\sigma/v_m \approx 0,5)$: $k = 0,94 \cdot \sqrt{v_m}$; (13)

c. Ventos de alta variabilidade $(\sigma/v_m \approx 0,9)$: $k = 0,83 \cdot \sqrt{v_m}$. (14)

O valor do parâmetro *c* pode ser obtido diretamente usando a sua respectiva equação do método utilizado, como mostrado na **Tab. 3**. A partir dos dados de vento, verificou-se que para Gravatá-PE o valor inicial de *k* é igual a 2,33. Já Osório-RS, o valor inicial de *k* é igual a 2,31.

3.2.4 Potencial de energia eólica

A energia eólica é definida como a conversão da energia cinética do vento em energia mecânica, que em seguida, é convertida em energia elétrica.

A potência, *P*, ou energia cinética por unidade de tempo é definida a partir de uma massa de ar que escoa com uma velocidade *v* através de uma área *A*, dada pela seguinte equação (OLIVEIRA FILHO, 2017 *apud* MANWELL, MCGOWAN e ROGERS, 2009):

$$P = \frac{1}{2}\rho A\left(v\right)^3, \quad (15)$$

em que ρ é a massa específica do ar (kg/m^3). A massa específica do ar é assumida como sendo constante e igual a 1,225 kg/m^3.

A potência por unidade de área, *P/A*, conhecida como densidade de potência, é estimada a partir da seguinte equação (CHAURASIYA, AHMED e WARUDKAR, 2017):

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2}\rho\left(v_m^3\right). \tag{16}$$

De acordo com Manwell, McGowan e Rogers (2009), é possível estimar a densidade de potência média de vento quando se tem dados disponíveis de velocidade média anual de vento, da seguinte forma:

$$\frac{\bar{P}}{A} = \frac{1}{2}\rho\left(v_m^3\right)K_e\left(\mathrm{W/m^2}\right), \tag{17}$$

em que K_e é o fator padrão de energia, adimensional, e que é dado por:

$$K_e = \frac{\text{Quantidade total de potência disponível no vento}}{\text{Potência calculada pelo cubo da vel. média}},$$

$$K_e = \frac{1}{N\overline{v}^3}\sum_{i=1}^{N}\left(v_m^3\right) = \frac{\Gamma\left(1+3/k\right)}{\Gamma\left(1+1/k\right)}. \tag{18}$$

em que Γ é a função gama, N é o número de horas do ano (8760h) e k é o fator de forma de Weibull.

A partir da densidade de potência média, é possível fazer uma avaliação do recurso eólico do seguinte modo (MANWELL, MCGOWAN e ROGERS, 2009):

- ✓ Se $\bar{P}/A < 100$ *W/m²*: baixo potencial.
- ✓ Se $\bar{P}/A \approx 400$ *W/m²*: bom potencial.
- ✓ Se $\bar{P}/A > 700$ *W/m²*: ótimo potencial.

3.2.5 Análise estatística dos diferentes métodos

A fim de se determinar a precisão dos parâmetros de Weibull entre os dados experimentais/observados e calculados, foram utilizadas quatro técnicas estatísticas. São elas: Coeficiente de correlação (R), Coeficiente de determinação (R^2), Raiz do erro quadrático médio (RSME), e o Teste de Chi-square (χ^2) (MOHAMMADI *et al.*, 2016; KATINAS *et al.*, 2017).

a) Coeficiente de correlação (R)

$$R = \frac{\sum_{i=n}^{n}(x_i - \overline{x}_i)\cdot(y_i - \overline{y}_i)}{\left[\sum_{i=n}^{n}(x_i - \overline{x}_i)^2 \cdot \sum_{i=n}^{n}(y_i - \overline{y}_i)^2\right]^{\frac{1}{2}}}. \tag{19}$$

b) Coeficiente de determinação (R^2)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=n}^{n}(y_i - x_i)^2}{\sum_{i=n}^{n}(y_i - \bar{y})^2}. \quad (20)$$

c) Raiz do erro quadrático médio (RMSE)

$$RMSE = \left[\frac{1}{n}\sum_{i=n}^{n}(y_i - x_i)^2\right]^{\frac{1}{2}}. \quad (21)$$

d) Teste *Chi-square* (χ^2)

$$\chi^2 = \sum_{i=n}^{n}\left[\frac{(y_i - x_i)^2}{x_i}\right], \quad (22)$$

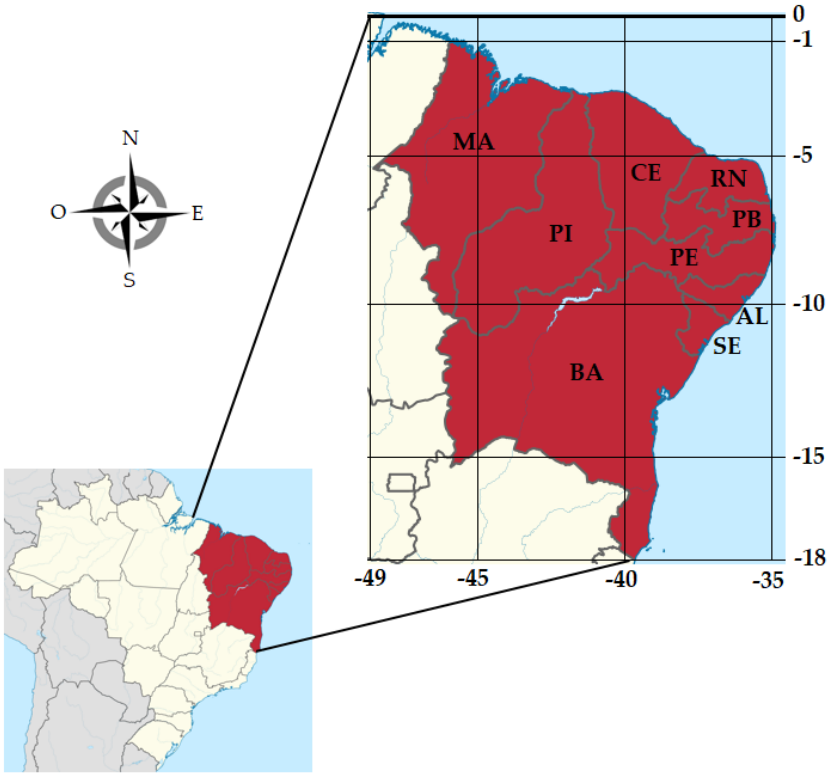
em que n é o número total de intervalos, y_i é a frequência de dados de velocidades de vento observados, x_i é o valor calculado a partir da distribuição de Weibull, e $\bar{y}$ é a média dos valores y_i.

A precisão dos valores encontrados entre os dados de vento experimentais e calculados apresentaram melhores resultados quando os valores de R e R^2 foram maiores. O coeficiente de correlação (R) pode variar de -1 a +1. O coeficiente de determinação pode variar entre 0 e 1, sendo, portanto, os melhores resultados próximos de 1. Em relação ao RMSE e ao χ^2, quanto menores forem seus valores, mais precisos serão os resultados, em relação aos dados experimentais e calculados (AKDAG e DINLER, 2009; MOHAMMADI *et al.*, 2016; OZAY e CELIKTAS, 2016).

3.2.6 Caracterização de vento na região nordeste

A região nordeste do Brasil está situada em grande parte entre as latitudes de 5° e 15° S, e está sob influência dos ventos alísios de sudeste (JUÁREZ *et al.*, 2014). A **Fig. 5** mostra em destaque a região nordeste do Brasil. Os ventos alísios de nordeste e sudeste estão entre os ventos mais constantes na terra.

Figura 5 – Nordeste brasileiro.



Fonte: (Autor, 2017)

Quanto à sazonalidade dos ventos, todo o nordeste apresenta ventos máximos no segundo semestre, no período de inverno e primavera. Os dados de vento de vários locais no nordeste confirmam sua característica de ventos alísios (*trade winds*): têm altas velocidades médias, poucas variações nas direções e pouca turbulência durante todo o ano (DA NÓBREGA e DE AQUINO, 2009).

Os ventos alísios têm periodicidade anual regulada pelos movimentos da *Zona de Convergência Intertropical* (ZCIT). Nos anos normais, a migração da ZCIT acontece a partir do movimento de sua posição mais ao norte para sua posição mais ao sul nos meses de agosto e setembro e nos meses de março e abril, respectivamente. Isto influencia no fortalecimento ou enfraquecimento dos ventos alísios.

Durante o inverno austral, no hemisfério sul, que vai de junho a setembro, o nordeste brasileiro apresenta uma elevada densidade de potência e de valores de saída em turbinas eólicas (SILVA *et al.*, 2016). Essa característica ainda persiste durante a primavera (setembro a dezembro), em uma área menor, nos estados do MA, PI, CE e RN, alcançando potência total de 5 MW. Isto se deve a influência dos ventos alísios de sudeste (*southeast trade winds*) durante essa estação. Ainda segundo Silva *et al.* (2016), a potência total de 1 MW pode ser observada

na região de convergência de alto mar (0°N e 25°W), entre os ventos alísios de nordeste e sudeste (*northeast and southeast trade winds*).

Os ventos alísios de sudeste estão associados com a alta subtropical do Atlântico Sul e do Atlântico Norte (DA NÓBREGA e DE AQUINO, 2009). A região de *doldrums* é onde as mínimas intensidades de vento são observadas. É o que explica as baixas taxas de energia nessa região.

Para a correta caracterização dos regimes de ventos, é de particular importância a qualidade na determinação dos parâmetros *k* e *c* de Weibull. Para Juárez *et al.* (2014), sob a influência de ventos alísios, o parâmetro de forma *k* pode assumir valor igual ou superior a 4. Já para Fernandes (2005), os valores de *k* tendem para 3 a 5.

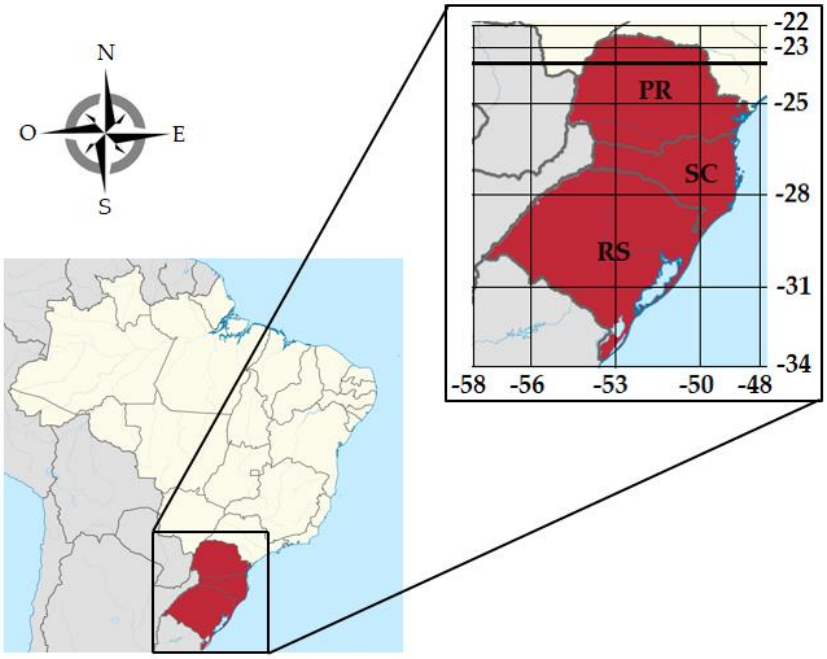
3.2.7 Caracterização de vento na região sul

A região sul do Brasil, mostrada em destaque na **Fig. 6**, sofre influência dos ventos superficiais através do centro de alta pressão do Atlântico Sul. O centro está presente durante todos os meses do ano, mas nos meses de inverno se apresenta com maior força. Os movimentos sazonais deste centro determinam uma forte penetração de baixo nível de vento (CAVALCANTI *et al.*, 2009).

A região sul sofre influência dos ventos de oeste (*westerlies*). Esta região é caracterizada por mudanças sinóticas das condições de vento, onde a alta polar atinge esta área frequentemente quase todo o ano, apresentando maior força no outono e inverno (SILVA *et al.*, 2016). Adicionalmente, é mencionado que a regra geral é que quanto maior a diferença de sistemas atmosféricos ativos na região, mais fortes serão os ventos.

Os ventos de oeste são bem definidos no hemisfério sul devido à falta de massas de ar. As velocidades médias de vento são bastante estáveis e elevadas durante o ano.

Figura 6 – Região Sul do Brasil.



Fonte: (Autor, 2017)

A velocidade do vento tende a aumentar com o aumento da latitude ao sul, levando aos termos descritivos "*Roaring Forties*" (Quarenta Rugidores, referindo-se à latitude 40° S ou Vendavais da Latitude 40º - são fortes ventos de oeste encontrados no hemisfério sul, entre as latitudes 40º e 50° S), "*Furious Fifties*" (Cinquenta Furiosos referindo a latitude de 50° S), e "*Screaming Sixties*" (Gritos dos sessenta, se referindo a latitude de 60° S) (SHPILRAIN, 2009).

Sob a influência de ventos de oeste, Juárez *et al.* (2014) mencionam que o fator de forma é da ordem de 2,5. Para Fernandes (2005), se o regime de vento for observado numa zona montanhosa é provável que se verifique uma maior dispersão dos ventos pelas várias classes de velocidades, traduzindo-se este fenômeno por valores de *k* mais baixos, situados entre 1,2 e 1,8.

De acordo com o Atlas Eólico do Rio Grande do Sul citado por Benevit *et al.* (2016), a maior parte do estado possui parâmetro de forma *k* próximo de 2,9, enquanto na região próxima à lagoa dos Patos, maior laguna da América do Sul, o valor do parâmetro de forma é próximo de 1,9. Para alturas de 50m, a maior parte do estado possui velocidades medias anuais de 6 m/s. Na região próxima à costa, para a mesma altura, pode se encontrar velocidades próximas de 8 m/s.

3.3 TIPOS DE SISTEMAS DE ENERGIA RENOVÁVEL

Os sistemas solares fotovoltaicos de energia renovável são classificados em autônomos, ligados à rede elétrica ou híbridos, **Fig. 7**.

Figura 7 – Tipos de sistemas solares fotovoltaicos (adaptado).

Fonte: (Silva, 2012)

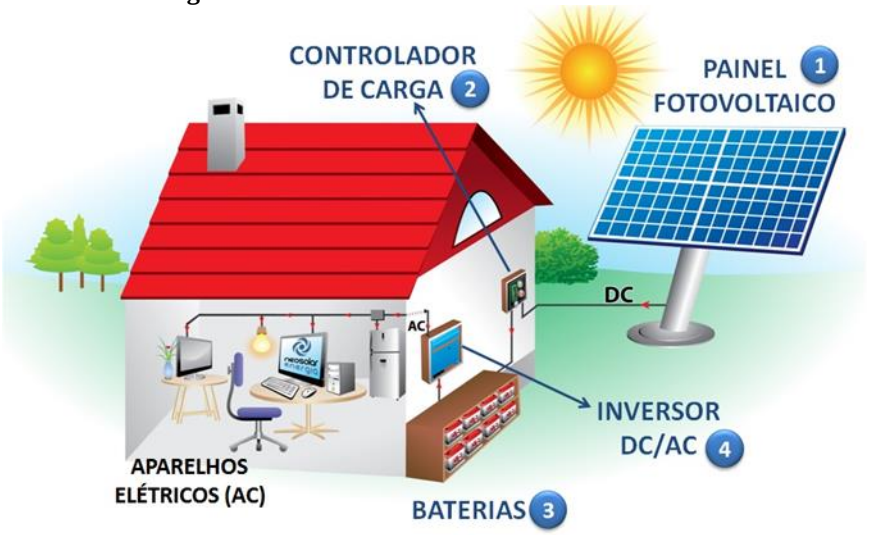
3.3.1 Sistemas autônomos

"Os sistemas autônomos são aqueles que fornecem energia elétrica para o próprio consumidor em locais que não são atendidos pela rede elétrica das concessionárias ou onde o custo de se conectar à rede elétrica é elevado" (WANDERLEY, 2013)

Esse tipo de instalação se aplica também àqueles consumidores que mesmo sendo atendidos pela rede elétrica, têm um sistema fotovoltaico, por exemplo, para alimentar cargas principalmente de iluminação.

A **Fig. 8** mostra um exemplo de sistema autônomo de energia renovável.

Figura 8 – Sistema solar fotovoltaico autônomo.



Fonte: (NEOSOLAR, 2016)

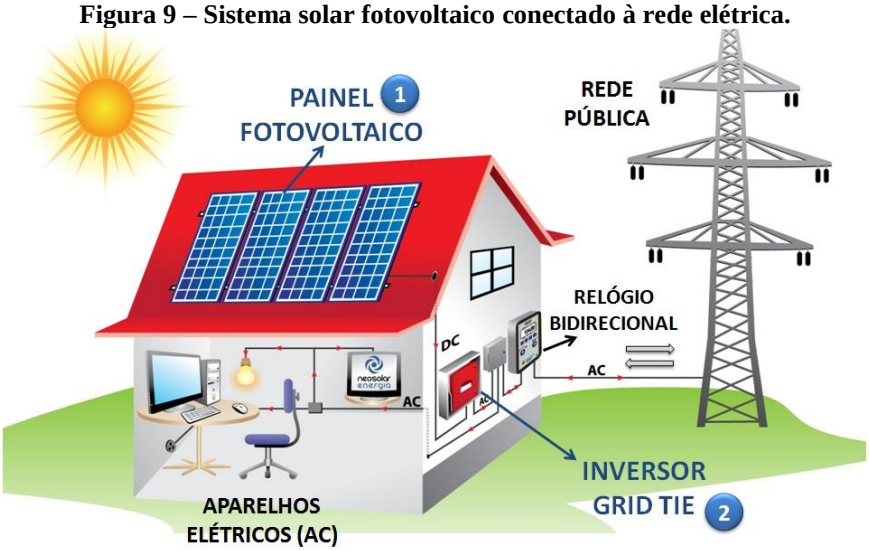
Os equipamentos constituintes desse tipo de sistema solar fotovoltaico são:

- **Painéis solares fotovoltaicos:** fazem o papel de coração, "bombeando" a energia para o sistema. Podem ser um ou mais painéis e são dimensionados de acordo com a energia necessária. São responsáveis por transformar energia solar em eletricidade;
- **Controlador de carga das baterias:** funcionam como válvulas para o sistema. Servem para evitar sobrecargas ou descargas exageradas na bateria, aumentando sua vida útil e desempenho;
- **Baterias:** trabalham como pulmões. Armazenam a energia elétrica para que o sistema possa ser utilizado quando não há sol;
- **Inversor:** cérebro do sistema. É responsável por transformar os 12 VDC das baterias em 110 ou 220 VAC, ou outra tensão desejada. No caso de sistemas conectados, também são responsáveis pela sincronia com a rede elétrica.

3.3.2 Sistemas conectados à rede elétrica (*grid-connected*)

"Os sistemas conectados à rede elétrica, **Fig. 9**, têm como característica o envio da energia gerada, excedente ou total, para a rede elétrica. Esses sistemas podem têm potências maiores do que os sistemas autônomos, desde alguns kW até MW" (WANDERLEY, 2013).

Figura 9 – Sistema solar fotovoltaico conectado à rede elétrica.

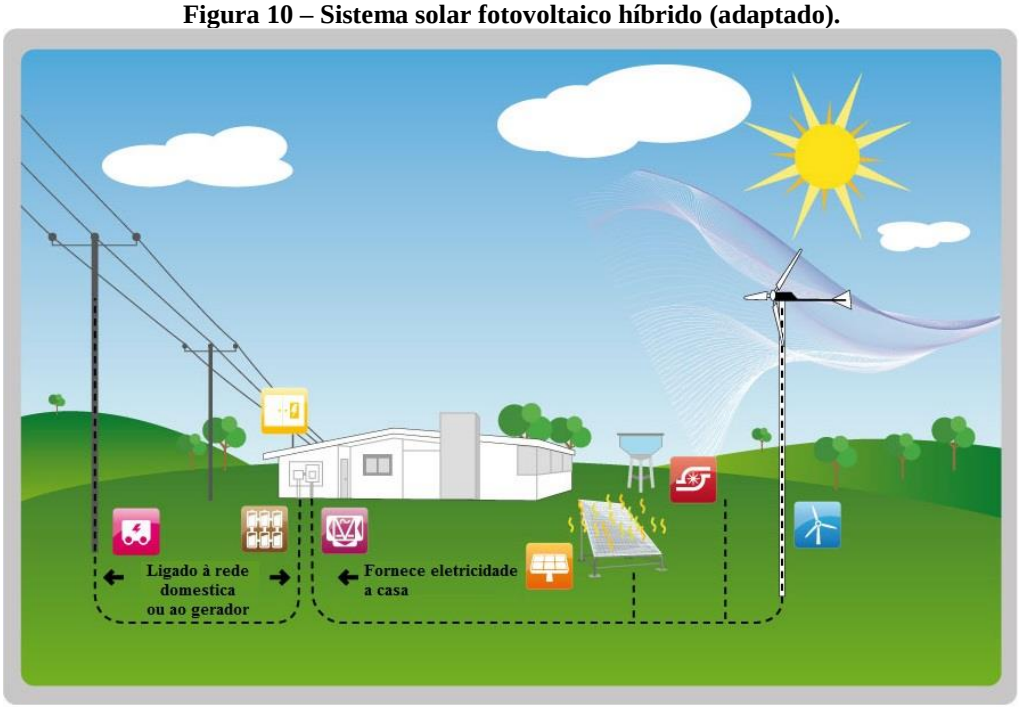


Fonte: (NEOSOLAR, 2016)

3.3.3 Sistemas híbridos

Os sistemas híbridos operam com unidades geradoras de várias fontes de energia, como por exemplo, a fonte solar e a eólica, como mostrado na **Fig. 10**.

Figura 10 – Sistema solar fotovoltaico híbrido (adaptado).



Fonte: (NEOSOLAR, 2016)

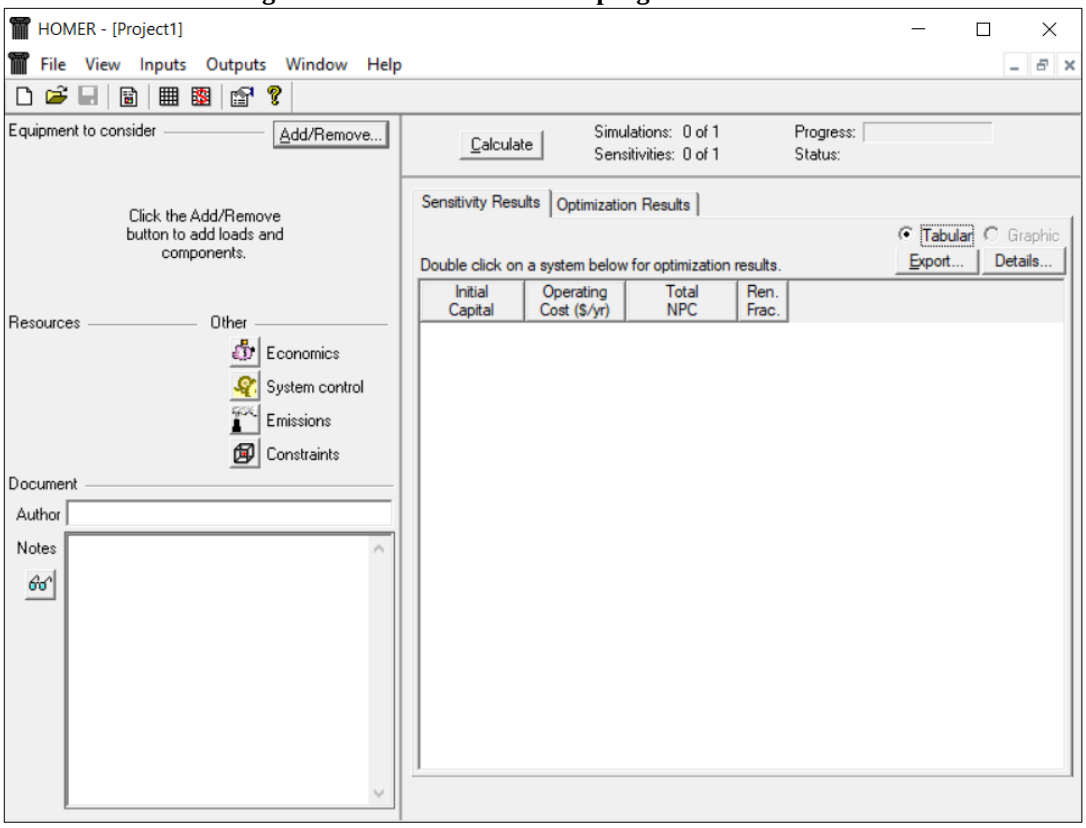
3.4 O *SOFTWARE* HOMER

O "*Hybrid Optimization Model for Electric Renewables - HOMER*", em tradução livre para o português: "Modelo de Otimização de Micro Centrais de Energia" tem sido usado com o objetivo de identificar a configuração mais econômica para um SHE (SANDEEP e VAKULA, 2016). A **Fig. 11** mostra a interface inicial do programa.

O HOMER é uma ferramenta de otimização desenvolvida em 1992 pelo Laboratório Nacional de Energia Renovável (NREL), localizado em Golden, Colorado, EUA. É uma das ferramentas mais utilizadas por pesquisadores em estudos de otimização (BEKELE e PALM, 2010; KHAN e IQDA, 2005).

Este programa de otimização trabalha com diferentes tecnologias (incluindo fotovoltaica, eólica, hidroelétrica, células de combustíveis, e caldeiras) e avalia opções de projetos de sistema de potência tanto desconectados à rede (*off-grid*), quanto conectados à rede (*grid-connected*) para aplicações em sistemas remotos, isolados e com ou sem geração à diesel (MAMAGHANI *et al.*, 2016).

Figura 11 – Interface inicial do programa HOMER®.



Fonte: (Autor, 2017)

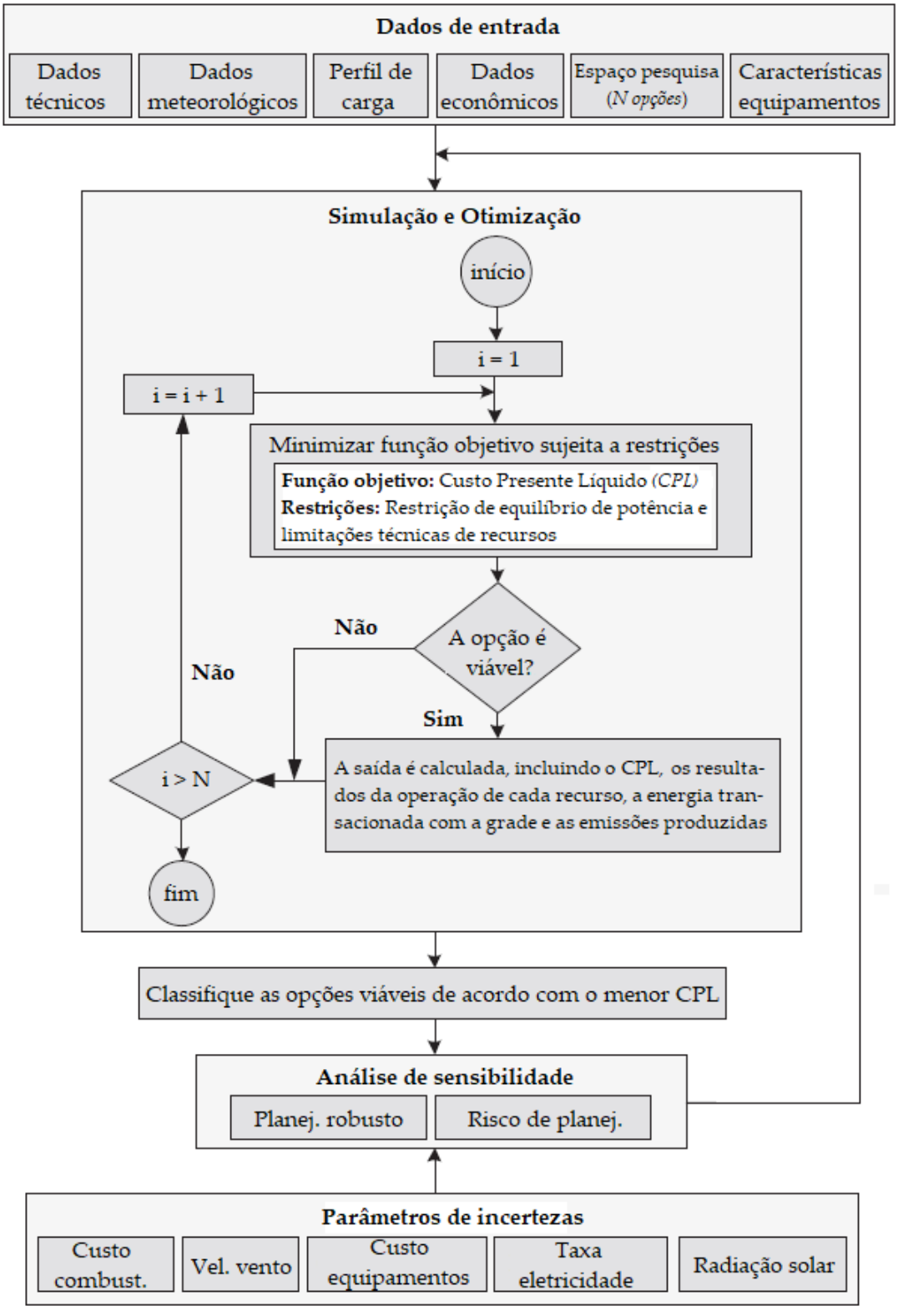
O programa permite ainda simular a operação de diferentes tipos de projetos, com ou sem a utilização de gerador como *backup*. Ele é, portanto, capaz de identificar o sistema com menor custo em função do tamanho da carga, entre outras variáveis (LILIENTHAL e GIVLER, 2005). O HOMER modela o comportamento físico do sistema e seu custo de ciclo de vida, que é o custo total de instalação e operação do sistema ao longo de sua expectativa de vida.

Os modelos utilizados pelo HOMER para o cálculo da potência gerada a partir do gerador fotovoltaico assim como pela turbina eólica e as perdas associadas são apresentados no ANEXO A. O anexo ainda disponibiliza informações sobre o modelo econômico utilizado pelo programa.

No seu manuseio, o programa HOMER aceita como entrada dados de radiação solar na forma de médias mensais ou séries temporais. De acordo com as informações fornecidas pelo programa, series temporais de radiação solar, na maioria das vezes, são dados horários. Entretanto, pode-se fornecer ao programa dados com passo de tempo de até um minuto.

A **Fig. 12** apresenta por meio de um fluxograma o modo como o programa HOMER faz a otimização dos sistemas.

Figura 12 – Estrutura abrangente do procedimento de otimização do HOMER. (Adaptada).



Fonte: (Bahramara, Moghaddam e Haghifam, 2016)

A função objetivo é o custo presente líquido (CPL). O CPL total condensa todos os custos e receitas que ocorrem dentro da vida útil do projeto em um único montante fixo no ano zero, com os fluxos de caixa futuros descontados de volta ao ano zero usando a taxa de desconto.

Os custos podem incluir custos de capital, custos de substituição, custos de operação e manutenção, custos de combustível, o custo de compra de eletricidade da rede e custos diversos, como penalidades resultantes de emissões de poluentes.

Com o CPL, os custos são positivos e os rendimentos são negativos. Isso é o oposto do valor presente líquido (VPL). Como resultado, o CPL difere do VPL somente no sinal.

3.5 PROJETO MERRA E O WINDOGRAPHER®

Informações sobre dados de vento podem ser obtidas no Sistema de Observação da Terra Goddard (GEOS), versão 5.2.0. O Escritório de Modelagem Global e Assimilação (sigla em inglês, GMAO), do Centro de Voo Espacial Goddard foi o responsável pela aquisição de dados no âmbito do projeto MERRA: Análise retrospectiva da Era Moderna para Pesquisa e Aplicações (NASAb, 2017). Além de medidas e análises de dados de vento, outros parâmetros físicos incluídos no projeto MERRA são precipitação, umidade no solo, aridez, temperatura, dentre outros.

O MERRA foi substituído pelo MERRA-2 em 2011 pela sua junção com os dados climáticos da NASA (*The National Aeronautics and Space Administration*). O GMAO usa o sistema de assimilação de dados atmosféricos GEOS-5 para sintetizar várias observações coletadas pelo satélite Era (de 1979 até o presente). A resolução espacial permanece quase a mesma, 1/2 grau de latitude por 2/3 grau de longitude (NASAb, 2017).

Os dados de vento do projeto MERRA-2 podem ser obtidos a partir do *Windographer® data downloader* (WINDOGRAHPER, 2017), que possui suporte para download desses dados. A versão *trial*, que é de livre acesso por um certo período, permite fazer o download gratuitamente dos dados de vento. Esta ferramenta permite baixar dados de longo período para qualquer lugar na superfície terrestre.

Na interface de obtenção dos dados no *Windographer®*, quatro pontos (A, B, C e D) de uma grade são apresentados, após ser fornecida a latitude e a longitude de um local específico. O programa apresenta esses quatros pontos e é possível escolher os dados referentes ao ponto mais próximo da localização.

4 METODOLOGIA

4.1 FLUXOGRAMA

Em um primeiro momento, foi desenvolvida uma busca por dados solares a fim de se encontrar na literatura informações confiáveis nos últimos anos para as principais cidades das regiões Nordeste e Sul do Brasil. Foi escolhido um sítio nessas duas regiões do Brasil, visando-se fazer comparações sobre os recursos solar e eólico de cada um desses locais, com foco na capacidade de geração de eletricidade de cada local, por meio da aplicação em estudo de caso, utilizando-se a ferramenta computacional HOMER. A escolha das cidades de Osório-RS e Gravatá-PE foi devido ao fato de já terem parques eólicos instalados, e, portanto, espera-se que tenham ótimos potenciais para geração de eletricidade.

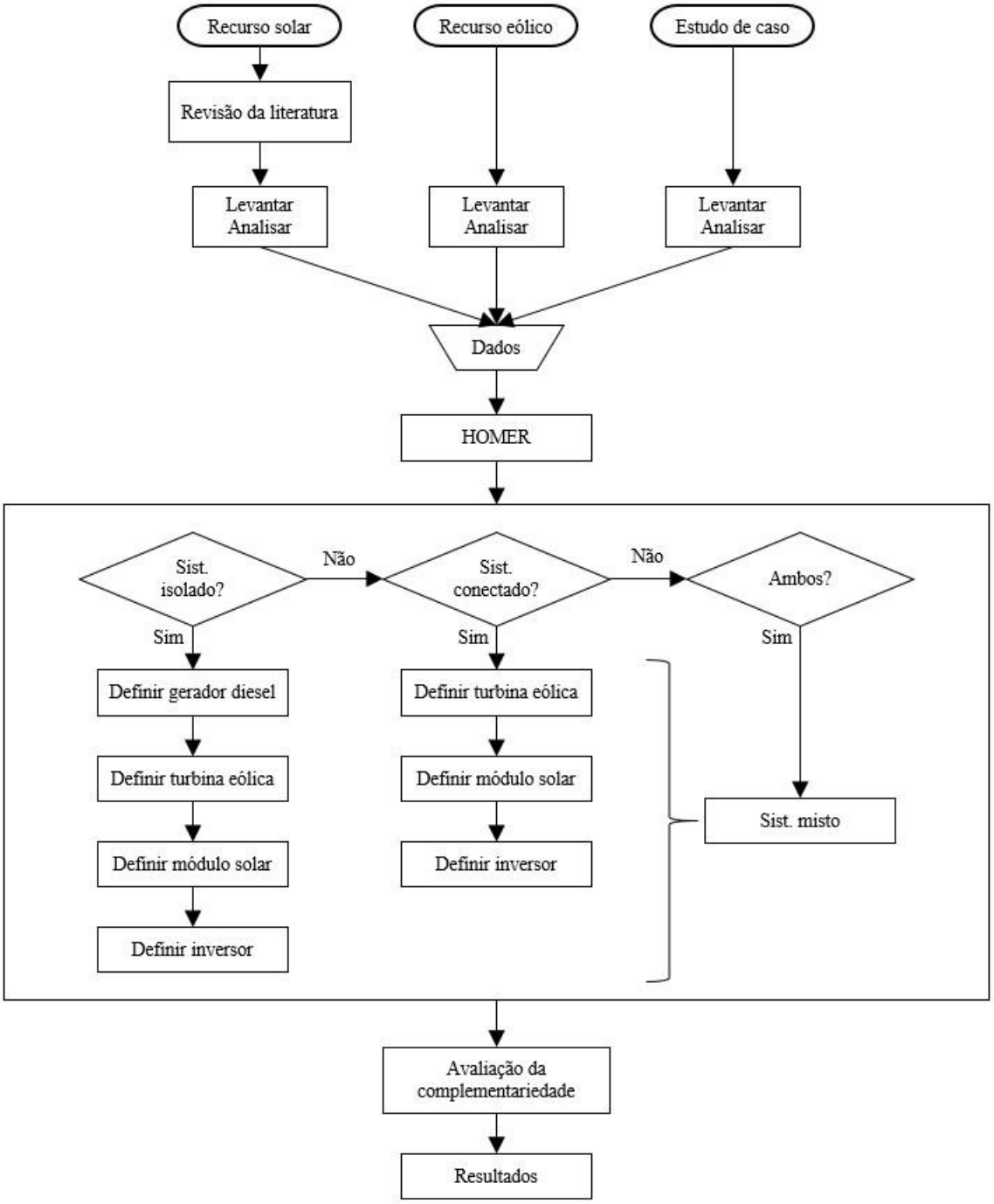
Como meio de se analisar o potencial solar, foi feito um levantamento a partir da bibliografia pesquisada e dos coeficientes da equação de *Ångström-Prescott* disponíveis em artigos publicados em periódicos científicos mais recentes. Com isso, foi possível obter a radiação solar para cada localidade a ser estudada. Os dados referentes ao recurso solar são aplicados no problema de otimização para duas localidades distintas, como mencionado anteriormente.

A análise do potencial eólico se deu em duas regiões com características de vento distintas, Nordeste e Sul do Brasil, e que são influenciadas por dois regimes de circulação de ventos diferentes. É importante salientar que ambas as localidades estão no mesmo país e isso só é possível nesse caso devido à extensão territorial do Brasil. Então, a partir de dados de vento foram obtidos os valores dos parâmetros de escala *c* e de forma *k* de Weibull, aplicados no problema de otimização no HOMER.

Dessa forma, o problema de otimização foi desenvolvido com o objetivo de se comparar a capacidade de geração de energia a partir dos recursos solar e eólico para as duas localidades, verificando-se a influência dos dois regimes de ventos distintos. Para o Nordeste, foi escolhida a cidade de Gravatá, em Pernambuco, e para o Sul, foi a cidade de Osório, no Rio Grande do Sul, a fim de se aplicar a metodologia.

Resumidamente, a metodologia é apresentada aqui na forma de um fluxograma, **Fig. 13.**

Figura 13 – Fluxograma da metodologia.



Fonte: (Autor, 2017)

O fluxograma da **Fig. 13** sintetiza o procedimento metodológico utilizado nesse trabalho. Quanto ao recurso solar, os dados foram obtidos por meio de cálculos, logo após analisados e utilizados como dados de entrada no programa computacional. Em relação aos dados eólicos, foram determinados os valores dos parâmetros de forma *k* e de escala *c*, da função de distribuição de Weibull, assim como a determinação do melhor método que apresentou os melhores resultados. O valor do parâmetro de forma *k* assim como as informações dos dados

de vento no período de 2006 a 2015, foram utilizados como dados de entrada também no programa computacional.

O estudo de caso envolveu a eletrificação de uma comunidade hipotética, isolada, de 100 casas (aproximadamente 4 pessoas por casa), nas duas localidades já mencionadas. As características de ambas as comunidades, em termos de tamanho de residência e equipamentos que possuem foram consideradas iguais a fim de se realizar a comparação. Ainda no estudo de caso, foram levantadas as considerações que serão utilizadas como dados de entrada no programa.

Uma vez inseridos os dados de entrada no programa, o tipo de sistema a ser estudado foi escolhido como sendo o sistema isolado, e logo após foram obtidos os resultados e analisados.

5 OBTENÇÃO DE DADOS E ESTUDO DE CASO

Neste capítulo serão apresentados os dados relativos à radiação solar global e ao recurso eólico para as duas cidades escolhidas, assim como o estudo de caso.

5.1 INFORMAÇÕES SOBRE GRAVATÁ-PE E OSÓRIO-RS

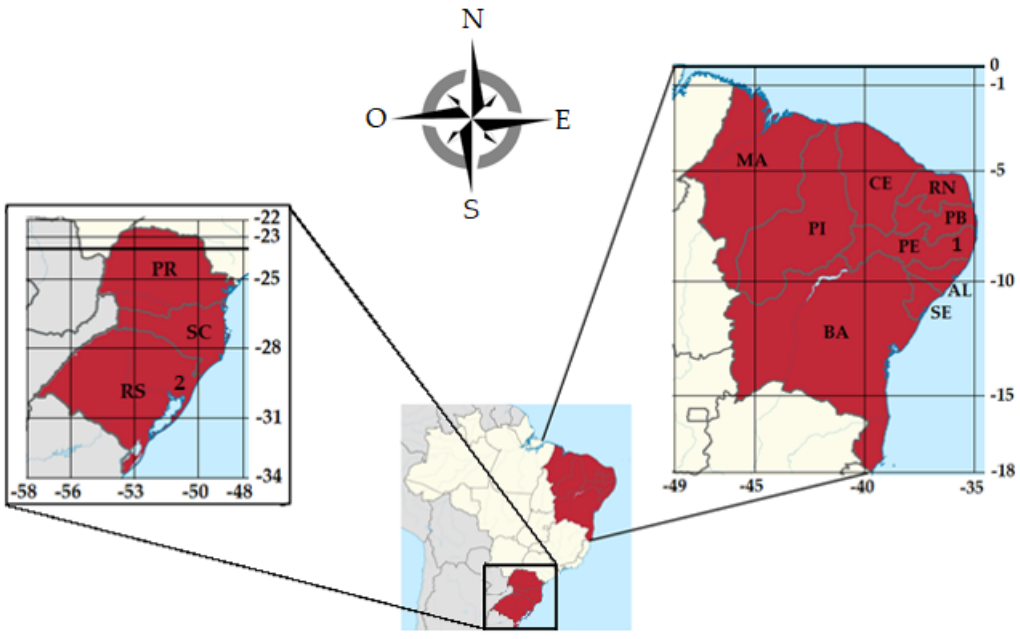
A **Tab. 4** apresenta dados sobre a localização exata de Gravatá-PE e Osório-RS, assim como as suas respectivas altitudes. De forma análoga, a **Fig. 14** mostra onde as duas cidades se encontram no Brasil, uma vez que o mesmo possui grandes dimensões territoriais. Gravatá-PE está representada pelo ponto 1 e Osório-RS pelo ponto 2.

Tabela 4 – Localização geográfica e elevação dos dois sítios.

Localização	Latitude	Longitude	h (m)
1. Gravatá-PE	08°1' S	35°3' E	447
2. Osório-RS	29°5' S	50°2' E	16

Fonte: (Autor, 2017)

Figura 14 – Localização geográfica dos dois sítios no Brasil: (1) Gravatá-PE, (2) Osório-RS.



Fonte: (Autor, 2017)

5.2 RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL (*H*)

Após o levantamento bibliográfico apresentado na revisão de literatura, os valores dos coeficientes da equação de *Ångström-Prescott* necessários para a determinação da radiação solar global *H*, **Eq. 1**, para as duas cidades, Gravatá-PE (08°1' S; 35°3' E) e Osório-RS (29°5' S; 50°2' E), foram encontrados e dispostos na **Tab. 1** (Seção 2.1).

Nesta seção, a radiação solar global é determinada com o objetivo de aplicá-la no estudo de caso desenvolvido. Ainda, é feita uma análise estatística para o cálculo do erro que se comete ao se comparar os dados de radiação solar global encontrados na base de dados como os do CRESESB (2017), nos quais serão apresentados na **Tab. 8**, e os calculados por meio das equações disponíveis na literatura usando a localização precisa das duas cidades.

Para se obter os resultados dispostos neste capítulo, foi criada uma planilha no Microsoft Excel®. Aplicou-se as **Eqs. 2**, **3**, **4**, **5** e os dados da **Tab. 2**, para se determinar a radiação solar extraterrestre média mensal (H_0), em J/m^2/dia.

Na determinação da quantidade de horas de brilho solar diária média (n), foram utilizados dados do INMET (2017). Os dados apresentados pelo INMET foram publicados no final de 2009, após uma revisão e ampliação das Normais Climatológicas computadas pelo INMET em 1992. São informações que abrangem 414 estações meteorológicas de superfície em operação durante o período compreendido entre 01/01/1961 e 31/12/1990. O INMET apresenta os dados mensais para n. Todos os valores encontrados para Gravatá-PE e Osório-RS, em relação a H_0, n_d, δ, ω_s, n e N, estão dispostos nas **Tabs. 5** e **6**.

Tabela 5 – Dados necessários para o cálculo da radiação solar para Gravatá-PE.

	H_0 (J/m²·dia)	n_d	ϕ (º)	δ (º)	ω_s (º)	I_0 (W/m²)	N	n
Janeiro	38.741.426,76	17	-8,10	-23,18	93,49	1.367	12,47	8,06
Fevereiro	38.553.880,34	47	-8,10	-21,90	93,28	1.367	12,44	7,50
Março	38.465.858,26	75	-8,10	-15,52	92,26	1.367	12,30	6,77
Abril	37.498.440,57	105	-8,10	-4,81	90,69	1.367	12,09	6,33
Maio	35.092.578,12	135	-8,10	7,15	88,98	1.367	11,86	6,13
Junho	32.355.293,27	162	-8,10	16,40	87,60	1.367	11,68	5,67
Julho	30.053.055,42	198	-8,10	23,08	86,52	1.367	11,54	4,84
Agosto	30.675.523,85	228	-8,10	22,11	86,69	1.367	11,56	6,13
Setembro	33.414.688,31	258	-8,10	15,37	87,76	1.367	11,70	7,00
Outubro	36.724.852,02	288	-8,10	4,62	89,34	1.367	11,91	8,06
Novembro	38.850.360,54	318	-8,10	-7,34	91,05	1.367	12,14	8,33
Dezembro	39.269.141,20	344	-8,10	-16,25	92,38	1.367	12,32	8,06

Fonte: (Autor, 2017)

Tabela 6 – Dados necessários para o cálculo da radiação solar para Osório-RS.

	H_0 (J/m²·dia)	n_d	ϕ (º)	δ (º)	ω_s (º)	I_0 (W/m²)	N	n
Janeiro	43.755.524,17	17	-29,50	-23,18	104,02	1.367	13,87	7,50
Fevereiro	42.952.258,88	47	-29,50	-21,90	103,15	1.367	13,75	6,96
Março	40.060.980,55	75	-29,50	-15,52	99,04	1.367	13,21	5,97
Abril	34.812.586,09	105	-29,50	-4,81	92,73	1.367	12,36	5,83
Maio	28.279.212,03	135	-29,50	7,15	85,93	1.367	11,46	4,90
Junho	22.885.946,62	162	-29,50	16,40	80,42	1.367	10,72	4,83
Julho	18.956.101,31	198	-29,50	23,08	76,05	1.367	10,14	5,65
Agosto	19.703.433,89	228	-29,50	22,11	76,71	1.367	10,23	6,94
Setembro	24.013.597,25	258	-29,50	15,37	81,05	1.367	10,81	6,70
Outubro	30.551.489,72	288	-29,50	4,62	87,38	1.367	11,65	6,74
Novembro	37.079.251,41	318	-29,50	-7,34	94,18	1.367	12,56	7,67
Dezembro	41.215.387,70	344	-29,50	-16,25	99,49	1.367	13,27	7,74

Fonte: (Autor, 2017)

Legenda: (H_0) é a radiação solar extraterrestre média mensal em J/m²·dia; (n_d) é o número de dias (Juliano); ϕ é a latitude do local; (δ) é o ângulo de declinação solar, em graus; (ω_s) é o ângulo horário do pôr do sol, em graus; (I_0) é a constante solar, em W/m²; (N) são as horas de brilho solar média diária e (n) é a quantidade de horas de brilho solar diária média.

Utilizando-se as informações constantes nas **Tabs. 5** e **6**, e os coeficientes *a* e *b* da **Eq. 1**, foi possível realizar os cálculos a fim de se determinar os valores mensais de radiação solar global, *H*, para as cidades de Gravatá-PE e Osório-RS.

Para os valores dos coeficientes *a* e *b* para a cidade de Gravatá-PE foram considerados os mesmos da cidade de Recife-PE. Tiba (2002) apresenta os valores dos coeficientes *a* e *b* para o nordeste brasileiro, onde por meio de um processo de interpolação, várias localidades são agrupadas em regiões, em mapas de isolinhas. Ambas as cidades de Recife-PE e Gravatá-PE estão na mesma região. Por esse motivo, considerou-se os mesmos valores de Recife-PE. Já para Osório-RS, não houve esse problema, sendo portanto, utilizados os seus valores já encontrados na pesquisa.

Utilizando-se todos os dados apresentados nas **Tabs. 5** e **6**, a radiação solar global (*H*) foi determinada, após a aplicação desses valores na **Eq. 1**, e apresentados na **Tab. 7**. Os dados estão em MJ/m^2·dia, assim como convertidos para kWh/m^2·dia.

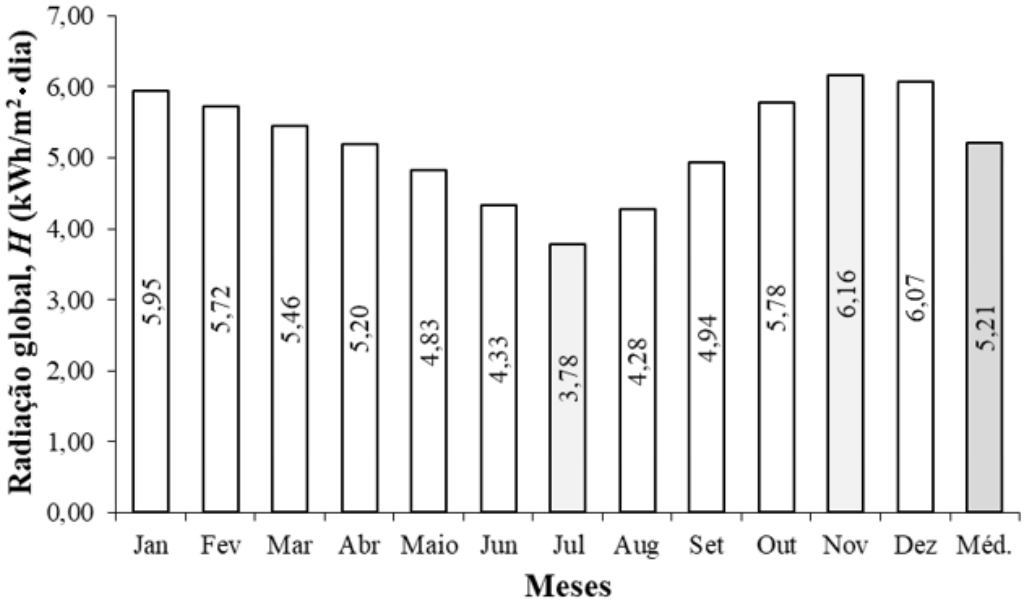
Tabela 7 – Dados de radiação solar global determinados para Gravatá-PE e Osório-RS.

	$H_{Gravatá}$ (MJ/m^2·dia)	$H_{Gravatá}$ (kWh/m^2·dia)	$H_{Osório}$ (MJ/m^2·dia)	$H_{Osório}$ (kWh/m^2·dia)
Janeiro	21,49	5,95	19,27	5,34
Fevereiro	20,64	5,72	18,18	5,04
Março	19,71	5,46	15,86	4,39
Abril	18,77	5,20	14,13	3,91
Maio	17,45	4,83	10,86	3,01
Junho	15,64	4,33	9,05	2,51
Julho	13,66	3,78	8,50	2,35
Agosto	15,44	4,28	10,03	2,78
Setembro	17,82	4,94	11,53	3,19
Outubro	20,86	5,78	14,03	3,89
Novembro	22,23	6,16	17,62	4,88
Dezembro	21,92	6,07	19,03	5,27
Média	**18,81**	**5,21**	**14,01**	**3,87**

Fonte: (Autor, 2017)

Os valores de radiação global (*H*) para as duas cidades foram também estão expostos em gráficos: o **gráfico 3**, Gravatá-PE e o **gráfico 4**, Osório-RS. Os seus respectivos valores mensais estão em kWh/m^2·dia.

Gráfico 3 – Radiação solar global / Gravatá-PE.

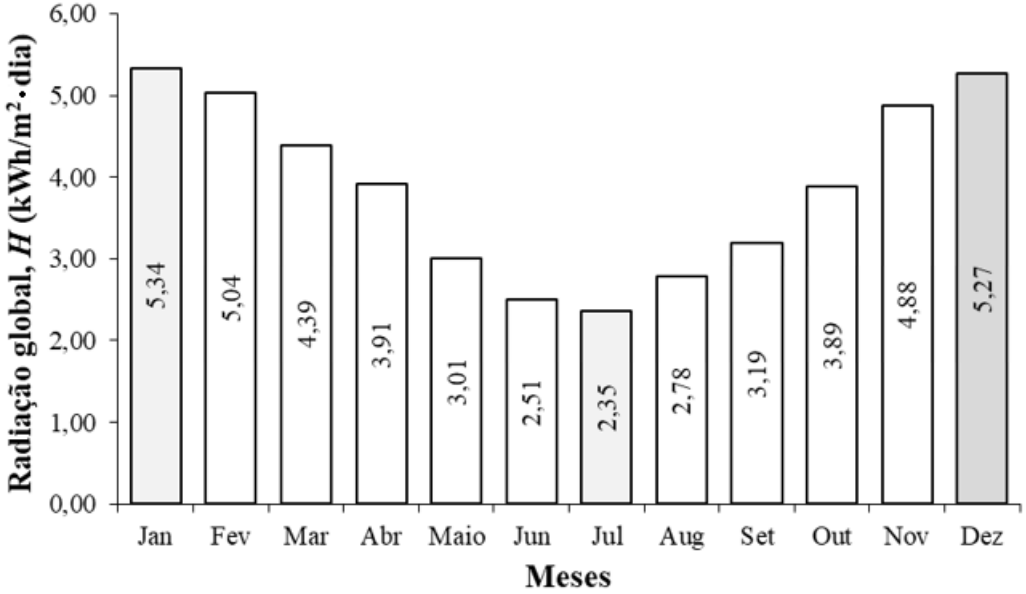


Fonte: (Autor, 2017)

Pelo **gráfico 3**, o mês de julho é aquele que possui a menor radiação solar global, igual a 3,78 kWh/m^2·dia. Por outro lado, o mês de novembro é o que apresenta maior valor, com radiação solar global igual a 6,16 kWh/m^2·dia. A média anual de radiação para Gravatá-PE é de 5,21 kWh/m^2·dia.

No **gráfico 4**, percebeu-se que a radiação solar manteve a tendência apresentada pelo **gráfico 3**, ou seja, os meses que apresentaram maiores valores foram os iniciais e os finais, coincidindo com o início do período de verão no hemisfério sul.

Gráfico 4 – Radiação solar global / Osório-RS.



Fonte: (Autor, 2017)

Pela análise do **gráfico 4**, percebe-se que o mês de julho é aquele que tem a menor radiação global, igual a 2,35 kWh/m^2·dia. Já o mês de janeiro é aquele que tem a maior radiação global, 5,34 kWh/m^2·dia. A média anual é de 5,27 kWh/m^2·dia.

A **Tab. 8** mostra os valores da radiação solar global para Gravatá-PE e Osório-RS, mês a mês, segundo o CRESESB (2017). O CRESESB permite por meio do programa *SunData* calcular a radiação solar diária média mensal em qualquer ponto do território nacional. Os dados fornecidos pelo *SunData* foram atualizados a partir do banco de dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar - 2ª Edição, que foi produzido em 2017 pelo Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). O atlas foi produzido a partir de um total de 17 anos de imagens de satélite, desde 1999 até 2015 e com informações de mais de 72.000 pontos em todo o território brasileiro com distâncias de aproximadamente 10 km entre eles.

Tabela 8 – Radiação solar global para Gravatá-PE e Osório-RS.

Meses	Radiação (kWh/m^2·dia)	
	Gravatá-PE	Osório-RS
Jan.	5,68	5,53
Fev.	5,73	5,07
Mar.	5,75	4,32
Abr.	5,08	3,73
Maio	4,43	2,83
Jun.	**4,09**	**2,41**
Jul	4,21	2,63
Ago.	4,86	3,31
Set.	5,51	3,41
Out.	5,75	4,20
Nov.	5,94	5,50
Dez	**6,01**	**5,81**
Média	**5,25**	**4,06**

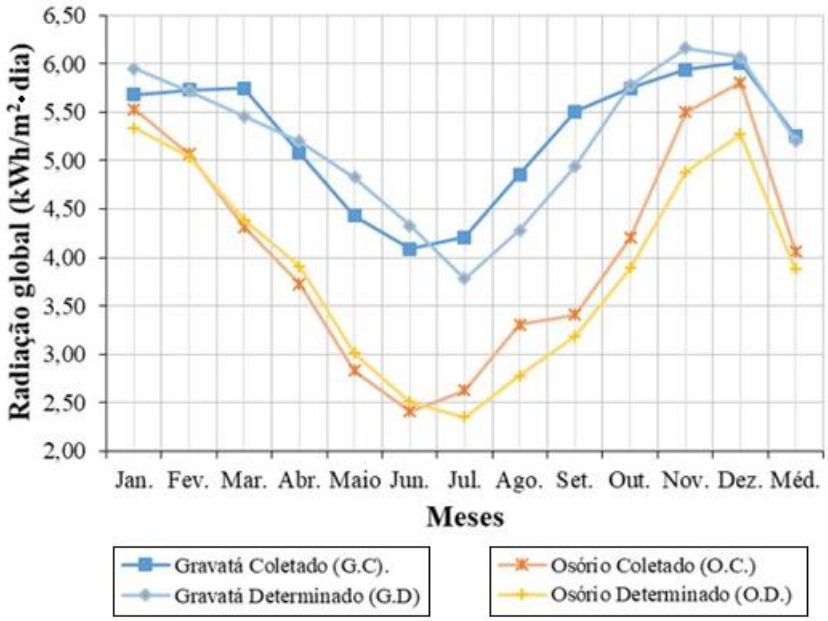
Fonte: (CRESESB, 2017)

Pela **Tab. 8**, é possível perceber que os menores valores de radiação solar (*H*) para Gravatá-PE e Osório-RS, foram de 4,09 kWh/m^2·dia e 2,41 kWh/m^2·dia, respectivamente. Já os maiores valores de radiação solar foram de 6,01 kWh/m^2·dia e 5,81 kWh/m^2·dia, para Gravatá-PE e Osório-RS respectivamente.

As informações fornecidas pelo CRESESB (2017) e mostradas na **Tab. 8** foram comparadas com os dados encontrados a partir da equação de *Ångström-Prescott*, no qual se utilizou nos seus coeficientes *a* e *b*, os valores encontrados na literatura, assim como as considerações aplicadas. Disso, foi possível fazer uma análise comparativa entre os dados esperados e os fornecidos pela base de dados consultada.

O **gráfico 5** apresenta os valores de radiação global coletados a partir da base de dados para Gravatá-PE, identificado como *Gravatá Coletado* (G.C.), e para Osório-RS, identificado como *Osório Coletado* (O.G.). As outras duas séries representam os dados de radiação solar determinados a partir da **Eq. 1**, de Ångström-Prescott. São representados por *Gravatá Determinado* (G.D.) e *Osório Determinado* (O.D.).

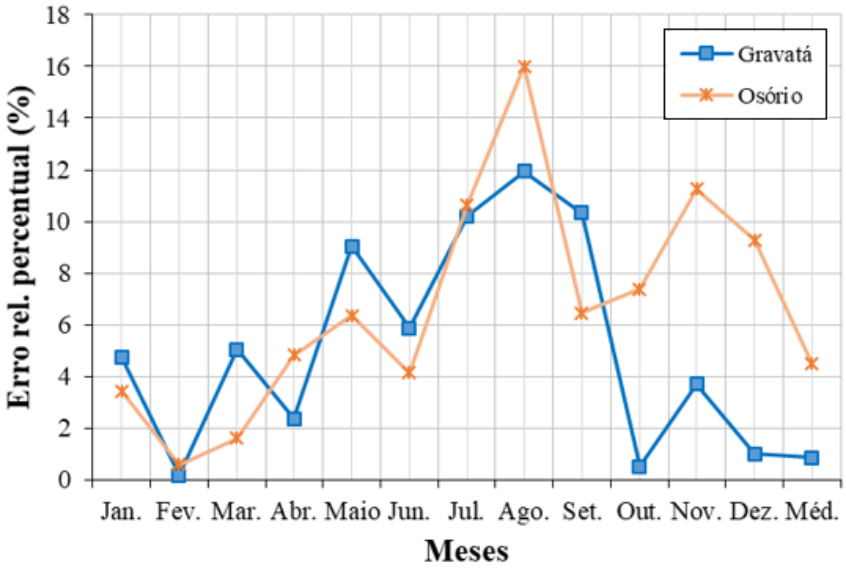
Gráfico 5 – Radiação solar global / Gravatá-PE e Osório-RS.



Fonte: (Autor, 2017)

Pela análise do **gráfico 5**, fica evidente que para Gravatá-PE, os valores de radiação global para os meses de fevereiro, abril, outubro e dezembro ficaram bem próximos quando se compara os dados coletados (G.C) e os determinados (G.D.), tendo uma pequena diferença nos demais meses, sendo agosto o mês que apresentou a maior diferença, 11,93%. De maneira similar para Osório-RS, a diferença encontrada nos valores de radiação entre os dados coletados (O.C.) e determinados (O.G.), para os meses iniciais de janeiro a junho, e nos meses de setembro e outubro, apresentaram uma pequena diferença, sendo mais expressiva nos demais meses, como agosto apresentando a maior diferença, 16,01%.

Gráfico 6 – Erro relativo percentual no cálculo da radiação global.



Fonte: (Autor, 2017)

O **gráfico 6** apresenta em termos de erro relativo percentual a diferença entre ambas as séries de dados, coletada e determinada, para cada uma das cidades estudadas. A fórmula utilizada para o cálculo do erro relativo foi a seguinte: cem vezes a diferença entre o valor da radiação coletada e o valor da radiação determinada, dividido pela radiação coletada. Pelo gráfico, para Gravatá-PE, é perceptível que os dados se ajustam bem nos meses de fevereiro (0,17%) e outubro (0,52%) e com um baixo erro nos meses de abril (2,36%) e dezembro (1%). Os demais meses apresentaram um erro percentual considerável, sendo agosto o mês com maior erro, 11,93%. O erro percentual médio anual para Gravatá-PE foi de 0,76%.

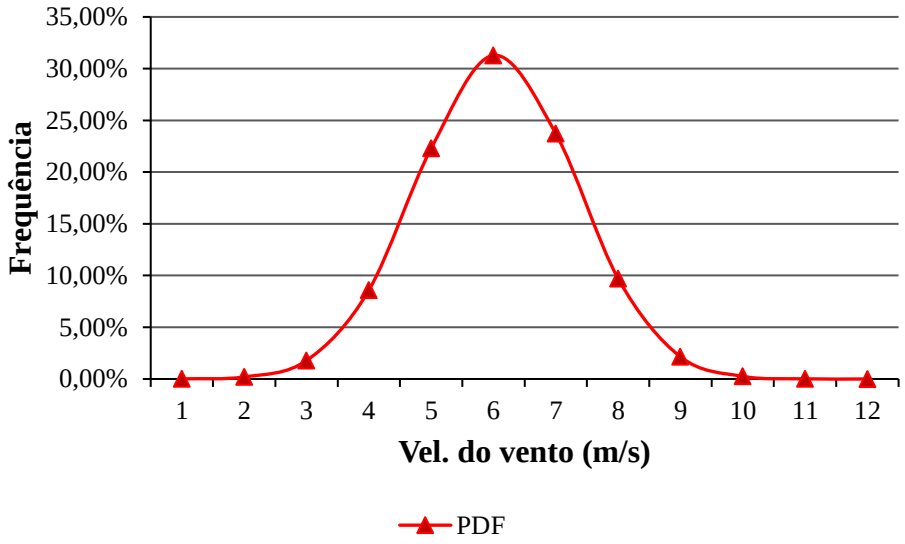
Por outro lado, os dados de radiação solar global para Osório-RS não apresentaram a mesma tendência. Os meses de julho (10,65%), agosto (16,01%), novembro (11,27%) e dezembro (9,29%) apresentaram uma significativa discrepância entre os valores coletados da base de dados e os determinados. O erro percentual para o mês de agosto foi o mais significativo, 16%. Já para os demais meses, os valores apresentaram alguma diferença, mas dentro de uma faixa de aceitação quando comparados (< 6%), tendo o mês de fevereiro o menor erro, 0,59%. Em média, o erro percentual anual para Osório-RS foi de 4,68%, sendo portanto, considerado aceitável.

5.3 PARÂMETROS DE WEIBULL

Os parâmetros de forma *k* e de escala *c* para a função distribuição de probabilidade de Weibull foram determinados para os sítios de Gravatá-PE e Osório-RS, cidades sob influência de dois regimes diferentes de vento, ventos alísios e ventos de oeste. Dados horários de velocidade de vento foram utilizados para avaliar o desempenho de nove diferentes métodos numéricos.

Para os dois sítios estudados, foram analisados 87.648 dados de velocidades de vento em um período de 10 anos, 2006 a 2015. As **Figs. 15** e **16** mostram a representação gráfica da função PDF obtidas a partir dos dados horários de velocidade de vento de cada localidade.

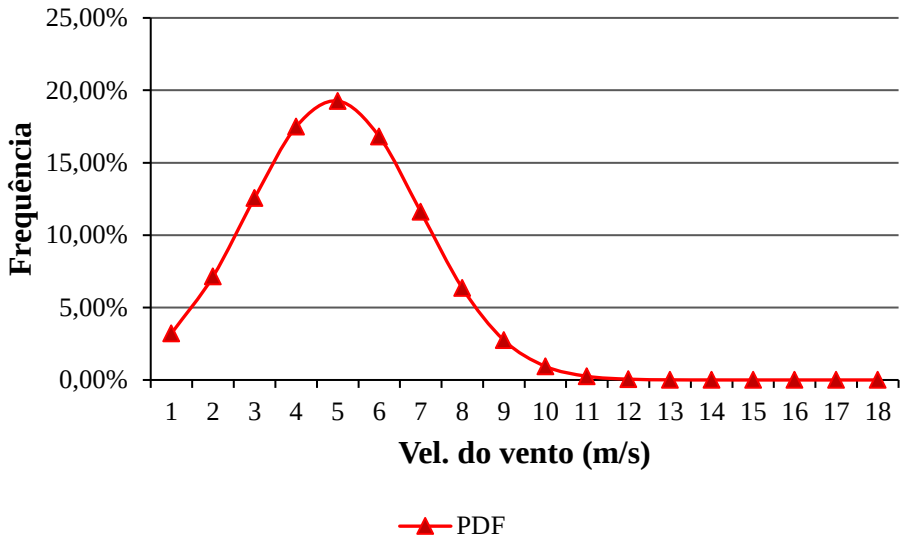
Figura 15 – PDF da velocidade de vento a 50 m para Gravatá-PE.



Fonte: (Autor, 2017)

A função PDF representa a frequência observada a partir dos diferentes níveis de velocidade de vento, que são utilizados para especificar a velocidade de vento que prevalece no local.

Figura 16 – PDF da velocidade de vento a 50 m para Osório-RS.



Fonte: (Autor, 2017)

A **Tab. 9** mostra a estatística descritiva dos dados de velocidade do vento para os sítios a 50 m de altura em relação ao solo. Analisando o desvio padrão para Gravatá-PE, percebe-se que os valores de velocidade do vento estão próximos da média. Entretanto, para Osório-RS, os dados não mostram essa disposição, estando portanto, com valores não tão próximos da média, devido a dispersão dos seus valores. A **Tab. 9** mostra ainda a densidade de potência encontrada a partir da série de dados de vento no período analisado.

Tabela 9 – Estatística descritiva dos dados medidos para os sítios a 50 m.

Sítio	Vel. máx. (m/s)	Vel. méd. (m/s)	Desv. Pad. (m/s)	Assimetria (Skewness)	Curtose (kurtosis)	Nº dados	Período	Freq. (min)
Gravatá-PE	11,94	6,05	1,27	0,21	3,59	87648	2006 - 2015	60
Osório-RS	17,16	4,92	2,10	0,38	3,46	87648	2006 - 2015	60

Fonte: (Autor, 2017)

Na **Tab. 9**, duas estatísticas importantes são apresentadas: o coeficiente de assimetria (*skewness*) e o coeficiente de curtose (*kurtosis*). Esses dois coeficientes tratam do ajuste dos dados de vento à distribuição utilizada, no caso Weibull. Em termos absolutos, quanto maior for o coeficiente de assimetria, mais desigual serão as caudas da distribuição, e o sinal quando positivo, representa uma maior variabilidade nos valores elevados. No caso em estudo, os valores de assimetria para ambos os sítios foram positivos, mas bem pequenos. Quando se encontra entre -2 e +2, as discrepâncias nos valores não são significativas quando comparado

com distribuições simétricas, como a distribuição normal. Portanto, para ambos os casos, o afastamento da distribuição do seu eixo de simetria é para o lado direito, uma vez que a assimetria é positiva.

O coeficiente de curtose trata do achatamento das curvas. Quando maior do que 3, a curva tende a ser mais achatada, o que é conhecido por distribuição leptocúrtica, que é aquele formato afilado, encontrado nas curvas de distribuição.

Assim, após a aplicação dos nove diferentes métodos apresentados na **Tab. 3** (Seção 3.2.3), e utilizando os dados de velocidade de vento para ambas as cidades, o desempenho de cada método foi avaliado. A análise estatística foi feita utilizando programa computacional, como o software estatístico *R* e planilhas desenvolvidas no Microsoft Excel® 2013.

Ambos os parâmetros, de forma *k* e escala *c*, foram obtidos após o ajuste dos dados de vento à distribuição de Weibull. A **Tab. 10** apresenta os parâmetros *k* e *c* para Gravatá-PE, com a avaliação de desempenho dos nove métodos numéricos escolhidos.

Tabela 10 – Avaliação dos nove métodos para 50m usando análises estatísticas para Gravatá-PE.

Métodos	**Parâmetros**		**Análise estátistica**							
	k	***c*** (m/s)	***R***	Rank	R^2	Rank	***RSME***	Rank	χ^2	Rank
MG	5,01	6,27	0,9721	1	0,94489	1	0,02587	1	0,04102	1
MMQ	5,79	6,53	0,9075	7	0,80407	6	0,04959	6	0,20828	6
MEJ	5,43	6,56	0,9101	4	0,82108	4	0,04739	4	0,16281	4
MEL	5,43	6,55	0,9112	3	0,82320	3	0,04711	3	0,16068	3
MM	5,46	6,56	0,9098	5	0,81981	5	0,04756	5	0,16463	5
MDP	3,86	6,69	0,9086	6	0,79647	7	0,05054	7	0,22097	7
MMV	5,02	6,56	0,9193	2	0,84472	2	0,04415	2	0,13937	2
MAMV	5,75	6,65	0,8742	8	0,74125	8	0,05699	8	0,25672	8
MW	2,51	6,11	0,8632	9	0,63067	9	0,06808	9	0,44394	9

Fonte: (Autor, 2017)

A análise da **Tab. 10** permitiu classificar quais métodos desempenharam os melhores resultados estatisticamente para os parâmetros *k* e *c* de Weibull. A **Tab. 11** apresenta para Gravatá, quais os melhores valores dos parâmetros, de acordo com a maioria dos métodos estatísticos analisados: R, R^2, RSME e χ^2.

Tabela 11 – Ranking dos métodos de determinação dos parâmetros para Gravatá-PE.

Métodos	Ranking
MG	1º
MMV	2º
MEL	3º
MEJ	4º
MM	5º
MMQ	6º
MDP	7º
MAMV	8º
MW	9º

Fonte: (Autor, 2017)

De maneira similar, a **Tab. 12** apresenta os parâmetros *k* e *c* para Osório-RS, com a avaliação de desempenho dos nove métodos numéricos escolhidos.

Tabela 12 – Avaliação dos nove métodos para 50 m usando análises estatísticas para Osório-RS.

Métodos	Parâmetros		Análise estatística							
	k	c (m/s)	R	Rank	R^2	Rank	$RSME$	Rank	χ^2	Rank
MG	2,39	4,86	0,9843	8	0,96434	8	0,01322	8	0,02201	1
MMQ	2,44	5,57	0,9883	7	0,97503	7	0,01069	7	0,06022	3
MEJ	2,56	5,54	0,9887	5	0,97739	5	0,01017	5	0,06823	7
MEL	2,56	5,54	0,9887	6	0,97731	6	0,01019	6	0,06835	8
MM	2,55	5,54	0,9888	4	0,97753	4	0,01014	4	0,06712	6
MDP	2,52	5,54	0,9891	3	0,97789	3	0,01006	3	0,06316	5
MMV	2,52	5,53	0,9895	2	0,97883	2	0,00984	2	0,06195	4
MAMV	2,43	5,50	0,9912	1	0,98120	1	0,00927	1	0,05002	2
MW	2,94	5,68	0,9672	9	0,92731	9	0,01823	9	0,22609	9

Fonte: (Autor, 2017)

E, de igual maneira, a **Tab. 13** apresenta para Osório-RS, quais os melhores valores dos parâmetros, de acordo com a maioria dos métodos estatísticos analisados: R, R^2, RSME e χ^2.

Tabela 13 – Ranking dos métodos de determinação dos parâmetros para Osório-RS.

Métodos	Ranking
MAMV	1º
MMV	2º
MDP	3º
MM	4º
MEJ	5º
MEL	6º
MMQ	7º
MG	8º
MW	9º

Fonte: (Autor, 2017)

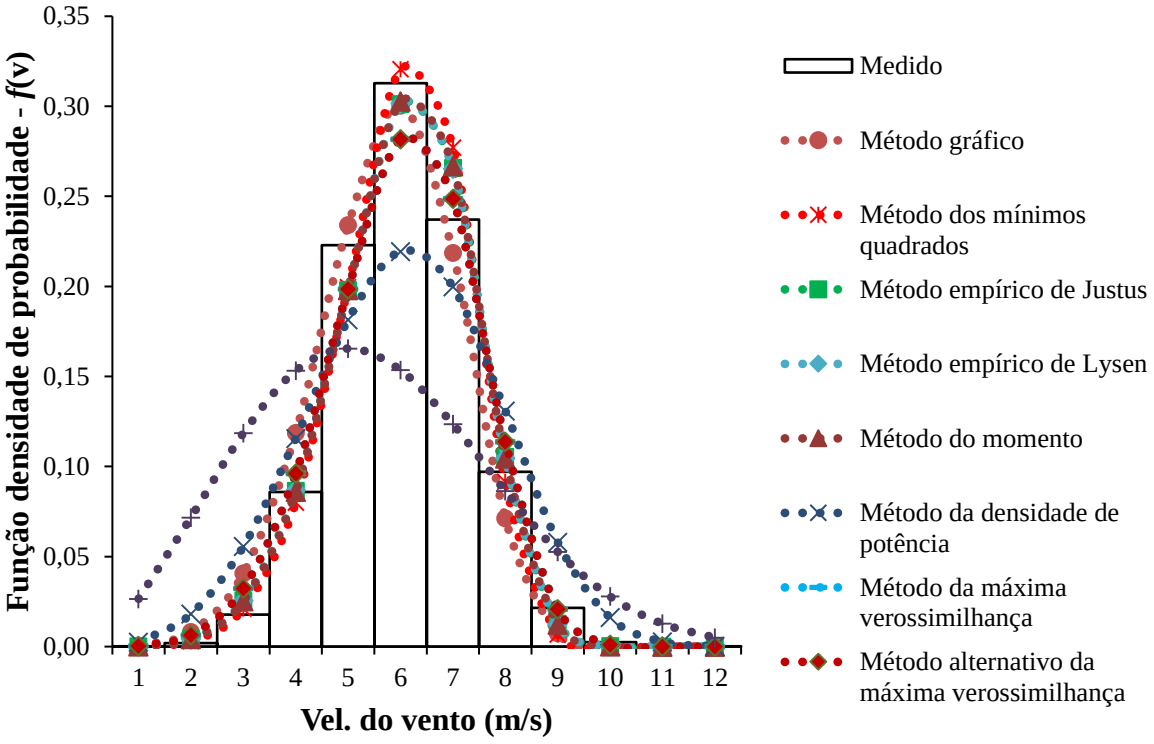
De acordo com a análise da **Tab. 11**, tem-se que para Gravatá-PE os primeiros melhores métodos a partir da análise estatística foram o MG, MMV e MEL. Já para Osório-RS, pela análise da **Tab. 13,** os melhores métodos foram o MAMV, MMV e o MDP. De acordo com a literatura, os métodos numéricos iterativos, que são os analisados computacionalmente, devveriam apresentar melhores resultados. A partir dos dados de vento utilizados, os melhores resultados baseados nos métodos computacionais ficaram em melhores posições no sítio de Osório-RS, o que não ocorreu para todas as melhores posições de Gravatá-PE.

O parâmetro de forma *k* para Gravatá-PE teve para o melhor método, MG, o valor de 5,01 e um parâmetro de escala *c* igual a 6,27. Já Osório-RS, teve como parâmetro de forma *k*, a partir do método MAMV, o valor de *k* igual a 2,43 e de *c* igual a 5,50, respectivamente.

As **Figs. 17** e **18** mostram a distribuição de frequência de velocidade de vento para os sítios de Gravatá-PE e Osório-RS, com as curvas da função distribuição de Weibull de acordo com os nove métodos numéricos superpostos à função distribuição de frequência.

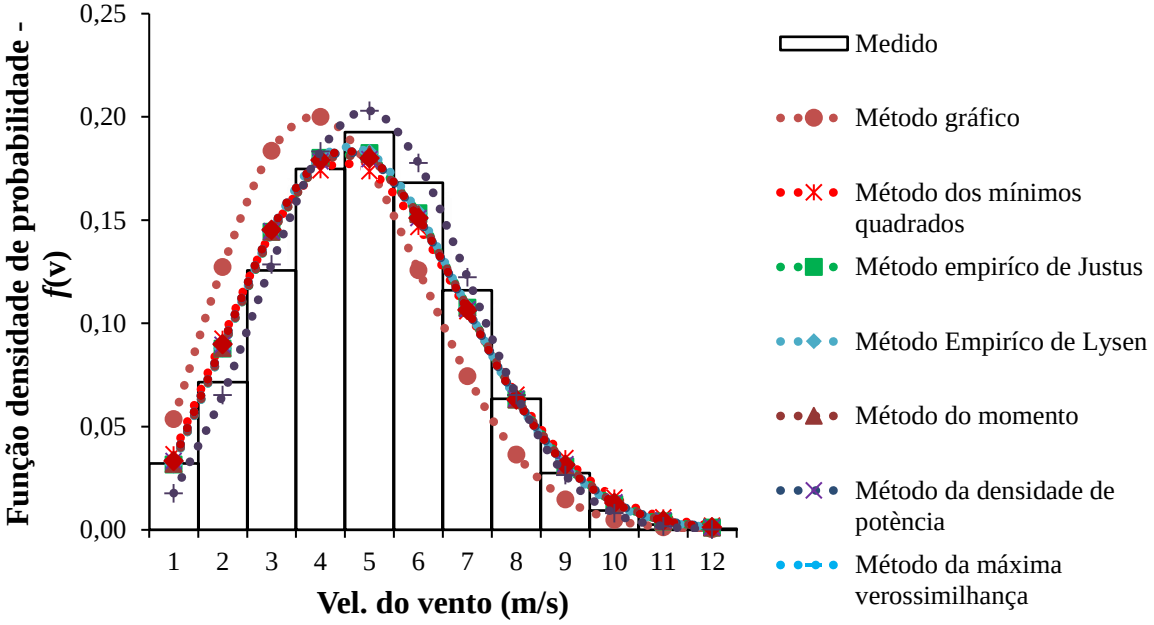
Comparando as **Fig. 17** e **Fig. 18**, a **Fig. 17** referente a Gravatá-PE, apresenta uma curva mais pontiaguda, maior valor de curtose (**Tab. 9**), devido aos elevados parâmetros de forma *k*, enquanto que para Osório-RS, **Fig. 18**, a forma da curva é mais suave, menor valor de curtose (**Tab. 9**), devido aos baixos valores do parâmetro de forma *k*, quando comparado com os valores de *k* para Gravatá-PE.

Figura 17 – Distribuição de Weibull usando os diferentes métodos para Gravatá-PE.



Fonte: (Autor, 2017)

Figura 18 – Distribuição de Weibull usando os diferentes métodos para Osório-RS.



Fonte: (Autor, 2017)

A **Tab. 14** fornece a densidade de potência média para os sítios de Gravatá-PE e Osório-RS, respectivamente. Esses valores foram determinados usando a metodologia apresentada por

Manwell, McGowan e Rogers (2009). Para ambos os sítios, a densidade de potência para Gravatá-PE e Osório-RS são iguais a 153,97 W/m^2 e 154,64 W/m^2, respectivamente.

Tabela 14 – Densidade de potência média para Gravatá-PE e Osório-RS.

Sítios	**Densidade de potência**
	$\overline{P}/A$ (W/m^2)
Gravatá-PE	153,97
Osório-RS	154,64

Fonte: (Autor, 2017)

Analisando a tabela anterior, comparando-se a densidade de potência média obtida pela série de dados de vento, fica evidente que ambos os sítios possuem valores bem próximos de densidade de potência média. A partir desses valores, pode-se afirmar que os ventos de Gravatá-PE e Osório-RS possuem um bom potencial de geração eólica uma vez que seus valores são maiores do que 100 W/m^2.

5.4 ESTUDO DE CASO

5.4.1 Otimização de sistema no programa HOMER

Nesta seção, o processo de otimização é descrito focando-se na eletrificação de uma pequena comunidade isolada, hipotética, com casas de mesmo porte, nos moldes do programa federal “Minha casa, minha vida”, situadas em Gravatá-PE e em Osório-RS. A melhor configuração de sistema hibrido será avaliada por meio de simulações no programa computacional HOMER comparando as simulações para ambos os sítios com o objetivo de se verificar qual projeto terá maior viabilidade. O objetivo dessa simulação é apresentar uma ideia básica de como a localização pode influenciar no custo final do projeto, uma vez que os recursos solares e eólicos são diferentes.

Para esse estudo de caso, a demanda elétrica da comunidade será estimada e o processo de criação do modelo será descrito, com as escolhas para geradores e baterias, bem como os parâmetros e as restrições consideradas. Por último, os resultados serão apresentados. Neste processo de otimização, a maior dificuldade é encontrar dados sobre os custos de equipamentos, sua substituição, assim como para operação e manutenção. Isso é devido a constante mudança nos preços dos equipamentos e insumos, uma vez que mudam todos os anos.

5.4.2 Estimativa da demanda elétrica

É necessário determinar a curva de carga durante um dia hipotético para a otimização do sistema. Geralmente, esse passo é complexo, haja vista que existem incertezas em torno de como será o consumo em cada residência. Uma prática comum é visitar uma comunidade existente e verificar os hábitos de consumo e os equipamentos que possuem.

Na literatura, há diversos estudos de casos referentes à eletrificação no meio rural, em países em desenvolvimento, como os citados na revisão bibliográfica. Entretanto, para esse caso, foram consideradas as casas típicas do programa social do governo brasileiro, "Minha casa, minha vida", que possuem na maioria dos casos, o seguinte padrão de construção: uma sala de estar, uma copa/cozinha, um banheiro social, dois quartos e uma varanda.

As cargas que o sistema irá alimentar serão de consumo doméstico e público. A carga necessária para suprir o consumo público se destina a iluminação pública. O fornecimento de eletricidade será durante todo o dia e a curva de carga será levantada a partir das seguintes considerações:

a. Cargas de cada casa:
   - ✓ Lâmpadas: 6 fluorescentes compactas, de 11 W ligadas das 17h até às 23h (6h de duração), sendo que uma das 6 lâmpadas, a de segurança da casa, permanece acesa até às 6h (13h de duração);
   - ✓ Rádio: 15 W, ligado durante a manhã (4h de duração);
   - ✓ Televisão: 70 W, ao entardecer e início de noite (5h de duração);
   - ✓ Refrigerador pequeno: 30 W, o dia inteiro (24h de duração);
   - ✓ Ventilador: 35 W, próximo ao meio-dia e à tarde (6h de duração);
   - ✓ Carregador portátil: 7,5 W à tarde (5h de duração).
b. Para o cálculo da demanda das lâmpadas na rua, presume-se que uma lâmpada de 100 W seja suficiente para cada 10 casas. Estarão ligadas das 18h até às 5h (11h de duração).

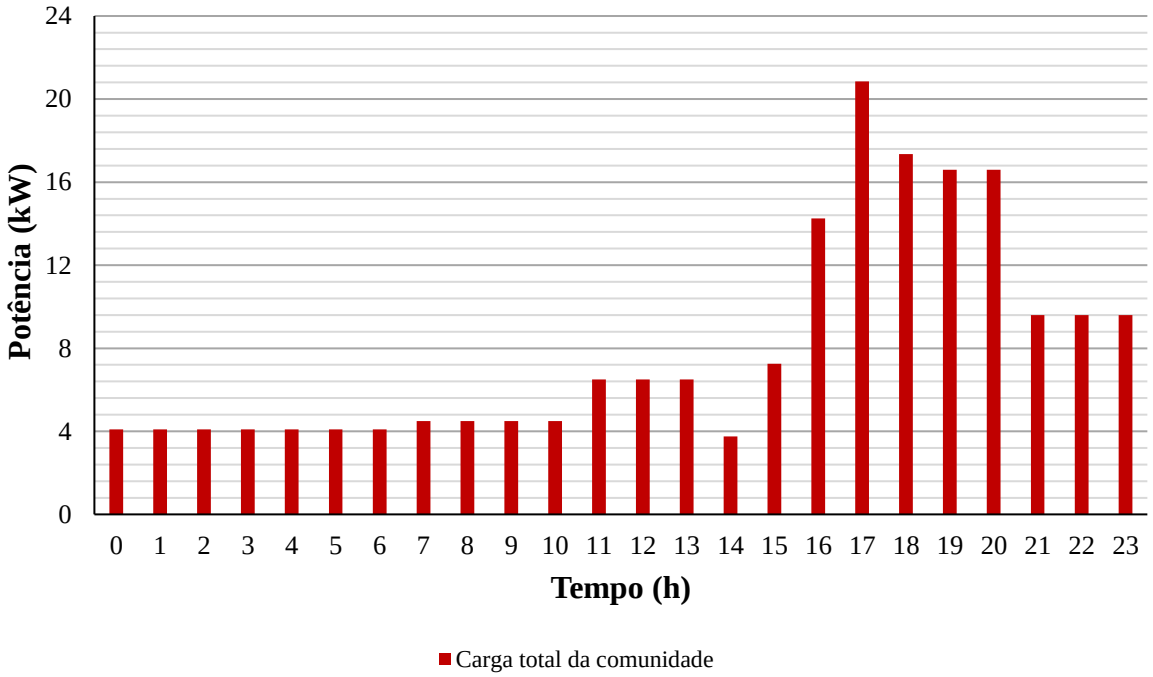
O consumo elétrico da comunidade correspondente a um dia hipotético é mostrado na **Tab. 15**. O **gráfico 7** apresenta a curva de carga para o dia hipotético considerado.

Tabela 15 – Demanda elétrica: 1 casa e a comunidade por 1 dia.

Utensílio	Demanda elétrica por domicílio (kWh/dia)	Demanda elétrica total para 100 domicílios (kWh/dia)
Lâmpadas	0,47	47
Rádio	0,06	6
Televisor	0,35	35
Refrigerador pequeno	0,72	72
Ventilador	0,21	21
Carregador portátil	0,04	4
Lâmpadas da rua	-	11
Total	**1,85**	**196**

Fonte: (Autor, 2017)

Gráfico 7 – Curva de carga para um dia qualquer da comunidade.



Fonte: (Autor, 2017)

Na entrada destes dados no HOMER, foi considerada uma variabilidade randômica dia-a-dia de 5% e hora-a-hora de 5%, simultaneamente. A variabilidade é devido ao fato de que nem sempre o consumo será igual em todos as casas, por isso, deve-se trabalhar com uma faixa de erro.

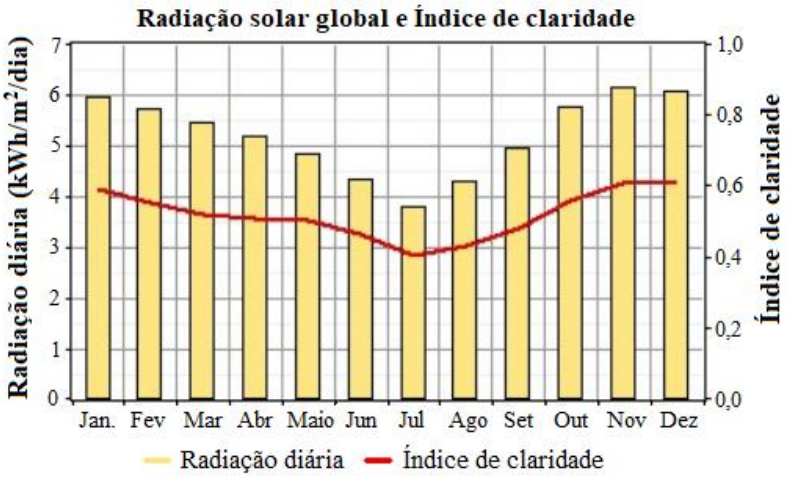
5.4.3 O modelo

Nesta seção, o processo de modelagem do sistema híbrido é descrito. A seleção das fontes de energia utilizadas, os custos associados, as restrições do modelo e outras variáveis necessárias para a simulação no software HOMER são também apresentadas.

No modelo deste estudo de caso utilizou-se painéis fotovoltaicos (PV), turbinas eólicas (WT), gerador diesel (GD) como backup e baterias para armazenamento. Foram utilizados os dados referentes à radiação solar obtidos por meio da metodologia e os dados de vento coletados já apresentados nas seções anteriores deste trabalho. Estes dados servirão de entrada para o HOMER, como pode ser visto nos **gráficos 8** e **9** para Gravatá-PE e **gráficos 10** e **11** para Osório-RS.

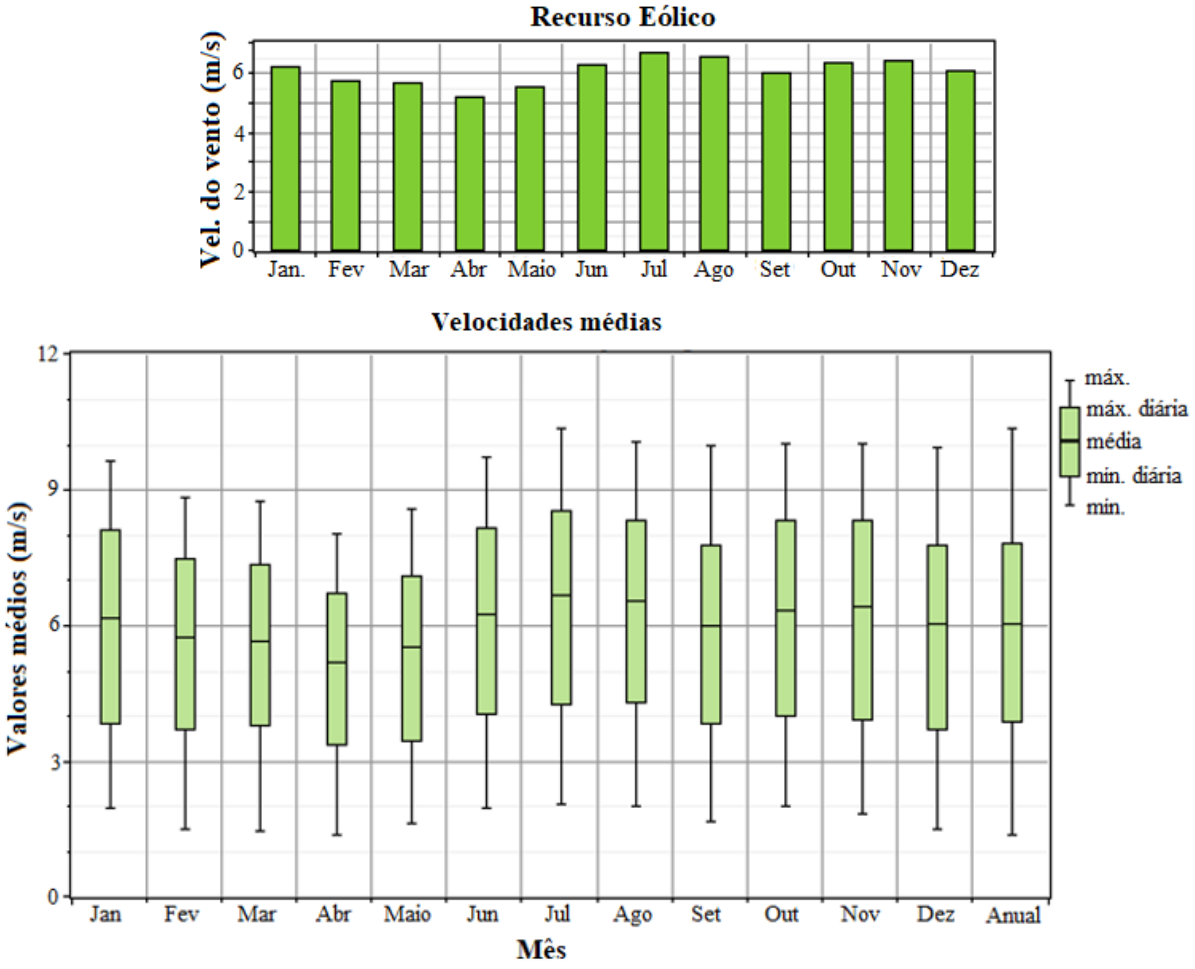
Os dados de vento a 50m de altura utilizados nas análises foram obtidos do projeto MERRA, armazenado no banco de dados do Meteonorm, da NASA (NASAa, 2017). Por meio destes dados de vento, foram obtidos os parâmetros de Weibull *k* e *c*, que caracterizam cada localidade. Optou-se por utilizar os dados de radiação solar calculados utilizando-se as equações empíricas ao invés de obter diretamente do projeto MERRA, uma vez que não houve significativa diferença nos seus valores.

Gráfico 8 – Dados médios mensais de radiação solar global e índice de claridade para Gravatá-PE.



Fonte: (Autor, 2017)

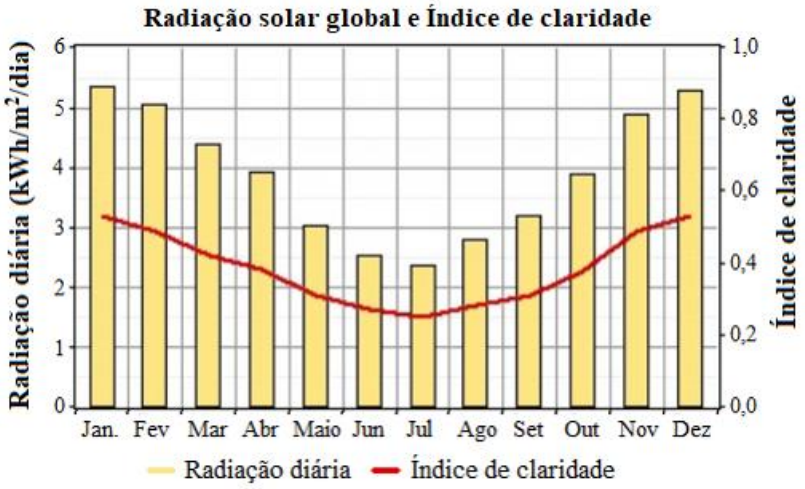
Gráfico 9 – Dados de velocidade do vento para Gravatá-PE.



Fonte: (Autor, 2017)

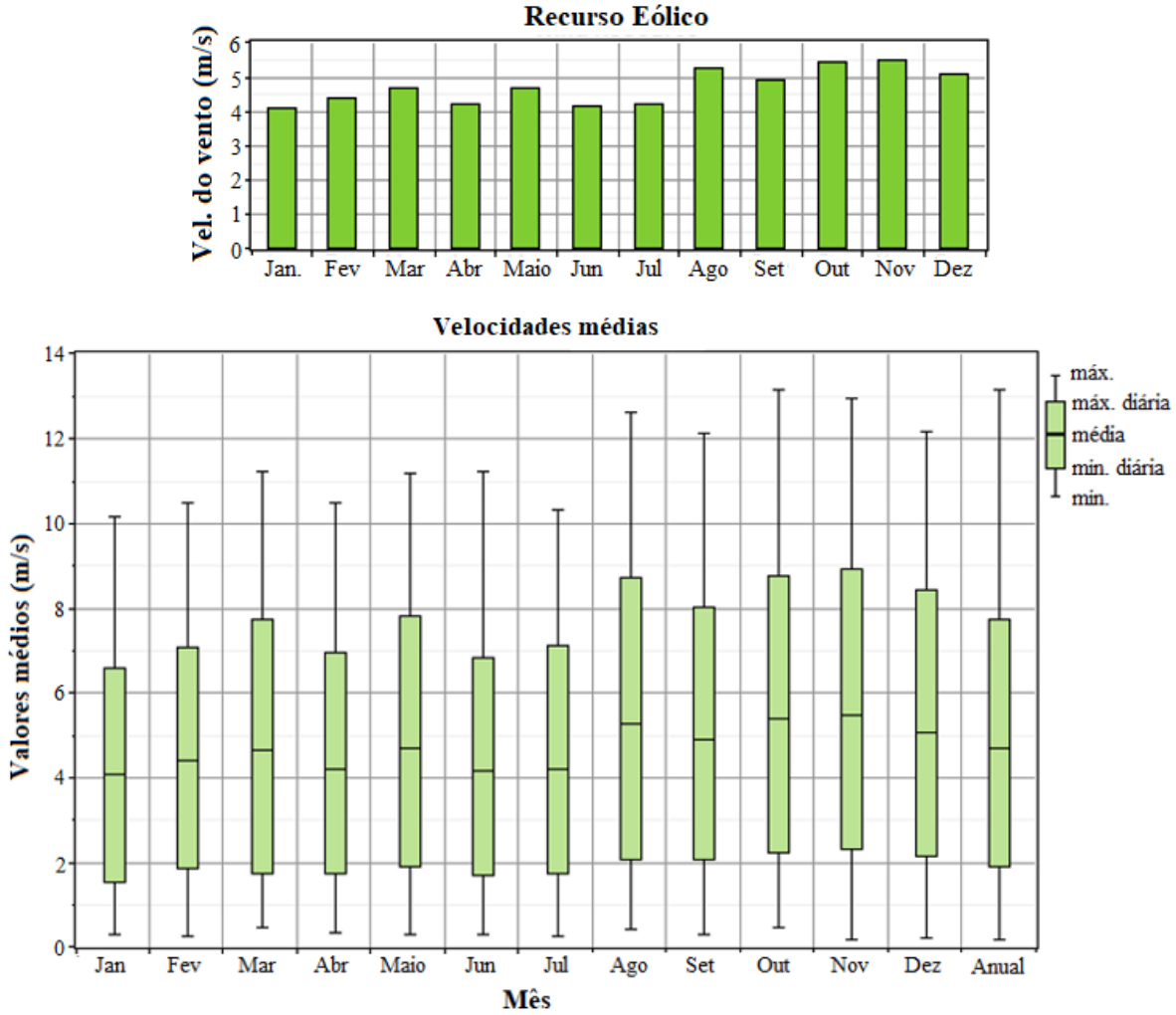
Os **gráficos 10** e **11** se referem a Osório-RS. Similarmente, são dados de radiação solar global e de velocidade de vento.

Gráfico 10 – Dados médios mensais de radiação solar para Osório-RS.



Fonte: (Autor, 2017)

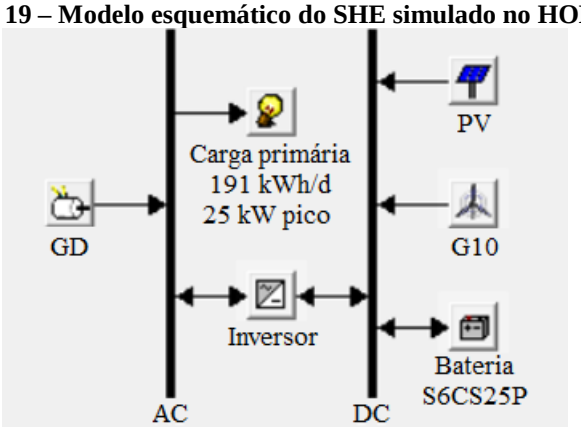
Gráfico 11 – Dados de velocidade do vento para Osório-RS.



Fonte: (Autor, 2017)

A **Fig. 19** mostra o modelo otimizado pelo HOMER. Os valores de demanda elétrica foram considerados os mesmos para as duas localidades.

Figura 19 – Modelo esquemático do SHE simulado no HOMER.



Fonte: (Autor, 2017)

No modelo simulado, apresentado na **Fig. 19**, alguns pontos devem ser notados. O primeiro ponto, é que o gerador diesel (GD) utilizado foi escolhido para suprir eficientemente todas as cargas, evitando que o mesmo trabalhe abaixo da carga mínima. Um segundo ponto a ser notado, é que a turbina eólica (G10) está localizada no barramento de corrente contínua (DC), embora o gerador utilizado tenha saída para o barramento em corrente alternada (AC).

Os controladores não podem ser simulados pelo HOMER. A turbina eólica se conecta ao barramento de corrente alternada (AC) por meio de um conversor DC/AC e o gerador fotovoltaico (PV) por meio de um conversor DC/DC e um inversor.

Os custos relacionados com os equipamentos são fatores que requerem bastante atenção, pois mudam constantemente com o tempo, o país e a região. Nesse estudo de caso, os preços dos equipamentos foram considerados a partir de uma revisão de literatura, por meio de estudos de casos já publicados (HOSSAIN, MEKHILEF e OLATOMIWA, 2017; RAMLI, HIENDRO e AL-TURKI, 2016). É importante mencionar que os preços dos equipamentos estão próximos dos adotados no Brasil. Isso foi verificado após pesquisa na internet, como por exemplo, o preço de diesel, manutenção e operação. É importante salientar que para o programa, a moeda utilizada não tem importância, embora seja nesse caso considerado o dólar americano.

A **Tab. 16** apresenta os valores de cada equipamento, assim como para outras variáveis, como por exemplo, o valor para substituição, operação e manutenção, etc. Para a simulação, foi considerado que o gerador diesel poderia ter capacidades de 1, 2, 3, 4 e 5 kW. O conversor teria uma faixa de 5 a 30 kW, em intervalos de 5 kW. O gerador fotovoltaico poderia ser simulado com potência de 1 a 20 kW, variando de 1 kW. A turbina eólica considerada foi de 10 kW, com o sistema podendo alcançar potência de 20 kW. As baterias utilizadas foram do modelo S6CS25P, com capacidade nominal de 1156 Ah. O preço do diesel é de US$ 1,05 por litro e foi obtido por meio de uma pesquisa no site da ANP (Agência Nacional de Petróleo) (ANP, 2017).

Tabela 16 – Dados de entrada dos preços de equipamentos no HOMER.

	Custo de investimento	Custo de substituição	Custo de O&M	Vida útil
PV	US$ 2.000/kW	US$ 1.200/kW	US$ 30/kW/ano	20 anos
Turbina eólica	US$ 3.000/kW	US$ 1.500/kW	US$ 40/kW/ano	20 anos
Gerador	US$ 220/kW	US$ 200/kW	US$ 0,03/h	15000 h
Inversor	US$ 528/kW	US$ 528/kW	US$ 20/kW/ano	20 anos
Bateria	US$ 1.200/unid.	US$ 1.200/unid.	US$ 60/unid./ano	12 anos

Fonte: (Hossain, Mekhilef e Olatomiwa, 2017; Ramli, Hiendro e Al-Turki, 2016)

Nessa simulação, foi assumida uma taxa de juros anual de 6% e foi considerada uma vida útil de 20 anos para o projeto. Com relação aos parâmetros de controle, para a melhor configuração do sistema, ambas as estratégias de despacho foram utilizadas: o carregamento em ciclo foi estabelecido em 80% (estado de carga) e a estratégia de despacho “carga seguinte (*load following)*” foi selecionada. A restrição aplicada nessa simulação foi a máxima capacidade anual de escassez, que não poderia exceder em 3%.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, serão apresentados e discutidos os resultados da simulação para ambos os casos, Gravatá-PE e Osório-RS.

Na otimização dos sistemas híbridos, o HOMER resultou em 1.680 e 23.100 diferentes opções de configurações para Gravatá-PE e Osório-RS, respectivamente. Dentre os resultados, a **Tab. 17** mostra a melhor alternativa para Gravatá-PE.

Tabela 17 – Resultado da simulação para Gravatá-PE.

Turbinas eólicas (G10)	18*10 kW
Baterias (S6CS25P)	16 baterias (8 baterias em 2 fileiras em paralelo)
Inversor	30 kW
Estratégia de Despacho	Carregamento em ciclo
Custo Presente Líquido (CPL) Total	US$ 115.856,00
Custo de Eletricidade (COE)	US$ 0,147/kWh
Custo de Operação	US$ 2.338,00/ano

Fonte: (Autor, 2017)

Pela análise dos resultados apresentados pela simulação para Gravatá-PE, o sistema ideal possui um CPL de US$ 115.856,00. Nesse sistema, a produção de eletricidade a partir do gerador fotovoltaico foi muito baixa, de tal modo que o programa desconsiderou a sua participação. De maneira similar, o gerador diesel não foi considerado neste caso. A geração elétrica é proveniente basicamente das turbinas eólicas, não sendo este caso um sistema híbrido.

A melhor configuração do sistema híbrido para Osório-RS é apresentada na **Tab. 18**.

Tabela 18 – Resultado da simulação para Osório-RS.

Gerador Fotovoltaico (PV)	18 kW
Turbinas eólicas (G10)	32*10 kW
Baterias (S6CS25P)	56 baterias (8 baterias em 7 fileiras em paralelo)
Inversor	25 kW
Estratégia de Despacho	Carregamento em ciclo
Custo Presente Líquido (CPL) Total	US$ 298.226,00
Custo de Eletricidade (COE)	US$ 0,381/kWh
Custo de Operação	US$ 7.483,00/ano

Fonte: (Autor, 2017)

Para Osório-RS, os resultados apresentados pela simulação mostram que o sistema ideal possui um CPL de US$ 298.226,00. O programa não considerou a participação do gerador

diesel para esse caso também, pois a sua participação foi muito baixa ou não influenciava nos resultados.

Comparando ambas as simulações, em termos de custo presente líquido, o sistema híbrido de Osório-RS possui um custo 157,41% maior em comparação com o sistema de Gravatá-PE.

As configurações dos sistemas não apresentaram similaridades, uma vez que para o caso de Gravatá-PE não houve a participação do gerador fotovoltaico. Entretanto, para o caso de Osório-RS, a potência do gerador fotovoltaico, a quantidade de turbinas eólicas e a configuração do banco de baterias foi diferente e maior do que no primeiro caso. Isso fez com que o sistema ficasse mais caro.

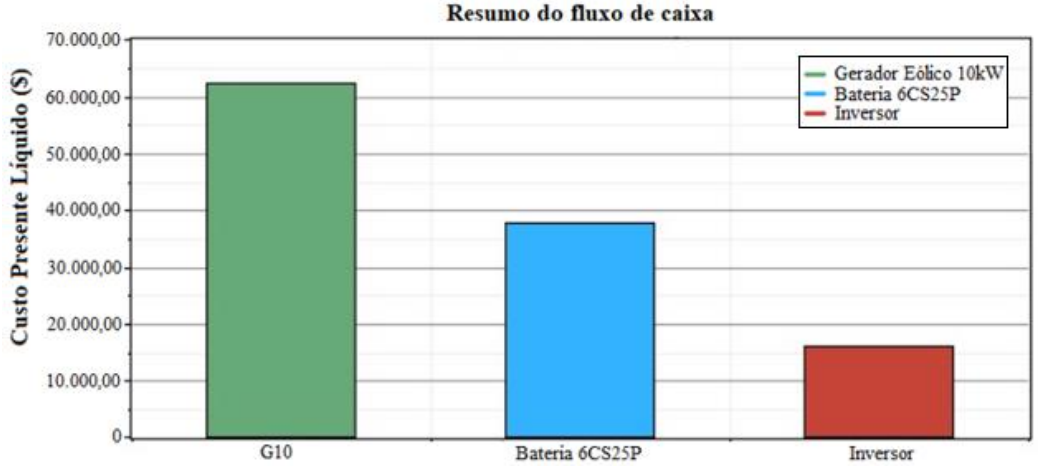
Na **Tab. 19** e **gráfico 12**, os dados associados com o fluxo de caixa do sistema são apresentados para o caso de Gravatá-PE.

Tabela 19 – Custo presente líquido (CPL) para Gravatá-PE.

Componente	Capital	Substituição	O&M	Combustível	Restituição	**Total**
	(US$)	(US$)	(US$)	(US$)	(US$)	(US$)
Eólica (G10)	54.000,00	0	8.258,00	0	0	62.258,00
Bateria 6CS25P	19.200,00	9.542,00	11.011,00	0	- 1.996,00	37.757,00
Inversor	15.840,00	0	0	0	0	15.840,00
Sistema	89.040,00	9.542,00	19.269,00	0	- 1.996,00	115.856,00

Fonte: (Autor, 2017)

Gráfico 12 – Fluxo de caixa para o sistema híbrido de Gravatá-PE.



Fonte: (Autor, 2017)

Os valores referentes à produção, a carga que deve ser atendida e o excesso de eletricidade para o caso de Gravatá-PE estão dispostos nas **Tabs. 20** a **22**. O **gráfico 13** apresenta ainda, os valores de eletricidade mensal produzida.

Tabela 20 – Produção de eletricidade por componentes / Gravatá-PE.

Componente	Produção	Fração de renováveis
	(kWh/ano)	%
Eólica (G10)	210.510	100
Total	210.510	10

Fonte: (Autor, 2017)

Tabela 21 – Carga que deve ser suprida para o caso de Gravatá-PE.

Carga	Consumo	Fração
	(kWh/ano)	%
Carga primária	68.590	100
Total	68.590	100

Fonte: (Autor, 2017)

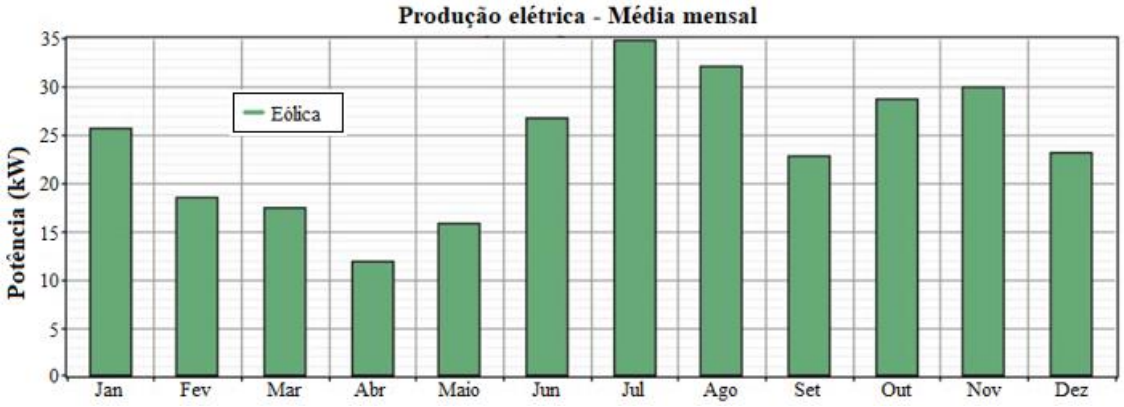
Tabela 22 – Outros valores para o caso de Gravatá-PE.

Quantidade	kWh/ano	%
Excesso de eletricidade	132.802	63,1
Carga não atendida	1.125	1,6
Fração de renováveis	1	

Fonte: (Autor, 2017)

Pela análise da **Tab. 20**, percebe-se que a geração de eletricidade proveniente da geração eólica é bem expressiva uma vez que a produção de energia solar não foi capaz de produzir uma quantidade significante de energia, e por isso, não foi considerada pela simulação.

Gráfico 13 – Produção elétrica média mensal para Gravatá-PE.



Fonte: (Autor, 2017)

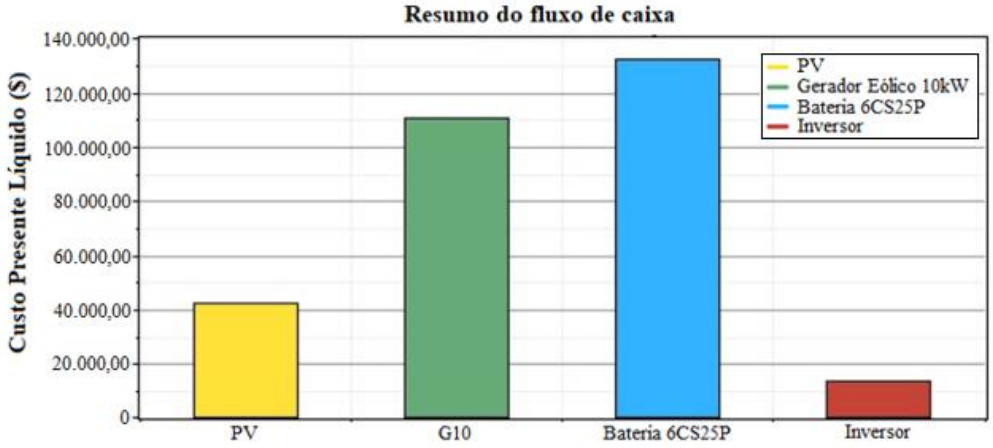
De maneira similar, na **Tab. 23** e **gráfico 14**, os dados associados com o fluxo de caixa do sistema são apresentados para o caso de Osório-RS.

Tabela 23 – Custo presente líquido (CPL) para Osório-RS.

Componente	Capital	Substituição	O&M	Combustível	Restituição	**Total**
	(US$)	(US$)	(US$)	(US$)	(US$)	(US$)
PV	36.000,00	0	6.194,00	0	0	42.194,00
Eólica (G10)	96.000,00	0	14.682,00	0	0	110.682,00
Bateria 6CS25P	67.000,00	33.396,00	38.539,00	0	- 6.984,00	132.151,00
Inversor	13.200,00	0	0	0	0	13.200,00
Sistema	212.300,00	33.396,00	59.414,00	0	- 6.984,00	298.226,00

Fonte: (Autor, 2017)

Gráfico 14 – Fluxo de caixa para sistema híbrido de Osório-RS.



Fonte: (Autor, 2017)

Os valores referentes à produção, a carga que deve ser atendida e o excesso de eletricidade para o caso de Osório-RS estão dispostos nas **Tabs. 24** a **26**. O **gráfico 15** apresenta ainda, os valores de eletricidade mensal produzida.

Tabela 24 – Produção de eletricidade por componentes / Osório-RS.

Componente	Produção	Fração de renováveis
	(kWh/ano)	%
PV	20.332	7,76
Eólica (G10)	241.638	92,24
Total	261.969	100

Fonte: (Autor, 2017)

Tabela 25 – Carga que deve ser suprida para o caso de Osório-RS.

Carga	Consumo	Fração
	(kWh/ano)	%
Carga primária	68.161	100
Total	68.161	100

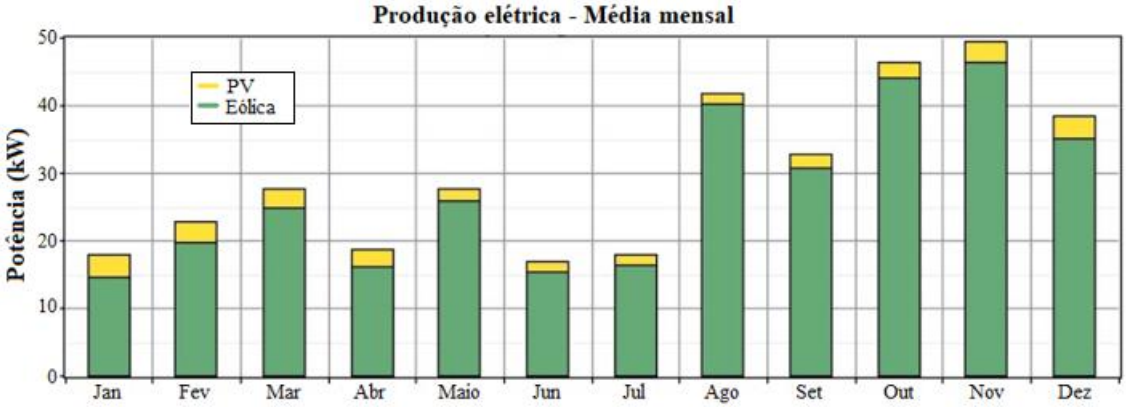
Fonte: (Autor, 2017)

Tabela 26 – Outros valores para o caso de Osório-RS.

Quantidade	kWh/ano	%
Excesso de eletricidade	180.506	68,9
Carga não atendida	1.554	2,2
Fração de renováveis	1	

Fonte: (Autor, 2017)

Gráfico 15 – Produção elétrica média mensal para Osório-RS.



Fonte: (Autor, 2017)

Fazendo-se uma discussão mais aprofundada dos resultados acima apresentados, pode-se concluir que o melhor sistema para os sítios estudados não guarda muitas similaridades nas suas configurações. Considerando o mesmo perfil de demanda energética para os dois casos, ficou evidente que o sistema para o segundo caso, Osório-RS, apresentou uma configuração que requer a utilização de um gerador fotovoltaico e uma maior quantidade de turbina eólicas e de baterias, diferenciando-se assim do primeiro caso. Evidentemente que os custos associados com a utilização do gerador fotovoltaico, de uma maior quantidade de turbinas eólicas e de baterias tornou o segundo caso, Osório-RS, mais caro do que o primeiro, Gravatá-PE.

Analisando-se a geração fotovoltaica e eólica para os dois casos, Gravatá-PE apresentou um CPL bastante atrativo, no valor de US$ 115.856,00, comparado com o CPL do projeto de Osório-RS, que foi de US$ 298.226,00, levando-se a um aumento percentual de 157,41% no custo.

As **Tabs. 19** e **23** mostraram os custos presente líquido relacionados a ambos os casos. Diante de tais valores de CPL, o valor do quilowatt-hora foi de US$ 0,147 para Gravatá-PE, frente a US$ 0,381 para o caso de Osório-RS.

As **Tabs. 20** e **24** apresentaram valores de geração de eletricidade por cada componente. É importante mencionar que a comparação da geração de eletricidade é objetivo deste estudo

de caso. O que se pode concluir acerca destes dados é que o melhor sistema para Gravatá-PE, obtido a partir das simulações do HOMER, apresentou valores de produção de eletricidade somente a partir da geração eólica, o que reduziu os custos associados aos equipamentos, tornando o sistema mais atrativo. No caso de Osório-RS, a produção de eletricidade foi oriunda tanto da fonte solar quanto da fonte eólica. Embora o sistema tenha ficado mais caro, houve uma maior produção de eletricidade do que no primeiro caso.

A **Tab. 27** apresenta a comparação entre os dois casos em estudo.

Tabela 27 – Comparação de geração elétrica.

Componente	Gravatá-PE (Produção) (kWh/ano)	Osório-RS (Produção) (kWh/ano)
PV	-	20.332
Eólica (G10)	210.510	241.638
Total	210.510	261.969

Fonte: (Autor, 2017)

Como se pode perceber, a produção de eletricidade em Gravatá-PE ficou abaixo do que a gerada pelo sítio de Osório-RS. Em uma análise mais detalhada, fica evidente que ambos os sítios tiveram boa geração eólica, o que caracterizam ambas as regiões como ótimas para este tipo de produção de eletricidade. Quanto a participação da energia solar fotovoltaica, a simulação não apresentou valores significativos para o caso de Gravatá-PE e o programa não a considerou. O sítio de Osório-RS, por outro lado, gerou uma quantidade de eletricidade a partir da fonte solar bastante considerável.

Um ponto positivo a se mencionar ainda é o fato de ambos os sistemas possuírem uma porcentagem elevada de participação das fontes de energias renováveis. Em ambos os casos estudados, houve somente a participação das fontes renováveis. O gerador diesel não apresentou viabilidade, e portanto não apareceu como uma boa alternativa.

Quanto a produção de eletricidade resultante, os seus valores podem ser analisados como um ponto negativo a ser observado caso não haja uma aplicação para o excesso de eletricidade. No caso de Gravatá-PE, a produção de eletricidade ficou acima do valor necessário, gerando um excesso de 63,1% de energia. Já para o caso de Osório-RS, esse excesso foi maior, equivalendo a um total de 68,9%. Esse valor produzido em excesso pode ser utilizado em aplicações de bombeamento de água para armazenamento em um reservatório, onde essa água pode ser utilizada para o consumo diário ou mesmo irrigação de jardins ou hortas comunitárias, dentre outras aplicações.

7 CONCLUSÃO

A utilização de fontes de energias renováveis visando gerar uma energia limpa e barata continuará a ser uma das principais metas a serem alcançadas pelas principais nações. O aumento do uso de energia proveniente do vento e do sol já é uma realidade e continuará a crescer exponencialmente nos próximos anos. Dessa forma, é de grande importância estudos que mostram a viabilidade de várias regiões para a produção de energia, haja vista que isso é um fator de desenvolvimento social e econômico para um país.

Na geração fotovoltaica, vários estudos foram publicados mostrando o potencial de várias cidades no Brasil. Uma informação básica e importante é referente aos dados de radiação solar. Essa radiação pode ser determinada diretamente, por meio do uso de instrumentos de medição, assim como pode ser determinada a partir de equações já conhecidas na literatura. Na fase de pesquisa bibliográfica, ficou evidente que os valores de coeficientes, como os da equação de *Ångström-Prescott*, já foram bastante estudados, existindo assim, valores para vários locais no país. Dessa forma, neste trabalho foram aplicados esses valores para a determinação da radiação solar nos locais objeto do estudo de caso, visando compará-los com os dados atuais de radiação constantes em base de dados nacionais e internacionais. Percebeu-se que para as localidades do estudo de caso, Gravatá-PE e Osório-RS, os dados calculados e os obtidos na base de dados do CRESESB se ajustaram bem na maioria dos meses.

Comparando-se os dados de radiação global calculados e obtidos pela base de dados do CRESESB, o erro relativo percentual para Gravatá-PE ficou abaixo de 1% para meses de fevereiro, outubro e dezembro. Agosto foi o mês em que o erro ficou próximo de 12%, o maior. Em geral, esse foi o caso onde os dados de radiação ficaram mais próximos na comparação. No caso de Osório-RS, os meses iniciais, janeiro a junho, apresentaram também um bom ajuste entre os valores coletados da base de dados e os determinados. O erro percentual para o mês de agosto foi o mais significativo, 16,01%. O mês de fevereiro apresentou um ajuste ótimo, tendo um erro relativo percentual de 0,59%, o menor. A maior discrepância foi observada nos meses de julho (10,65%), agosto (16,01%) e novembro (11,27%). Em média, para os dois casos analisados, Gravatá-PE e Osório-RS tiveram erros relativos percentuais de radiação solar global, quando comparados os dados obtidos com os coletados, de 0,76% e 4,68%, respectivamente. Esses valores compravam que para Gravatá-PE, os dados se ajustaram melhor.

Na geração eólica, foram obtidos os dados de vento a 50 m, para ambos os sítios, no período de 2006 a 2015, utilizando-se o programa computacional *Windographer*®. Os dois sítios selecionados neste trabalho, Gravatá-PE e Osório-RS, estão situados em duas circulações diferentes de vento: ventos alísios e os ventos de oeste, respectivamente. A partir dos dados obtidos, foram utilizados nove métodos diferentes (MG, MMQ, MEJ, MEL, MM, MDP, MMV, MAMV e MW) a fim de se determinar os parâmetros *k* e *c* de Weibull. Ambos os parâmetros caracterizam o regime de vento do local, informando inclusive a densidade de potência. Os resultados dos parâmetros de Weibull estimados foram ordenados após a utilização de ferramentas estatísticas. Com isso, pode-se concluir que os valores de *k* e *c* estavam de acordo com o esperado e observado na literatura. Em geral, ventos sob a influência de ventos alísios têm parâmetro de forma *k* maiores do que 4 e para ventos de oeste, os valores estão entre 1,9 e 2,9. O resultado deste estudo comprovou que para Gravatá-PE, que está em uma região de circulação de ventos alísios, o valor do parâmetro de forma (a partir do método gráfico) é igual a 5,010. Para Osório-RS, que está em uma área de circulação de ventos de oeste, o parâmetro de forma, a partir do método MAMV é igual a 2,4.

As **Figs. 15** e **16** mostram que para Gravatá-PE, os valores do parâmetro de forma *k* são bem mais elevados quando comparados com os de Osório-RS. Isto se deve pelo fato de que a circulação de vento é bastante diferente em cada local. Enquanto que para Gravatá as velocidades de vento são bastantes constantes, em Osório-RS, os ventos são variáveis e dispersos, como pode ser observado pela análise de seus valores de desvio padrão (**Tab. 9**).

A densidade de potência média foi também determinada neste trabalho. Para Gravatá-PE, o valor encontrado foi de 153,97 W/m^2. Já para o sítio de Osório-RS, o seu valor foi de 154,64 W/m^2. Considerando a densidade de potência média, fica evidente que o sítio de Gravatá-PE, embora possua um menor valor de densidade de potência média, os seus ventos são tão bons quanto o sítio de Osório-RS, pois apresentam valores de densidade de potência média bem próximos. Dessa forma, pode-se concluir que ambas as localidades possuem boas características para a geração de eletricidade a partir da fonte eólica.

No estudo de caso, considerou-se que ambos os sistemas deveriam produzir eletricidade para uma comunidade isolada, visando suprir a mesma demanda energética. Pelos resultados encontrados, pode-se concluir que a boa incidência de radiação para a localidade de Gravatá-PE não foi tão importante para a seleção do melhor sistema, sendo que a produção de eletricidade foi exclusivamente a partir da fonte eólica, pois foi a que melhor se adaptou ao

local. Em Osório-RS, a melhor configuração de sistema foi alcançada com a participação de ambas as fontes de energia, a solar e a eólica. Ambas tiveram uma boa participação na geração de eletricidade, e para a simulação, a utilização de um sistema híbrido que contivesse as duas fontes teve uma boa viabilidade, embora tenham se elevado os custos. A elevada densidade de potência nas duas localidades comprovou a excelente capacidade de produção de eletricidade a partir da fonte eólica. Em termos de custos, o projeto de Gravatá-PE foi o que apresentou um menor custo, haja vista que somente se utilizou geradores eólicos. Enquanto que em Gravatá-PE o custo foi de US$ 115.856,00, com a eletricidade saindo por US$ 0,147 por kWh, em Osório-RS o custo do projeto foi de US$ 298.226,00, com a eletricidade custando US$ 0,381 por kWh.

O estudo de caso ainda mostrou que tanto o sítio de Gravatá-PE quanto o sítio de Osório-RS, otimizado pelo HOMER, possuem uma geração de eletricidade mais limpa, uma vez que 100% de toda a produção é proveniente da fonte eólica ou a combinação de solar fotovoltaica e eólica. Ainda quanto ao resultado da otimização, como já mencionado, Gravatá-PE gera um excedente de eletricidade de 63,1%, enquanto que Osório-RS gera um excedente de 68,9%. Esses valores são elevados, mas tendo uma aplicação, pode ser de grande utilidade para a localidade em que o sistema está inserido. Uma opção de aplicação inclui o bombeamento de água para um reservatório, no qual pode servir para abastecer uma comunidade, irrigar hortas, dentre outros.

7.1 CONTRIBUIÇÕES

Este trabalho procurou fazer um levantamento e determinação de dados solares e eólicos, e caracterizar o potencial de geração de eletricidade para duas localidades no Brasil, que apresentam características diferentes, uma vez que estão em posição geográficas e sob influência de regimes de ventos diferentes. Além disso, foi realizada uma comparação entre os dados de radiação obtidos e coletados, mostrando a diferença entre esses valores. Os parâmetros de Weibull, k e c, foram determinados por diferentes métodos e ordenados de acordo com diferentes ferramentas estatísticas, de forma a caracterizar o regime de vento de ambas as regiões em que se encontram. E a partir destes valores, o estudo de caso conclui que ambas as regiões possuem bom potencial de geração de eletricidade, o que se confirma pela presença de parques eólicos já instalados nessas regiões.

7.2 TRABALHOS FUTUROS

Após o desenvolvimento deste trabalho, pode-se sugerir como recomendações para trabalhos futuros:

- ✓ Uma análise mais profunda dos dados de radiação solar, uma vez que houve uma inconsistência entre os dados determinados e coletados;
- ✓ Uma comparação entre a diferença nos parâmetros de Weibull para regiões próximas, sob a influência da mesma circulação de vento;
- ✓ Um estudo mais detalhado sobre os equipamentos disponíveis no país, como aerogeradores, painéis fotovoltaicos, inversores e baterias, e seus custos;
- ✓ A utilização de outros programas computacionais que supram as deficiências do HOMER.

REFERÊNCIAS

ABEEÓLICA. **Associação Brasileira de Energia Eólica**. 2018. Disponível em: <http://www.abeeolica.org.br/noticias/brasil-chega-a-13-gw-de-capacidade-instalada-de-energia-eolica/>. Acesso em: 07 de março de 2018.

ABSOLAR. **Associação Brasileira de Energia Solar**. 2018. Disponível em: <http://www.absolar.org.br/noticia/noticias-externas/brasil-ultrapassa-1-gw-em-usinas-solares-em-operacao-diz-associacao-do-setor.html>. Acesso em: 07 de março de 2018.

AKDAG, S. A.; DINLER, A. **A new method to estimate Weibull parameters for wind energy applications**. *Energy Conversion and Management*, v. 50, n. 7, p. 1761-1766, 2009.

ALLOUHI, A.; ZAMZOUM, O.; ISLAM, M. R.; SAIDUR, R.; KOUSKSOU, T.; JAMIL, A.; DEROUICH, A. **Evaluation of wind energy potential in Morocco's coastal regions**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 72, p. 311-324, 2017.

ALMOROX, J.; BENITO, M.; HONTORIA, C. **Estimation of monthly Ångström-Prescott equation coefficients from measured daily data in Toledo, Spain**. *Renewable Energy*, v. 30, p. 931-936, 2005.

ALVES, A. R.; VIANELLO, R. L. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa: UFV, 1991. 449 p.

ANDRADE JÚNIOR, A. S.; NOLETO, D. H.; DA SILVA, M. E.; BRAGA, D. L.; BASTOS, E. A. **Coeficientes da equação de Angström-Prescott para Parnaíba, Piauí**. *Comunicata Scientiae*, v. 3, n. 1, p. 50-54, 2012.

ANDRADE, C. F.; MAIA NETO, H. F.; ROCHA, P. A. C.; DA SILVA, M. E. V. **An efficiency comparison of numerical methods for determining Weibull parameters for wind energy applications: A new approach applied to the northeast region of Brazil**. *Energy Conversion and Management*, v. 86, p. 801-808, 2014.

ANP. **Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustivéis**. [S.l.]. 2017. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/preco/prc/Resumo_Por_Estado_Index.asp>. Acesso em: 08 de janeiro de 2018.

ARSLAN, T.; BULUT, Y. M.; YAVUZ, A. A. **Comparative study of numerical methods for determining Weibull parameters for wind energy potential**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 40, p. 820-825, 2014.

AUKITINO, T.; KHAN, M. G. M.; AHMED, M. R. **Wind energy resource assessment for Kiribati with a comparison of different methods of determining Weibull parameters**. *Energy Conversion and Management*, v. 151, p. 641-660, 2017.

AZAD, A. K.; RASUL, M. G.; ISLAM, R.; SHISHIR, I. R. **Analysis of wind energy prospect for power generation by three Weibull distribution methods.** *Energy Procedia*, v. 75, p. 722-727, 2015.

BAGEN; BILLINTON, R. **Evaluation of different operating strategies in small stand-alone power systems**. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, v. 20, n. 3, p. 654 - 660, 2005.

BAHRAMARA, S.; MOGHADDAM, M. P.; HAGHIFAM, M. R. **Optimal planning of hybrid renewable energy systems using HOMER: A review**. *Renewable and Sustainable Reviews*, v. 62, p. 609-620, 2016.

BASUMATARY, H.; SREEVALSAN, E.; SASI, K. K. **Weibull parameter estimation – a comparison of different methods**. *Wind Engineering*, v. 29, n. 3, p. 309-316, 2005.

BEKELE, G.; PALM, B. **Feasibility study for a standalone solar-wind hybrid energy system for application in Ethiopia**. *Applied Energy*, v. 87, n. 2, p. 487-495, 2010.

BEKELE, G.; TADESSE, G. **Feasibility study of small Hydro/PV/Wind hybrid system for off-grid rural electrification in Ethiopia**. *Applied Energy*, v. 97, p. 5-15, 2012.

BELÚCIO, L. P.; DA SILVA, A. P. N.; SOUZA, L. R.; MOURA, G. B. A. **Radiação solar global estimada a partir da insolação para Macapá (AP)**. *Revista Brasileira de Meteorologia*, São José dos Campos, v. 29, n. 4, p. 494-504, 2014.

BENEVIT, M. G.; SILVA, J. S.; GEWEHR, A. G.; BELUCO, A. **Subtle influence of the Weibull shape parameter on Homer optimization space of a wind-diesel hybrid gen set for use in Southern Brazil**. *Journal of Power and Energy Engineering*, v. 4, p. 38-48, 2016.

BHATTARAI, P. R.; THOMPSON, S. **Optimizing an off-grid electrical system in Brochet, Manitoba, Canada**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 53, p. 709-719, 2016.

BILIR, L.; İMIR, M.; DEVRIM, Y.; ALBOSTAN, A. **Seasonal and yearly wind speed distribution and wind power density analysis based on Weibull distribution function**. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 40, n. 44, p. 15301-15310, 2015.

BORGES NETO, M. R.; CARVALHO, P. C. M.; CARIOCA, J. O. B.; CANAFÍSTULA, F. J. F. **Biogas/photovoltaic hybrid power system for decentralized energy supply of rural areas.** *Energy Policy*, v. 38, p. 4497-4506, 2010.

BRASIL. **BEN-Balanço Energético Nacional**. Ministério de Minas e Energia (MME). Brasília, p. 296. 2017. Disponível em: < https://ben.epe.gov.br/benrelatoriosintese.aspx >. Acesso em: 20 de fevereiro de 2018.

CARNEIRO, T. C.; MELO, S. P.; CARVALHO, P. C. M.; BRAGA, A. P. S. **Particle swarm optimization method for estimation of Weibull parameters: a case study for the Brazilian Northeast region**. *Renewable Energy*, v. 86, p. 751-759, 2016.

CAVALCANTI, I. F. A. et al. **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. 463 p.

CEBALLOS, J. C.; RODRIGUES, M. L. **Estimativa de insolação mediante satélite geoestacionário: resultados preliminares**. *In*: XV Congresso Brasileiro de Meteorologia. São Paulo, 2008.

CHANG, T. P. **Performance comparison of six numerical methods in estimating Weibull parameters for wind energy application**. *Applied Energy*, v. 88, p. 275-282, 2011.

CHAURASIYA, P. K.; AHMED, S.; WARUDKAR, V. **Study of different parameters estimation methods of Weibull distribution to determine wind power density using ground based Doppler SODAR instrument**. *Alexandria Engineering Journal*, 2017. No prelo.

CHAURASIYA, P. K.; AHMED, S.; WARUDKAR, V. **Comparative analysis of Weibull parameters for wind data measured from met-mast and remote sensing techniques**. *Renewable Energy*, v. 115, 2018.

CHMIEL, Z.; BHATTACHARYYA, S. C. **Analysis of off-grid electricity system at Isle of Eigg (Scotland): Lessons for developing countries**. *Renewable Energy*, v. 81, p. 578-588, 2015.

CIEMAT. **Princípios de Conversión de la Energía Eólica**. Madrid, Espanha. 2ª Ed. 2002.

CRESESB. **Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito**. [S.l.]. 2017. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata >. Acesso em: 20 de fevereiro de 2018.

DA NÓBREGA, M. M. H.; DE AQUINO, R. R. B. **Oferta de energia através da complementaridade sazonal hidro-eólica**. *PCH Notícias & SHP News*, v. 40, p. 24-28, 2009.

DALLACORT, R.; DE FREITAS, P. S. L.; GONÇALVES, A. C. A.; REZENDE, R.; BERTONHA, A.; DA SILVA, F. F.; TRINTINALHA, M. **Determinação dos coeficientes da equação de Ångström-Prescott para a região de Palotina, estado do Paraná**. *Acta Scientiarum*, v. 26, p. 329-336, 2004.

DE SOUZA, J. L.; LYRA, G. B.; DOS SANTOS, C. M.; FERREIRA JUNIOR, R. A.; TIBA, C.; LYRA, G. B.; LEMES, M. A. M. **Empirical models of daily and monthly global solar irradiation using sunshine duration for Alagoas State, Northeastern Brazil**. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, v. 14, p. 35-45, 2016.

DÍAZ, P.; ARIAS, C. A.; PEÑA, R.; SANDOVAL, D. **FAR from the grid: a rural electrification field study**. *Renewable Energy*, v. 35, p. 2829-2834, 2010.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. 4ª. ed. New York: Wiley, 2013.

ELECTRONICA PT. **Electronica PT**, 2017. Disponível em: <https://www.electronica-pt.com/energia-solar>. Acesso em: 20 de fevereiro de 2018.

EPIA. **Global Market Outlook for Photovoltaics 2014–2018**. European Photovoltaic Industry Association. Brussels. 2014. Disponível em: <https://resources.solarbusinesshub.com/solar-industry-reports/item/global-market-outlook-for-photovoltaics-2014-2018>. Acesso em: 20 de fevereiro de 2018.

EPIA. **Global Market Outlook for Solar Power 2017-2021**. European Photovoltaic Industry Association. Brussels. 2017. Disponível em: <https://irishsolarenergy.org/news-docs/GMO_2017.pdf>. Acesso em: 20 de fevereiro de 2018.

ESTEFANEL, V.; SCHNEIDER, F. M.; BERLATO, M. A.; BURIOL, G. A.; HELDWEIN, A. B. **Insolação e radiação solar na região de Santa Maria, RS: I – Estimativa da irradiação solar incidente a partir de dados de insolação**. *Revista Centro de Ciências Rurais*, v. 20, n. 3-4, p. 203-218, 1990.

FAZELPOUR, F.; SOLTANI, N.; ROSEN, M. A. **Feasibility of satisfying electrical energy needs with hybrid systems fora medium-size hotel on Kish Island, Iran**. *Energy*, v. 73, p. 856-865, 2014.

FERNANDES, P. V. **Caracterização de regimes de vento visando o seu aproveitamento energético**. Dissertação (Mestado em Engenharia Mecânica). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, p. 107. 2005. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/12134/1/Resumo.pdf>. Acesso em: 20 de fevereiro de 2018.

FONTANA, D. C.; OLIVEIRA, D. **Relação entre radiação solar global e insolação para o estado do Rio Grande do Sul**. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v. 4, n. 1, p. 87-91, 1996.

GRAH, V. F.; PONCIANO, I. M.; BOTREL, T. A. **Potential for wind energy generation in Piracicaba, SP, Brazil**. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 18, n. 5, p. 559-564, 2014.

HOSSAIN, M.; MEKHILEF, S.; OLATOMIWA, L. **Performance evaluation of a stand-alone PV-wind-diesel-battery hybrid system feasible for a large resort center in South China Sea, Malaysia**. *Sustainable Cities and Society*, v. 28, p. 358-366, 2017.

HUSSAIN, M.; RAHMAN, L.; RAHMAN, M. M. **Techniques to obtain improved predictions of global radiation from sunshine duration**. *Renewable Energy*, v. 18, p. 263-275, 1999.

INMET. **Normais climatológicas - Instituto Nacional de Meteorologia**. 2017. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisclimatologicas>. Acesso em: 20 de fevereiro de 2018.

JERSZURKI, D.; SOUZA, J. L. M. **Parametrização das equações de Hargreaves & Samani e Ångström-Prescott para estimativa da radiação solar na região de Telêmaco Borba, Estado do Paraná**. *Ciência Rural*, v. 43, n. 3, p. 383-389, 2013.

JUÁREZ, A. A.; ARAÚJO, A. M.; ROHATGI, J. S.; DE OLIVEIRA FILHO, O. D. Q. **Development of the wind power in Brazil: Political, social and technical issues**. *Renewable and Sustainable Reviews*, v. 39, p. 828-834, 2014.

JUSTUS, C. G.; HARGRAVES, W. R.; MIKHAIL, A.; GRABER, D. **Methods for estimating wind speed frequency distributions**. *Journal of Applied Meteorology*, v. 17, p. 350-353, 1977.

JUSTUS, C. G.; MIKHAIL, A. **Height variation of wind speed and wind distribution statistics**. *Geophysical Research Letters*, v. 3, p. 261-264, 1976.

KAPLAN, O.; TEMIZ, M. **A novel method based on Weibull distribution for short-term wind speed prediction**. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 42, n. 28, p. 17793-17800, 2017.

KATINAS, V.; MARČIUKAITIS, M.; GECEVIČIUS, G.; MARKEVIČIUS, A. **Statistical analysis of wind characteristics based on Weibull methods for estimation of power generation in Lithuania**. *Renewable Energy*, v. 113, p. 190-201, 2017.

KHAN, M. J.; IQDA, M. T. **Pre-feasibility study of stand-alone hybrid energy systems for applications in Newfoundland**. *Renewable Energy*, v. 30, n. 6, p. 835-854, 2005.

KIM, H.; BAEK, S.; PARK, E.; CHANG, H. J. **Optimal green energy management in Jeju, South Korea – on-grid and off-grid electrification**. *Renewable Energy*, v. 69, p. 123-133, 2014.

KUMARAVEL, R.; VARUN, C.; SARFUDEEN, M. **Mixed Weibull Distribution: A Case Study on Ichanda, India**. *Wind Engineering*, v. 38, p. 613-620, 2014.

LAMBERT, T.; GILMAN, P.; LILENTHAL, P. **Micropower system modeling with HOMER. Integration of Alternative Sources of Energy**. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 2006. p. 379-418.

LI, C.; GE, X.; ZHENG, Y.; XU, C.; REN, Y.; SONG, C.; YANG, C. **Techno-economic feasibility study of autonomous hybrid wind/PV/battery power system for a household in Urumqi, China**. *Energy*, v. 55, p. 263-272, 2013.

LILIENTHAL, P.; GIVLER, T. L. **Using HOMER software, NREL's micropower optimization model, to explore the role of gen-sets in small solar power systems. Case study: Sri Lanka**. [S.l.], p. 31. 2005.

LIMA, F. J. L.; GUEDES, R. V. S.; DA SILVA, A. P. N.; DA SILVA, E. M. **Avaliação do potencial eólico no município de Jaguaruana, litoral Cearense**. *Ciência e Natura - UFSM*, v. 33, n. 1, p. 101-115, 2011.

LIMA, L. A.; ROSENDO, C.; FILHO, B. **Wind energy assessment and wind farm simulation in Triunfo – Pernambuco, Brazil**, *Renewable energy*, v. 35, n. 12, p. 2705-2713, 2010.

LYSEN, E. H. **Introduction to Wind Energy**. 2. ed. [S.l.]: The Netherlands: Consultancy Services Wind Energy Developing Countries, 1983.

MANWELL, J. F.; MCGOWAN, J. G.; ROGERS, A. L. **Wind Energy Explained: Theory, Design and Application**. 2ª. ed. Washington: John Wiley & Sons Ltd, 2009.

MAMAGHANI, A. H.; ESCANDON, S. A. A.; NAJAFI, B.; SHIRAZI, A.; RINALDI, F. **Techno-economic feasibility of photovoltaic, wind, diesel and hybrid electrification**

systems for off-grid rural electrification in Colombia. *Renewable Energy*, v. 97, p. 293-305, 2016.

MENDES, C. L. T.; GOMES, A. S. **Circulação nos oceanos. Correntes oceânicas e massas d'água**. Universidade Federal Fluminense - UFF. [S.l.]. 2007.

METEOTEST. **Meteonorm Global Meteorological Database**. *Meteonorm Software*, 2017. Disponível em: <http://www.meteonorm.com>. Acesso em: 20 de fevereiro de 2018.

MOHAMMADI, K.; ALAVI, O.; MOSTAFAEIPOUR, A.; GOUDARZI, N.; JALILVAND, M. **Assessing different parameters estimation methods of Weibull distribution to compute wind power density**. *Energy Conversion and Management*, v. 108, p. 322-335, 2016.

MUSELLI, M.; NOTTON, G.; LOUCHE, A. **Design of hybrid-photovoltaic power generator, with optimization of energy management**. *Solar Energy*, v. 65, n. 3, p. 143-157, 1999.

NANDI, S. K.; GHOSH, H. R. **Techno-economical analysis of off-grid hybrid systems at Kutubdia Island, Bangladesh**. *Energy Policy*, v. 38, p. 976-980, 2010.

NASAa. **Atmospheric Science Data Center - Surface meteorology and Solar Energy**, 2017. Disponível em: <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/sse.cgi?skip@larc.nasa.gov#s07>. Acesso em: 20 de fevereiro de 2018.

NASAb. **Modern-era Retrospective Analysis for Research and Application**. [S.l.]. Disponível em: < https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA/>2017. Acesso em: 20 de fevereiro de 2018.

NEOSOLAR, E. **Tipos de sistemas solares**. [S.l.]. 2016. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/sistemas-de-energia-solar-fotovoltaica-e-seus-componentes >. Acesso em: 20 de fevereiro de 2018.

NOGUEIRA, C. E. C.; VIDOTTO, M. L.; NIEDZIALKOSKI, R. K.; DE SOUZA, S. N. M.; CHAVES, L. I.; EDWIGES, T.; DOS SANTOS, D. B.; WERNCKE, I. **Sizing and simulation of a photovoltaic-wind energy system using batteries, applied for a small rural property located in the south of Brazil**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 29, p. 151-157, 2014.

OLIVEIRA FILHO, O. D. Q. **Desenvolvimento de uma metodologia para seleção de áreas de ensaios e testes de aerogeradores**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco. Recife, p. 210, 2017. Disponível em: <https://www.ufpe.br/mecfluamb/producoes >. Acesso em: 20 de fevereiro de 2018.

OZAY, C.; CELIKTAS, M. S. **Statistical analysis of wind speed using two-parameter Weibull distribution in Alaçatı region**. *Energy and Conversion Management*, v. 121, p. 49-54, 2016.

PERERA, A. T. D.; ATTALAGE, R. A.; PERERA, K. K. C. K.; DASSANAYAKE, V. P. C. **Designing standalone hybrid energy systems minimizing initial investment, life cycle cost and pollutant emission**. *Energy*, v. 54, p. 220-230, 2013.

PES, M. P.; PEREIRA, E. B.; MARENGO, J. A.; MARTINS, F. R.; HEINEMANN, D.; SCHMIDT, M. **Climate trends on the extreme winds in Brazil**. *Renewable Energy*, v. 109, p. 110-120, 2017.

PHURAILATPAM, C.; RAJPUROHIT, B. S.; WANG, L. **Planning and optimization of autonomous DC microgrids for rural and urban applications in India**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 82, p. 194-204, 2018.

RAHIMI, I.; BAKHTIARI, B.; QADERI, K.; AGHABABAIE, M. **Calibration of Angstrom equation for estimating Solar Radiation using Meta-Heuristic Harmony Search Algorithm (Case study: Mashhad-East of Iran)**. *Energy Procedia*, v. 18, p. 644-651, 2012.

RAMLI, M. A. M.; HIENDRO, A.; AL-TURKI, Y. A. **Techno-economic energy analysis of wind/solar hybrid system: Case study for western coastal area of Saudi Arabia**. *Renewable Energy*, v. 91, p. 374-385, 2016.

REHMAN, S.; ALAM, M. M.; MEYER, J. P.; AL-HADHRAMI, L. M. **Feasibility study of a wind-pv-diesel hybrid power system for a village**. *Renewable Energy*, v. 38, p. 258-268, 2012.

ROCHA, P. A. C.; DE SOUSA, R. C.; DE ANDRADE, C. F.; DA SILVA M. E. V. **Comparison of seven numerical methods for determining Weibull parameters for wind energy generation in the northeast region of Brazil**. *Applied Energy*, v. 89, p. 395-400, 2012.

SANDEEP, G.; VAKULA, V. S. **Optimal combination and sizing of a standalone hybrid power system using HOMER**. 2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT). [S.l.]. 2016.

SANTOS, C. M.; DE SOUZA, J. L.; TERAMOTO, E. T.; TIBA, C.; DE MELO, R. O. **Modelagem da irradiação solar global média horária mensal (hgh) para quatro localidades de Alagoas/Brasil**. *Nativa*, v. 2, n. 2, p. 79-88, 2014.

SEN, Z.; ÖZTOPAL, A.; SAHIN, A. **Application of genetic algorithm for determination of Angström equation coefficients**. *Energy Conversion & Management*, v. 42, p. 217-231, 2001.

SEPULVEDA, T. T.; MARTINEZ, L. **Optimization of a hybrid energy system for an isolated community in Brazil**. *International Journal of Renewable Energy Research*, v. 6, n. 4, 2016.

SHAHZAD, M. K.; ZAHID, A.; RASHID, T. U.; REHAN, M. A.; ALI, M.; AHMAD, M. **Techno-economic feasibility analysis of a solar-biomass off grid system for the electrification of remote rural areas in Pakistan using HOMER software**. *Renewable Energy*, v. 106, p. 264-273, 2017.

SHOAIB, M.; SIDDIQUI, I.; AMIR, Y. M.; REHMAN, S. U. **Evaluation of wind power potential in Baburband (Pakistan) using Weibull distribution function**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 70, p. 1343-1351, 2017.

SHPILRAIN, E. E. **Renewable energy sources charged with energy from the Sun and originated from Earth-Moon interaction, general characteristics and meteorology of wind**. [S.l.]: EOLSS Publications, v. 1, 2009.

SILVA, A. R.; PIMENTA, F. M.; ASSIREU, A. T.; SPYRIDES, M. H. C. **Complementarity of Brazil's hydro and offshore wind power**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 56, p. 413-427, 2016.

SILVA, G. **Características de vento da região Nordeste: Análise, modelagem e aplicações para projetos de centrais eólicas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco. Recife, p. 131. 2003. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/5432>. Acesso em: 20 de fevereiro de 2018.

SILVA, M. C. C. **Estudo comparativo de um painel solar fotovoltaico fixo vs móvel**. Dissertaão (Mestrado em Engenharia Eletrônica Industrial e Computadores). Universidade do Minho. Braga, p. 103. 2012. Disponível em: <http://intranet.dei.uminho.pt/gdmi/galeria/temas/pdf/23923.pdf >. Acesso em: 20 de fevereiro de 2018.

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

SILVEIRA, E. F.; DE OLIVEIRA, T. F.; BRASIL JUNIOR, A. C. P**. Hybrid energy scenarios for Fernando de Noronha archipelago**. *Energy Procedia*, v. 75, p. 2833-2838, 2015.

SUCHAROV, E. C.; DOMINGUES, M. O.; SILVA, A. L. M. **O modelo de Weibull, para distribuições de velocidade do vento, no Estado do Rio de Janeiro**. Congresso Brasileiro de Meteorologia. Salvador: Anais SBMET. 1990. p. 593-597.

SUEHRCKE, H. **On the relationship between duration of sunshine and solar radiation on the earth's surface: angstrom's equation revisited**. *Solar Energy*, v. 68, p. 417-425, 2000.

TAMRAT, B. **Comparative analysis of feasibility of solar PV, wind and micro hydropower generation for rural electrification in the selected sites of Ethiopia**. Addis Ababa University. [S.l.]. 2007.

TEIXEIRA, A. H. C. **Relação entre a radiação solar global e insolação no município de Petrolina-PE**. Florianópolis. 1999. Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 11ª Reunião Latino-Americana de Agrometeorologia.

TIBA, C. **Solar radiation in the Brazilian Northeast**. *Renewable Energy*, v. 22, p. 565-578, 2001.

TIBA, C. **Novos coeficientes de Angstrom para a estimação da radiação solar no Nordeste do Brasil**. In: AGRENER 2002 - IV Encontro de Energias no Meio Rural, 2002, Campinas. São Paulo, 2002.

USTA, I. **An innovative estimation method regarding Weibull parameters for wind energy applications**. *Energy*, v. 106, p. 301-314, 2016.

WAIS, P. **Two and three-parameter Weibull distribution in available wind power analysis**. *Renewable Energy*, v. 103, p. 15-29, 2017.

WANDERLEY, A. C. F. **Perspectivas de inserção da energia solar fotovoltaica na geração de energia elétrica no Rio Grande do Norte**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, p. 150. 2013.

WERAPUN, W.; TIRAWANICHAKUL, Y.; WAEWSAK, J. **Comparative study of five methods to estimate Weibull parameters for wind speed on Phangan Island, Thailand**. *Energy Procedia*, v. 79, p. 976-981, 2015.

WILD, M. et al. **Projections of long-term changes in solar radiation based on CMIP5 climate models and their influence on energy yields of photovoltaic systems**. *Solar Energy*, v. 116, p. 12-24, 2015.

WINDOGRAPHER. 2017. Disponível em: <https://www.windographer.com/>. Acesso em: 20 de fevereiro de 2018.

APÊNDICE - TRABALHOS PUBLICADOS DURANTE O MESTRADO

- **Periódicos indexados**

1. **Wênio Fhará A. Borges**, Janardan S. Rohatgi, Oyama Douglas Q. de Oliveira Filho, Alex Maurício Araújo, Maurílio J dos Santos. **Evaluation of Different Methods in the Estimation of Weibull Parameters in Two Distinct Wind Circulations in Brazil**. Energy Conversion and Management. Artigo submetido, 2017, Under Review. **Qualis CAPES:** A1
2. Oyama Douglas Q. de Oliveira Filho, **Wênio Fhará A. Borges**, Antônio M. Soares Júnior, Gilberto M. de Melo, Janardan S. Rohatgi, Alex Maurício Araújo. **Analysis of Wind Data Measured Simultaneously of Two Widely Separated Sites in Brazil: Trade Winds and Westerlies Wind Regimes**. International Journal of Green Energy. Artigo submetido, 2017, Under Review. **Qualis CAPES:** B1

- **Anais de congressos**

1. **W. Borges**, A. Araújo, A. Silva, C. Ferreira, C. Bezerra, C. Santos, E. Fernandes, G. Melo, G. Rocha, L. Andrade. **Optimization of a standalone PV-Wind-Diesel-Battery hybrid system feasible for a university restaurant in Recife, Brazil**. Artigo apresentado e publicado, COBEM 2017, Curitiba-Brasil.
2. O. de Oliveira Filho, A. Araújo, A. Silva, C. Bezerra, C. Santos, E. Fernandes, G. Rocha, L. Andrade, **W. Borges**, D. Ribeiro. **Analysis of Weibull parameters for wind power generation**. Artigo apresentado e publicado, COBEM 2017, Curitiba-Brasil.
3. C. Santos, A. Silva, S. Diógenes, A. Araújo, E. Fernandes, C. Bezerra, **W. Borges**, E. Calheiros, L. Andrade. **5 MW and 2 MW NREL wind turbines simulation comparison for steady loading calculations**. Artigo apresentado e publicado, COBEM 2017, Curitiba-Brasil.
4. C. Bezerra, A. Araújo, A. Silva, E. Fernandes, E. Menezes, G. Rocha, V. Rodrigues, **W. Borges**. **An assessment of different turbulence models on a CFD simulation o fair flow past a S814 airfoil**. Artigo apresentado e publicado, COBEM 2017, Curitiba-Brasil.

ANEXO A - MODELOS UTILIZADOS PELO PROGRAMA HOMER

1. Cálculo da potência gerada a partir do gerador fotovoltaico (PPV)

O HOMER usa a seguinte equação para calcular a potência de saída do gerador fotovoltaico:

$$P_{PV} = Y_{PV} f_{PV} \left(\frac{\bar{G}_T}{\bar{G}_{T,STC}} \right) \left[1 + \alpha_P \left(T_c - T_{c,STC} \right) \right],$$

em que:

Y_{PV}	É a capacidade nominal do gerador fotovoltaico, ou seja, sua potência sob condições de teste padrão (STC) [kW];
f_{PV}	É o fator de redução do gerador fotovoltaico [%];
$\bar{G}_T$	É a radiação solar incidente no gerador fotovoltaico no período de tempo atual [kW/m^2];
$\bar{G}_{T,STC}$	É a radiação incidente em condições de teste padrão (STC) [1 kW/m^2];
α_P	É o coeficiente de temperatura [%/°C];
T_c	É a temperatura da célula fotovoltaica no período de tempo atual [%];
$T_{c,STC}$	É a temperatura da célula fotovoltaica em condições de teste padrão [25 °C].

Se não for considerado o efeito de temperatura quando for inserir os dados fotovoltaicos, o HOMER assume que o efeito de temperatura é zero. Assim, a equação acima assume a seguinte forma:

$$P_{PV} = Y_{PV} f_{PV} \left(\frac{\bar{G}_T}{\bar{G}_{T,STC}} \right).$$

2. Cálculo da potência gerada pela turbina eólica

O HOMER calcula a potência de saída da turbina eólica em cada período de tempo. Isso implica em um processo com três passos. O primeiro passo é calcular a velocidade do vento na altura do cubo da turbina e, em seguida, é calculada a quantidade de energia que a turbina eólica produziria nessa velocidade do vento considerando a massa específica de ar padrão. Por último, então, é ajustado esse valor de potência de saída considerando a massa específica do ar.

Em cada período de tempo, o HOMER calcula a velocidade de vento na altura do cubo da turbina usando os dados de entrada que são especificados ao programa. Para calcular a velocidade na altura do cubo da turbina, pode-se utilizar a lei logarítmica ou a lei de potência.

Lei logarítmica:

$$U_{hub} = U_{anem} \cdot \frac{\ln\left(z_{hub}/z_0\right)}{\ln\left(z_{anem}/z_0\right)}.$$

Lei de potência:

$$U_{hub} = U_{anem} \cdot \left(\frac{z_{hub}}{z_{anem}}\right)^{\alpha}.$$

em que:

U_{hub}	É a velocidade do vento na altura do cubo da turbina eólica [m/s];
U_{anem}	É a velocidade do vento na altura do anemômetro [m/s];
z_{hub}	É a altura do cubo da turbina eólica [m];
z_{anem}	É a altura do anemômetro [m];
z_0	É o comprimento de rugosidade da superfície [m];
$\ln(...)$	É o logaritmo natural;
α	É o expoente da lei de potência.

Após o HOMER determinar a velocidade do vento na altura do cubo, ele se refere à curva de potência da turbina eólica para calcular a potência de saída que se esperaria daquela turbina para essa velocidade do vento sob condições padrão de temperatura e pressão.

As curvas de potência normalmente especificam o desempenho da turbina eólica em condições de temperatura e pressão padrão (STP). Para ajustar as condições reais, o HOMER multiplica o valor da potência prevista pela curva de potência pela relação de massa específica do ar, de acordo com a seguinte equação:

$$P_{WT} = \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right) \cdot P_{WT,STP},$$

em que:

P_{WT}	É a potência de saída da turbina eólica [kW];
$P_{WT,STP}$	É a potência de saída da turbina eólica em condições padrão de temperatura e pressão [kW];
ρ	É a massa específica do ar atual [kg/m^3];

ρ_0 É a massa específica do ar em condições padrão de temperatura e pressão [1,225 kg/m^3].

3. Cálculo de perdas

O modelo que caracteriza o desempenho dos sistemas fotovoltaicos no HOMER é muito simples. Ele considera um desempenho linear entre a radiação e um fator de redução escalar, que leva em conta todas as outras perdas, incluindo as perdas térmicas, por sujeiras, espectrais, por incompatibilidades e de fiação. Como os sistemas fotovoltaicos autônomos geralmente são projetados para os cenários considerados como "pior caso" (por exemplo, longos períodos nublados, cargas máximas), há períodos em que a energia produzida pelo sistema não é utilizável e, portanto, a necessidade de representações precisas do desempenho de sistemas fotovoltaicos em qualquer instante é desnecessária.

4. Modelo Econômico

O modelo econômico utilizado nas simulações pelo HOMER é baseado no custo presente líquido (CPL) que é o custo total de instalação e operação do sistema ao longo da sua vida útil.

O HOMER modela cada sistema individualmente, por meio das simulações em intervalos horários de tempo durante um ano (LILIENTHAL e GIVLER, 2005). Ramli, Hiendro e Al-Turki (2016) calculam o CPL para um sistema utilizando a seguinte expressão:

$$C_{CPL,tot} = \frac{C_{anual,tot}}{CRF\left(i, R_{proj.}\right)},$$

em que $C_{anual,tot.}$ é o custo total anualizado ($/ano), i é a taxa juros anual (%), $R_{proj.}$ é a vida útil do projeto (anos), *FRC* representa o fator de recuperação de capital, que é uma razão dada por:

$$FRC\left(i, N^*\right) = \frac{i\left(1+i\right)^{N^*}}{\left(1+i\right)^{N^*} - 1},$$

em que N^* e i são respectivamente, a quantidade de anos e a taxa de juros anual, respectivamente.

O CPL inclui todos os custos e receitas que ocorrem dentro da vida útil do projeto, com o fluxo de caixa futuro descontado para o presente. No CPL, os custos são positivos e as receitas negativas. Isso é o oposto ao Valor Presente Líquido (VPL). Portanto, a diferença entre o CPL e o VPL está somente no sinal. O custo presente líquido (CPL) inclui o custo de capital inicial dos componentes do sistema, o custo de qualquer reposição de equipamento que ocorra durante a vida útil do projeto, o custo de manutenção e combustível, e o custo de compra de energia da rede elétrica (LAMBERT, GILMAN e LILENTHAL, 2006).

Nas simulações, o HOMER utiliza a taxa de juros real anual ao invés da taxa de juros nominal (HOSSAIN, MEKHILEF e OLATOMIWA, 2017). A taxa de juros anual pode ser obtida da seguinte forma:

$$i = \frac{i' - f}{1 + f},$$

em que i é a taxa de juros real anual, i' é a taxa de juros nominal, e f é a taxa anual de inflação.

O custo médio por kWh de eletricidade é chamado de custo de energia (COE) pelo programa. O COE é calculado pela razão entre o custo total anualizado e a eletricidade anual fornecida para a rede, que é representada por (RAMLI, HIENDRO e AL-TURKI, 2016):

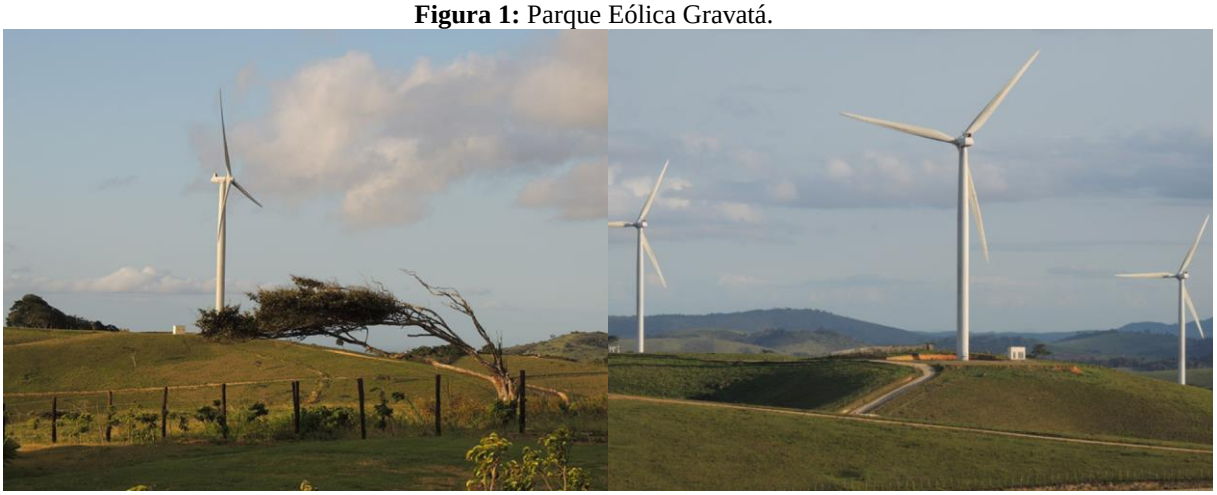
$$COE = \frac{C_{anual,tot.}}{E_{fornecida}}.$$

ANEXO B - PARQUES EÓLICOS INSTALADOS

1) Gravatá-PE

O parque “Eólica Gravatá” é um empreendimento da Eólica Tecnologia Ltda. Está localizado no município de Gravatá-PE, possui capacidade total instalada de 20 MW de potência. São 12 aerogeradores instalados, da marca *Vestas Turbine* e modelo *Vestas V82 1.65 MW HH70*. As turbinas eólicas possuem 70m de altura e 82m de diâmetro. A potência instalada atende uma população de 160 mil habitantes (Eólica Tecnologia Ltda, 2018).

Figura 1: Parque Eólica Gravatá.



Fonte: (Eólica Tecnologia Ltda, 2018)
Disponível em: http://www.eolica.com.br/?s=gravata

2) Osório-RS

O complexo eólico de Osório é formado por 9 parques de energia eólica no município de Osório, no Rio Grande do Sul, Brasil, com 150 aerogeradores de 2 MW, marca *Wobben Windpower* e modelo *E-70/2000 KW*. A capacidade total instalada é de 300 MW, sendo que a produção efetiva média é de aproximadamente 51 MW (suficiente para uma cidade de 240 mil habitantes). A obra é um empreendimento da Ventos do Sul Energia, pertencente à espanhola Enerfin/Enervento (Grupo Elecnor) com 90%, à alemã Wobben Windpower (subsidiária da ENERCON GmbH) com 9% e à brasileira CIP Brasil, com 1% (Wikipédia, 2018).

Figura 2: Complexo Eólico de Osório.

Fonte: (Wikipédia, 2018)
Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Complexo_E%C3%B3lico_de_Os%C3%B3rio