



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

BRUNO DIAS AGUIAR MATOS

ANÁLISE DOS RECURSOS ENERGÉTICOS E SUA
COMPLEMENTARIDADE NA VIABILIDADE DE SISTEMAS DE
GERAÇÃO HÍBRIDOS SOLAR - EÓLICO.

FORTALEZA
2019

BRUNO DIAS AGUIAR MATOS

ANÁLISE DOS RECURSOS ENERGÉTICOS E SUA COMPLEMENTARIDADE
NA VIABILIDADE DE SISTEMAS DE GERAÇÃO HÍBRIDOS SOLAR - EÓLICO.

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação,
apresentado ao Departamento de Engenharia
Elétrica, da Universidade Federal do Ceará,
Como requisito parcial para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Elétrica.
Área de aplicação: Energias Renováveis.
Orientador: Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho.

FORTALEZA
2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M381a Matos, Bruno Dias Aguiar Matos.
Análise dos recursos energéticos e sua complementaridade na viabilidade de sistemas de geração híbridos solar - eólico. / Bruno Dias Aguiar Matos Matos. – 2019.
80 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2019.

Orientação: Prof. Dr. Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho.
Coorientação: Prof. Shakil Bonnet Jossib Ribeiro.

1. Sistemas de geração híbridos.. I. Título.

CDD 621.3

BRUNO DIAS AGUIAR MATOS

ANÁLISE DOS RECURSOS ENERGÉTICOS E SUA COMPLEMENTARILIDADE
NA VIABILIDADE DE SISTEMAS DE GERAÇÃO HÍBRIDOS SOLAR - EÓLICO.

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação,
apresentado ao Departamento de Engenharia
Elétrica, da Universidade Federal do Ceará,
Como requisito parcial para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Elétrica.
Área de aplicação: Energias Renováveis.
Orientador: Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Prof. Dr. Sérgio Daher
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Amanda Freitas Araújo
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Shakil Bonnet Jossob Ribeiro
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiro a minha família em especial a minha mãe que sem ela eu não seria nada.

Ao Prof. Paulo Cesar Marques de Carvalho, pelas orientações, ensinamentos e incentivos.

Aos participantes da banca, professor Sérgio Daher, Amanda Freitas de Araújo pelas valiosas colaborações e sugestões.

A Shakil Ribeiro, por ter contribuído ativamente na realização deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) por fornecer os dados necessários para a realização deste trabalho.

A todos os servidores (docentes e técnicos administrativos) do departamento Engenharia Elétrica.

RESUMO

O presente trabalho apresenta como objetivo principal a avaliação de desempenho técnico-financeiro de Sistemas Híbrido Eólico-Fotovoltaico (SHEFV), aplicado a uma carga residencial, com o objetivo de analisar o impacto dos recursos energéticos e sua complementaridade, na elaboração de projetos de sistemas híbridos de geração de energia elétrica. Para avaliar o impacto das fontes de energia, foram realizados dois projetos de sistemas híbridos, um deles localizado em Parnaíba e outro em Petrolina. Os componentes dos sistemas híbridos como, sistema fotovoltaico (FV), inversor, turbina eólica e baterias, foram escolhidos através de pesquisa no mercado e levando em consideração o dimensionamento realizado pelo Homer Pro. Com a análise dos projetos foi concluído que Petrolina por ter melhor complementariedade das fontes solar – eólica é a melhor opção para projetos de sistemas híbridos, apresentando custo para realizar o projeto 1,2% menor em relação ao mesmo projeto realizado em Parnaíba, além de ser a recomendada para o uso de usinas FV por ter médias de irradiação 5,3% superior à encontrada em Parnaíba, o que torna o projeto FV em Petrolina 9,05% mais barato. Já Parnaíba é a melhor opção para o projeto de uma usina inteiramente eólica, pois como esperado de uma cidade litorânea do nordeste brasileiro, Parnaíba possui media de velocidade do vento 7,45% maiores do que a de Petrolina o que torna o projeto eólico 4,3% mais barato do que em Petrolina.

Palavras-chave: Fontes renováveis. Sistema híbrido eólico-fotovoltaico.

ABSTRACT

The main objective of the present work is to evaluate the technical and financial performance of SHFV, applied to a residential load with the objective of analyzing the impact of energy resources and their complementarity in the elaboration of projects of hybrid systems of photovoltaic power generation. In order to evaluate the impact of energy sources, two hybrid system projects were carried out, one located in Parnaíba and another in Petrolina. The components of the hybrid systems such as photovoltaic (PV) system, inverter, wind turbine and batteries were chosen through market research and taking into account the sizing done by Homer Pro. After the analysis of the projects it was concluded that Petrolina for having better complementarity of solar - wind power sources is the best option for hybrid systems projects, with a cost of 1.2% less in relation to the same project carried out in Parnaíba, besides being recommended for the use of PV plants due to having averages of irradiation 5.3% higher than that found in Parnaíba, which makes the PV project in Petrolina 9.05% cheaper. Parnaíba is the best option for the project of an entirely wind power plant, as expected from a coastal city in northeastern Brazil, Parnaíba has a wind speed average 7.45% higher than that of Petrolina, which makes wind project 4 , 3% cheaper than in Petrolina.

Keywords: Renewable sources. Wind-photovoltaic hybrid system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Matriz energética brasileira em 2018, Fonte: Empresa de Pesquisa Energética – EPE.....	14
Figura 2 – Projeção do crescimento de micro geração distribuída,.....	15
Figura 3 – Exemplo de Sistema Híbrido.....	17
Figura 4 – Sistema de geração híbrida eólica-diesel.....	19
Figura 5 – Esquemático de um sistema solar – Diesel.....	20
Figura 6 – Esquemático de um sistema eólico – solar – diesel.....	20
Figura 7 – Esquemático de um sistema híbrido eólico – fotovoltaico.....	21
Figura 8 – Exemplo de Sistema fotovoltaico.....	22
Figura 9 – Componentes de um aerogerador.....	23
Figura 10 – Ilustração de um sistema eólico.....	24
Figura 11 – Principais componentes de uma bateria chumbo – ácido... ..	25
Figura 12 – Imagem de alguns Inversores de frequência.....	26
Figura 13 – Estratégias de desconexão.	27
Figura 14 – Movimento da terra em relação ao sol.....	28
Figura 15 – Irradiação no território brasileiro.	29
Figura 16 – Representação esquemática das diferentes regiões eólicas brasileiras (a) Litoral Norte – Nordeste; (b) Litoral Nordeste - Sudeste; e (c) Nordeste Continental Fonte: Silva (2003).....	30
Figura 17 – Complementabilidade dos recursos de velocidade do vento e irradiação diária típica.....	32
Figura 18 – Direção e velocidade do vento em m/s em Petrolina.....	33
Figura 19 – Irradiação média diária por mês em Petrolina.....	34
Figura 20 – Direção e velocidade do vento em m/s em.....	35
Figura 21 – Dados de Irradiação de Parnaíba.....	36
Figura 22 – Inicializando um projeto no Homer pro.....	38
Figura 23 – Selecionando a Localidade do Projeto.	38
Figura 24 – Selecionando as fontes de energia da localização do projeto.....	39
Figura 25 – Dados de Irradiação do projeto.....	39
Figura 26 – Dados de Velocidade de vento do projeto.....	40
Figura 27 – Selecionando parâmetros da carga do projeto.....	40
Figura 28 – Dados da carga do projeto.....	41
Figura 29 – Adicionando um sistema fotovoltaico ao projeto.....	41
Figura 30 – Características do sistema fotovoltaico do projeto.....	42
Figura 31 – Adicionando sistema de geração eólico no projeto.....	42
Figura 32 – Características do sistema eólico do projeto.....	43
Figura 33 – Características do inversor usado no projeto.....	44
Figura 34 – Adicionando sistema de armazenamento ao projeto.....	44
Figura 35 – Características do sistema de armazenamento do projeto.....	45
Figura 36 – Homer pró calculando os resultados. Fonte: Autor.....	45
Figura 37 – Resultados do Homer pro para os parâmetros selecionados.....	46
Figura 38 – Dados elétricos de um projeto no Homer pro.....	47
Figura 39 – Figura 39 – Tela de gráficos do projeto.....	47
Figura 40 – Custo financeiro do projeto.....	48
Figura 41 – Fluxo de caixa do projeto.....	48
Figura 42 – Local do Projeto Selecionado no Homer Pro.....	51
Figura 43 – Dados de Temperatura de Petrolina.....	51
Figura 44 – Características de Irradiação Do Projeto de Petrolina.....	52
Figura 45 – Características de Velocidade do vento do projeto de Petrolina.....	52
Figura 46 – Carga Usada no projeto.....	53
Figura 47 – Parâmetros do sistema fotovoltaico adotados.....	54

Figura 48 – Parâmetros do sistema de armazenamento do projeto.....	55
Figura 49 – Parâmetros do inversor do projeto.....	56
Figura 50 – Parâmetros do sistema eólico do projeto.....	56
Figura 51 – Localização do Projeto de Parnaíba.....	58
Figura 52 – Dados de Temperatura de Parnaíba.....	58
Figura 53 – Parâmetros de irradiação solar usados no Projeto de Parnaíba.....	59
Figura 54 – Parâmetros de velocidade do vento utilizados no Projeto de Parnaíba.....	59
Figura 55 – Complementariedade das médias mensais das fontes de energia de Petrolina.....	64
Figura 56 – Complementariedade das médias mensais das fontes de energia de Parnaíba.....	65
Figura 57 – Perfil diário por mês de velocidade do vento de Petrolina.....	66
Figura 58 – Perfil diário por mês de irradiação de Petrolina.....	66
Figura 59 – Perfil diário por mês de velocidade do vento de Parnaíba.....	67
Figura 60 – Perfil diário por mês de irradiação de Parnaíba.....	67
Figura 61 – Dados de geração de energia elétrica do sistema híbrido de Petrolina.....	68
Figura 62 – Dados de geração de energia elétrica do sistema híbrido de Parnaíba.....	68
Figura 63– Complementariedade de Petrolina alterada.....	69
Figura 64 – Resultados do sistema de Petrolina modificado.....	70
Figura 65 – Comportamento do estado da carga das baterias quando temos recursos energéticos complementares.....	70
Figura 66 – Comportamento do estado da carga das baterias, quando temos recursos energéticos não complementares.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Vantagens e Desvantagens de sistemas híbridos.....	18
Tabela 2 – Sub-regiões do nordeste brasileiro.....	31
Tabela 3 – Velocidade do vento média ao longo de um ano em Petrolina.....	33
Tabela 4 – Média de irradiação por dia em cada mês em Petrolina.....	34
Tabela 5 – Dados de Velocidades médias do vento médias por dia a cada mês de Parnaíba.....	35
Tabela 6 – Dados de Irradiação usados no Projeto do sistema de Parnaíba.....	36
Tabela 7 – Comparativo dos métodos de dimensionamento.....	50
Tabela 8 – lista de materiais típicos de um sistema fotovoltaico.....	54
Tabela 9 – Resultados do Homer para o projeto em Petrolina.....	59
Tabela 10 – Resultados do Homer para o projeto em Parnaíba.....	60
Tabela 11 – Resultados Financeiros dos projetos em Petrolina.....	61
Tabela 12 – Resultados Financeiros dos projetos em Parnaíba.....	62
Tabela 13 – Comparativo dos dados de irradiação de Petrolina e Parnaíba.....	62
Tabela 14 – Comparativo dos dados de irradiação de Petrolina e Parnaíba.....	63

LISTA DE SÍMBOLOS

A	ampère
Ah	ampère-hora
CA	corrente alternada
CC	corrente contínua
EDC	estado de carga
FC	fator de capacidade
h	hora
i	corrente
FV	fotovoltaico
P	potência ativa
SHEFV	Sistema Híbrido Eólico Fotovoltaico
Pwt	potencia nominal do aerogerador
Ppv Potencia	nominal do sistema fotovoltaico
R\$	real
s	Segundo
SHEFV	Sistema Híbrido Eólico Fotovoltaico
V	volt
VA	volt-ampère
W	watt
W/m ²	watt por metro quadrado
Wh	watt-hora
W _p	watt-pico
VPL	valor presente líquido
Kcf	fator de capacidade
Kcfpv	fator de capacidade do sistema fotovoltaico
Kcftw	fator capacidade do sistema eólico

SUMÁRIO

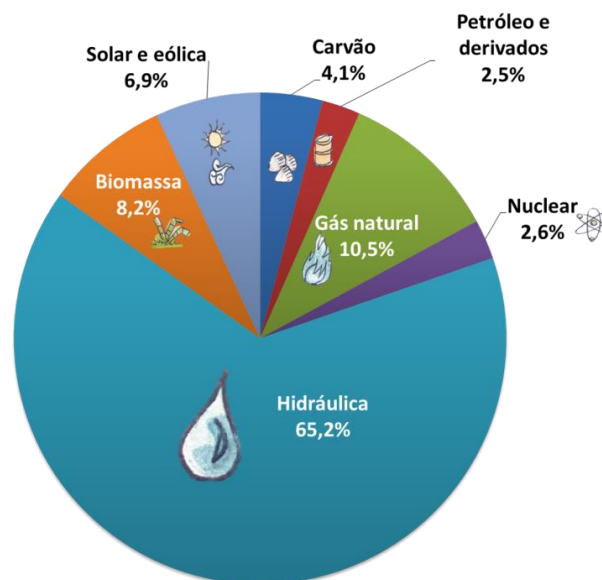
1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	16
1.2	Estrutura do trabalho	16
2	SISTEMAS HÍBRIDOS	17
2.1	Breve introdução a sistemas híbridos	17
2.2	Vantagens e desvantagens de sistema híbrido	18
2.3	Sistemas Híbridos no Brasil e no Mundo	18
2.4	Tipos de sistemas híbridos	19
2.4.1	<i>Sistema eólico diesel</i>	19
2.4.2	<i>Sistema Fotovoltaico – Diesel</i>	19
2.4.3	<i>Sistema Eólico - Fotovoltaico – Diesel</i>	20
2.4.4	<i>Sistema Eólico – Fotovoltaico</i>	20
2.5	Componentes de um sistema híbrido	21
2.5.1	<i>Unidades de geração</i>	21
2.5.1.1	<i>Sistemas fotovoltaicos</i>	21
2.5.1.2	<i>Sistemas de geração eólica</i>	22
2.5.2	<i>Sistemas de armazenamento de energia</i>	24
2.5.3	<i>Sistema de controle</i>	26
2.5.4	<i>Inversores</i>	26
2.5.5	<i>Controladores de carga</i>	27
2.5.6	<i>Retificadores</i>	27
3	RECURSOS ENERGÉTICOS	28
3.1	Irradiação solar no nordeste brasileiro	28
3.2	Mecanismos de vento no nordeste brasileiro	29
3.3	Complementariedade dos recursos energéticos	31
3.4	Dados de recursos energéticos de Petrolina	32
3.4.1	<i>Dados de velocidade do vento em Petrolina</i>	32
3.4.2	<i>Dados de Irradiação de Petrolina</i>	34
3.5	Dados de recurso energético de Parnaíba	34
3.5.1	<i>Velocidade do vento de Parnaíba</i>	35
3.5.2	<i>Dados de Irradiação de Parnaíba</i>	36
4	HOMER PRO	37
4.1	Introdução ao Homer Pro	37
4.2	Realizando um projeto no Homer Pro	37
4.2.1	<i>Criando um novo projeto</i>	38
4.3	Análises de projeto usando o Homer Pro	46

4.3.1	<i>Dados Elétricos</i>	46
4.3.2	<i>Dados Financeiros</i>	47
4.4	Validando o Homer Pro	49
5	REALIZANDO OS PROJETOS DE PETROLINA E PARNAÍBA	51
5.1	Projeto em Petrolina	51
5.1.1	<i>Local do projeto em Petrolina</i>	51
5.1.2	<i>Recursos Energéticos do Projeto de Petrolina</i>	52
5.1.3	<i>Carga do Projeto</i>	53
5.1.4	<i>Sistema fotovoltaico do projeto</i>	54
5.1.5	<i>Armazenamento do Projeto</i>	55
5.1.6	<i>Inversor do Projeto</i>	55
5.1.7	<i>Sistema Eólico do projeto</i>	56
5.1.8	<i>Resultados do projeto de Petrolina</i>	57
5.2	Projeto em Parnaíba	57
5.2.1	<i>Localização do Projeto de Parnaíba</i>	57
5.2.2	<i>Recursos energéticos do projeto de Parnaíba</i>	59
5.2.3	<i>Componentes do projeto de Parnaíba</i>	60
5.2.4	<i>Resultados do Projeto de Parnaíba no Homer Pro</i>	60
6.	ANALISE DOS RESULTADOS	61
6.1	Avaliando os resultados do Homer pro	61
6.2	Análise dos recursos energéticos disponíveis em Petrolina e Parnaíba	62
6.2.1	<i>Comparativo da irradiação</i>	62
6.2.2	<i>Comparativo da velocidade do vento</i>	63
6.3	Complementariedade dos recursos energéticos nos projetos	64
6.3.1	<i>Complementariedade ao longo do ano</i>	64
6.3.2	<i>Complementariedade diária das fontes de energia</i>	65
6.4	Análises elétricas dos sistemas híbridos de Petrolina e Parnaíba	68
7	CONCLUSÃO	72
	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	74
	REFERÊNCIAS	74
	ANEXO A–DADOS TÉCNICOS DO INVERSOR ESCOLHIDO	77
	ANEXO B–DADOS TÉCNICOS DA BATERIA DO PROJETO	79
	ANEXO C–DADOS TÉCNICOS DOS PAINÉIS DOS PROJETOS	80
	ANEXO D–DADO TÉCNICOS DOS GERADORES EÓLICOS USADOS	81

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por energia, a necessidade de atender regiões de difícil acesso e a busca por fonte de energia limpa são alguns dos desafios que a humanidade enfrenta nos dias modernos. Especialmente no Brasil, é extremamente desafiante criar uma infraestrutura capaz de atender a demanda de todas as regiões do país de maneira satisfatória. Até então a principal fonte energética do país é a geração por meio de grandes centrais hidroelétricas. Essa dependência do Brasil de uma fonte de energia elétrica, mesmo que seja uma fonte energética renovável, é problemática já que é uma fonte que está chegando ao seu limite de capacidade técnica de geração e estão sujeitas a períodos de estiagem que eventualmente inviabilizam o seu uso. Outro problema ao se utilizar hidrelétricas é a necessidade de longas linhas de transmissão para atender a demanda de energia elétrica no maior espaço geográfico possível, o Brasil sendo o quinto maior país do mundo em área geográfica, torna toda a rede de transmissão e distribuição de energia, ao se utilizar hidrelétricas, ser muito onerosa e ineficiente. Abaixo a figura 1 mostra a matriz energética brasileira em 2018.

Figura 1 – Matriz energética brasileira em 2018.



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2019.

Segundo a Agência Internacional de Energia (AIE, 2014) é estimado que 1,5 bilhões de pessoas no mundo não possuem acesso à rede elétrica e a Organização das Nações Unidas (ONU), relatou na Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável (RIO +20) que cerca de 1,6 bilhões de pessoas vivem em regiões com escassez de água potável absoluta e que até 2025, 2/3 da população mundial pode ser afetada por condições críticas de abastecimento de água. Segundo o IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) em 2015 ainda havia cerca de 620 mil brasileiros (correspondente a 0,3% da população) sem acesso a energia elétrica, situação confortável quando comparado ao cenário mundial.

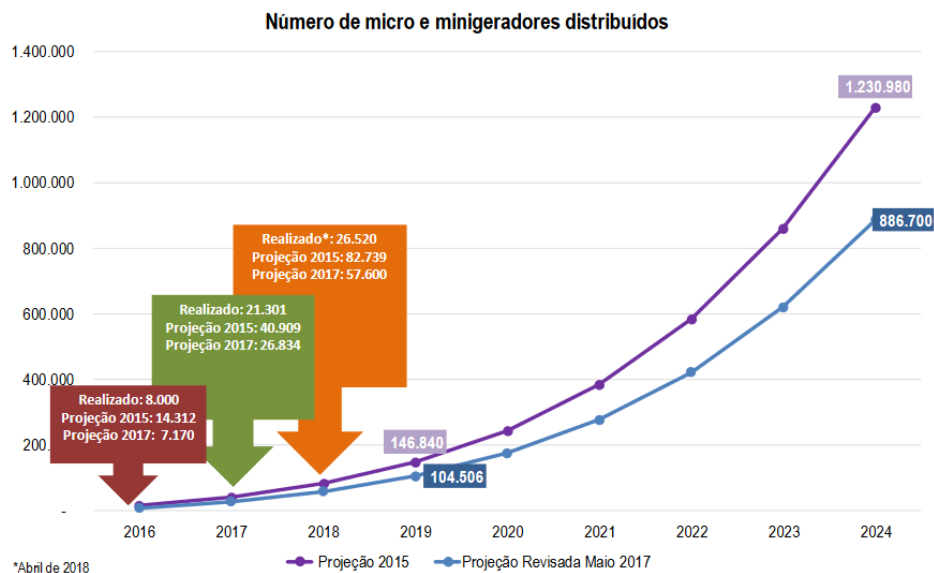
É nesse contexto de busca por diversificar a matriz energética brasileira utilizando fontes de energia alternativa, capaz de atender a demanda de locais não atendidos pela rede elétrica, se faz necessário o uso de sistemas de geração distribuída em função da utilização dos recursos energéticos presentes no local da geração. Sistemas de geração distribuída podem ser utilizados com diversas fontes diferentes de energia, sendo a mais usual devido ao baixo custo inicial a utilização do diesel, contudo isso gera um problema de logística para abastecer o local com o combustível. Em ambientes urbanos, a energia eólica é inviável devido ao baixo fator de capacidade quando instalado nesse tipo de ambiente devido aos inúmeros obstáculos presentes

nas cidades, que prejudicam a qualidade do vendo. Por isso a principal fonte de energia atualmente usada em sistemas de geração distribuída é a solar fotovoltaica (FV).

Um levantamento realizado pela Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR) mostra que, o setor de geração distribuída vive um momento de expansão no Brasil. No ano passado, o número de instalações de sistemas FVs cresceu mais de 100%. A geração distribuída, que engloba os consumidores individuais, empresas, comércio e indústrias, registra hoje mais de 20 mil sistemas FVs em operação. Apesar disso, o país ainda está abaixo do seu potencial energético.

A Agencia Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) realizou uma projeção a respeito de micro geradores de energia que é mostrado na figura 2 que nos mostra o quão esse mercado é promissor.

Figura 2 – Projeção do crescimento de micro geração distribuída



Fonte: Agencia Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), 2018.

A grande vantagem de se utilizar sistemas híbridos é a possibilidade de se escolher fontes de energia complementares, ou seja, a capacidade de geração de uma das fontes aumentar, quando a geração da outra fonte é reduzida, o que dá muito mais solidez para a geração tornando o projeto mais viável do ponto de vista energético. É com base nessa premissa que surgiu a motivação para a realização deste trabalho. Analisando um SHEFV localizado em Petrolina, interior do nordeste brasileiro.

1.1 Objetivos

- Dimensionar um SHEFV capaz de suprir uma carga residencial típica.
- Simular sistemas de geração híbridos eólico-solar desconectados da rede localizados em Petrolina e Parnaíba, usando dados de irradiação e velocidade dos ventos reais e componentes de projeto reais disponíveis no mercado.
- Analisar a viabilidade do projeto do ponto de vista energético visando a complementaridade das fontes de energia eólico-solar.
- **OBJETIVO PRINCIPAL:** Avaliar o desempenho dos projetos a respeito da sua viabilidade financeira e geração de energia elétrica.

1.2 Estrutura do trabalho

Este trabalho está dividido em 7 capítulos visando melhorar a orientação do leitor.

- Capítulo 1: Introdução
- Capítulo 2: Sistemas Híbridos
- Capítulo 3: Recursos Energéticos
- Capítulo 4: Homer Pro
- Capítulo 5: Realizando os Projetos de Sistemas de geração em Petrolina e Parnaíba
- Capítulo 6: Análise dos Resultados
- Capítulo 7: Conclusões

No capítulo 1, temos as motivações e objetivos que buscamos no trabalho.

No capítulo 2, é apresentados textos a respeito de sistemas de geração híbridos, comentando brevemente sobre os seus principais aspectos.

No capítulo 3, falamos sobre os recursos energéticos usados nos sistemas de geração híbrido, solar-eólico, bem como dos dados usados desses recursos usados no dimensionamento dos projetos a serem realizados.

No capítulo 4, é apresentada uma breve introdução ao software Homer Pro, assim como um tutorial de como se realizar o projeto de um sistema de geração híbrido e a validação do software.

No capítulo 5, temos a realização dos projetos de sistemas híbridos em Petrolina e Parnaíba, assim como os comentários a respeito dos resultados encontrados.

No capítulo 6, são realizadas as análises dos resultados dos projetos, avaliando desempenho e relacionando as fontes de energia utilizadas.

No capítulo 7, temos as conclusões a respeito das análises realizadas no trabalho.

2 SISTEMAS DE GERAÇÃO HÍBRIDOS

2.1 Breve introdução a sistemas híbridos

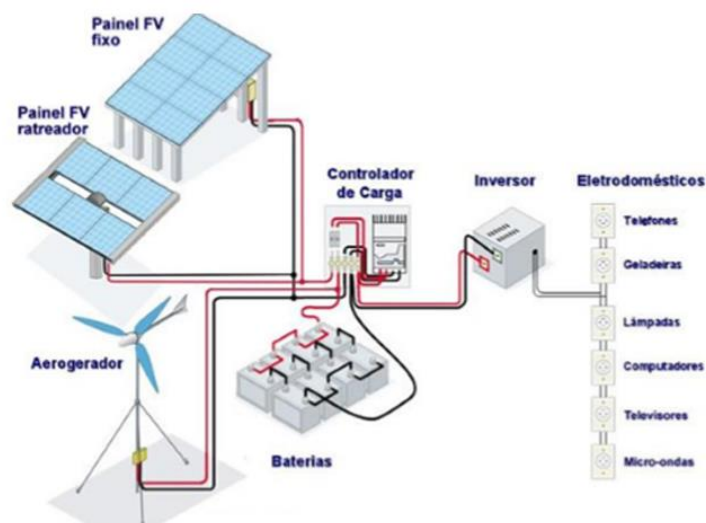
Embora a energia elétrica atinja grande parte da população mundial, existem lugares remotos os quais os custos de transmissão e distribuição de energia é muito elevado inviabilizando a utilização da rede elétrica. A principal solução usada atualmente é a utilização de sistemas de geração a diesel, sistema diesel-elétrico, para atender a demanda de comunidades isoladas ou aplicações especiais. Contudo esse sistema pode ser inviável devido a problemas de acesso e armazenamento do combustível. É nesse cenário que os sistemas híbridos se mostram necessários, sistemas híbridos de geração consiste em uma usina produtora de energia elétrica o qual se utiliza mais de uma fonte de energia, ideia por trás da utilização de sistemas híbridos é a capacidade de múltiplas fontes de energia conseguirem se complementar, atendendo a uma carga de maneira mais eficaz.

Fontes de energia renováveis tais como eólica, FV ou biomassa podem ser utilizadas em um sistema para suprir cargas nestas condições pelo fato da fonte de energia ser presente no local da instalação, logo não necessitando de nenhuma logística associada a sua utilização. Entretanto, o custo de instalação dessas fontes de energia é elevado, logo é necessário um estudo detalhado dos recursos energéticos e custos associados à viabilidade do projeto.

O principal problema associado a recursos renováveis é a sua intermitência, ou seja, a fonte de energia varia bastante ao longo do tempo, o que põe em risco a confiabilidade da instalação. Uma maneira de se solucionar esse problema é se utilizando mais de uma fonte de energia para que a usina produza energia suficiente para atender totalmente a necessidade da carga.

Na figura 3, é mostrado um esquemático básico de como funciona uma usina de geração Híbrida Solar-Eólica.

Figura 3 – Exemplo de Sistema Híbrido.



Fonte: www.thisienergias.com, 2019.

2.2 Vantagens e desvantagens de sistema híbrido

Sistemas de geração de energia elétrica baseada em sistemas híbridos renováveis é uma boa alternativa em diversos casos como já foi discutido anteriormente, contudo ele deve ser muito bem planejado, pois possuem vantagens e desvantagens que é exibido na tabela 1.

Tabela 1 – Vantagens e Desvantagens de sistemas híbridos.

	Vantagens	Desvantagens
Local de implantação	Recursos energéticos - utilização dos recursos que estão disponíveis no local.	Recursos energéticos - a disponibilidade energética dos recursos precisa ser favorável para geração de eletricidade.
Equipamento e investimento	Flexibilidade - sistemas facilmente ampliáveis, devido à modularidade dos subsistemas de geração.	Investimento inicial - bastante elevado em face da necessidade da importação dos principais equipamentos de geração.
Operação e manutenção	Sistemas independentes - não precisam estar ligados à rede de energia elétrica convencional. Confiabilidade - pouca necessidade de manutenção para as tecnologias de geração renovável e sua redução para os sistemas diesel-elétricos de pequeno porte. Geração - proximidade da carga a ser atendida (forma de geração descentralizada). Qualidade de energia - qualidade maior da energia fornecida, em comparação com a diesel-elétrica.	Sistema de armazenamento - necessidade de armazenamento de energia, em função da intermitência das fontes primárias. Baterias - ciclo de vida relativamente curto comparado aos demais equipamentos do sistema. Sistema de controle - pode ser bastante complexo, dependendo do porte do sistema.
Questões ambientais	Sistema comissionado - ambientalmente benigno, dado o baixo nível de emissão de CO ₂ e outros gases, comparado à geração exclusivamente a partir de combustíveis fósseis.	Baterias - descarte e reciclagem das baterias são pontos fracos. Porte do sistema - para sistemas de grande porte tem-se a ocupação de grandes áreas (arranjo fotovoltaico), além do aspecto visual (aerogeradores).
Organização	Usuários - completamente adaptável às necessidades energéticas dos usuários.	Usuários - necessidade de maior envolvimento do usuário com os sistemas durante e após a implantação, através do uso racional da energia.

Fonte: Pinho, et al, 2008.

2.3 Sistemas Híbridos no Brasil e no Mundo

Vários sistemas híbridos vêm sendo instalados no mundo inteiro nas últimas décadas, principalmente com intensão de fornecer energia elétrica a comunidades isoladas, sistemas de bombeamento, dessalinização entre outras.

Não há base de dados disponível com o registro de todos os sistemas híbridos disponíveis, mas estima-se que eles começaram a serem utilizados por volta da década de 1970, em decorrência da crise do petróleo.

O primeiro sistema híbrido do Brasil corresponde ao sistema eólico-diesel de Fernando de Noronha, no estado de Pernambuco. Esse sistema foi implantado no ano de 1986, sendo composto por uma potência de 75 kW eólica e diesel-elétrica de 50 kW. Posteriormente o

sistema foi potencializado e agora conta com uma capacidade de geração de 2.1 MW. (PINHO *et al*, 2008).

2.4 Tipos de Sistemas Híbridos

Os sistemas híbridos podem ser formados por fontes de energia renováveis ou não renováveis podendo ser totalmente renováveis ou totalmente não renováveis. Os principais tipos de sistemas híbridos são:

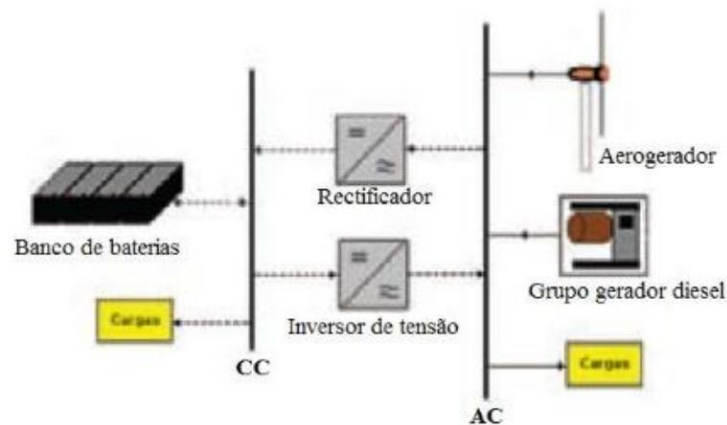
- Diesel – Eólico
- Diesel – FV
- Eólico – FV– Diesel
- Eólico – FV

Como pode ser notada, a maioria dos sistemas híbridos são formados com a combinação de fontes renováveis e não renováveis. No livro já citado de Pinho et al., 2008 é mostrado um balanço dos sistemas híbridos até 2003, mais de 55% das configurações são sistemas Eólico – Diesel , Eólico - FV-Diesel com 18% e 13% de Diesel – FV.

2.4.1 Sistema Eólico Diesel

Consiste de uma usina geradora de energia, formada por um ou mais geradores eólico(parque eólico) e um gerador combustível a diesel , as fontes podem funcionar em paralelo ou não para atender a uma determinada carga. Segue a figura 4 com um exemplo de diagrama híbrido Eólico-Diesel.

Figura 4 – Sistema de geração híbrida eólica-diesel.

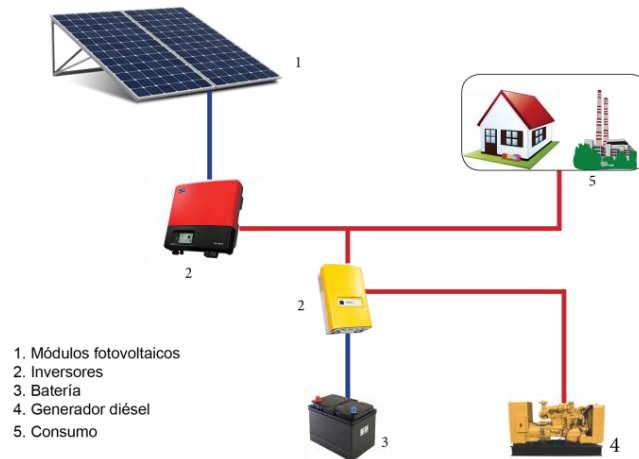


Fonte: Pinho, et al, 2008.

2.4.2 Sistema Fotovoltaico - Diesel

Consiste na combinação de um conjunto de painéis fotovoltaicos com um sistema de geração a diesel de forma que em momentos que a carga necessita de potência e não há disponibilidade da fonte solar a diesel entra para supri-la. O arranjo desse tipo de sistema é mostrado na figura 5.

Figura 5 – Esquemático de um sistema FV – Diesel.



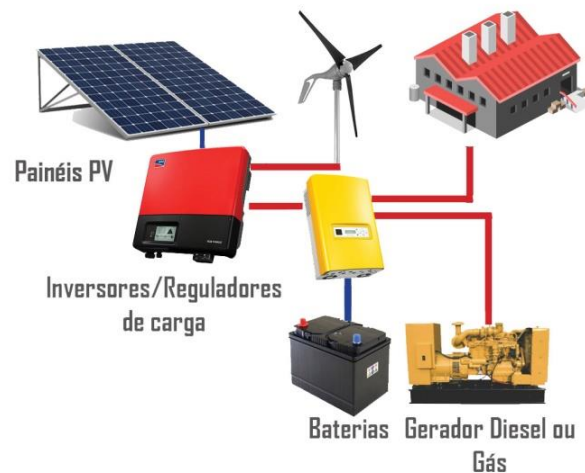
Fonte: <http://www.sitecnosolar.com>, 2019.

2.4.3 Sistema Eólico Fotovoltaico - Diesel

O sistema híbrido eólico, fotovoltaico e diesel consiste na união de ambos os recursos renováveis mais usados com um sistema diesel-elétrico. Esse sistema por ter mais fontes de energia do que os anteriores diminui o uso do gerador diesel a depender da disponibilidade das energias solar e eólica.

A figura 6 apresenta o esquema de um sistema híbrido desse tipo.

Figura 6 – Esquemático de um sistema eólico – FV – diesel.

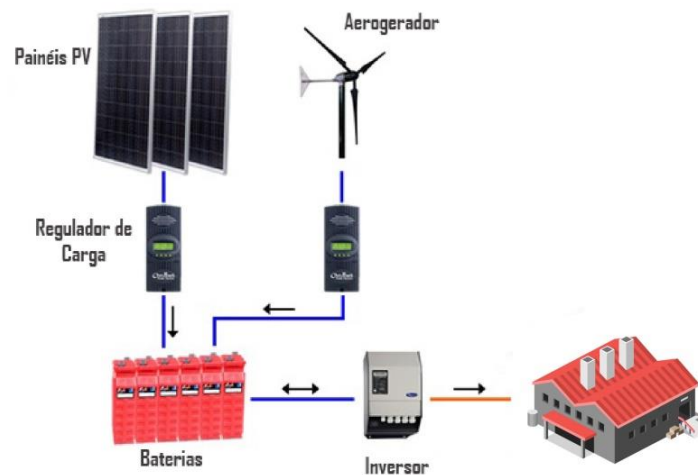


Fonte: www.tecnoveritas.net, 2019.

2.4.4 Sistema Eólico – FV

Esse sistema consiste utilizando ambos os recursos renováveis (eólico e FV), formando assim um sistema completamente renovável. Esse sistema leva vantagem em relação ao sistema com gerador diesel por não necessitar da logística operacional para se utilizar do diesel. Na figura 7 temos o esquemático do sistema Eólico – FV.

Figura 7 – Esquemática de um sistema híbrido eólico – FV.



Fonte: www.tecnoveritas.net, 2019.

2.5 Componentes de um sistema híbrido

Um sistema de geração híbrido é composto pelos seguintes componentes.

- Unidades de geração,
Exp.: Sistema fotovoltaico, turbina eólica, gerador diesel.
- Sistemas de armazenamento de energia
Exp.: Banco de baterias e supercapacitores.
- Sistema de controle
Exp.: Conversores, inversores, controladores de carga.

2.5.1 Unidades de geração

Como já foi comentado anteriormente, os sistemas de energia híbridos utilizam múltiplos sistemas de geração. Neste trabalho foi utilizado um sistema híbrido eólico-fotovoltaico (SHEFV), então cabe uma breve introdução a esses sistemas.

2.5.1.1 Sistemas fotovoltaicos (FV)

Sistema de geração FV consiste de painéis formados por células fotovoltaicas que utilizam a irradiação solar como forma de gerar eletricidade. Segue uma breve explicação de como funciona uma célula FV.

- Funcionamento de uma célula FV

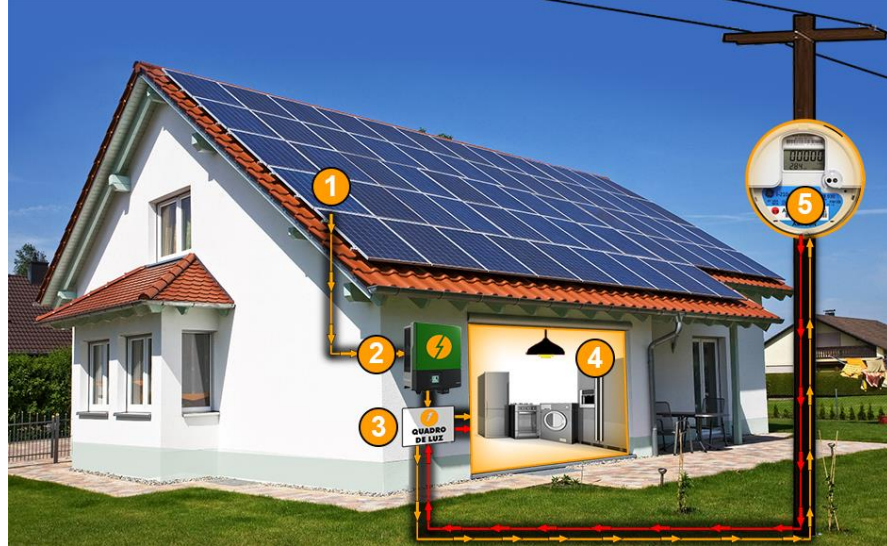
A irradiação solar é transformada em eletricidade em uma célula fotovoltaica, fabricada com materiais chamados de semicondutores. O mais utilizado é o silício. A luz solar é pura energia, composta de pequenos elementos denominados fótons. Quando os fótons atingem a célula, parte deles é absorvida. Esses fótons despertam os elétrons do material semicondutor, gerando assim eletricidade.

Quanto maior a intensidade de luz solar, maior o fluxo da eletricidade.

- Componentes do Sistema FV

O sistema normalmente é composto por painéis que possuem várias células fotovoltaicas, junto com um inversor que capta a potência elétrica de saída dos painéis e pode injeta na carga ou na rede elétrica ou num banco de baterias a depender da configuração do sistema. Na figura 8 temos uma configuração típica de sistema fotovoltaico.

Figura 8 – Exemplo de Sistema fotovoltaico.



Fonte: www.portalsolar.com.br, 2019.

2.5.1.2 Sistemas de geração eólica

Sistemas de geração eólica se utilizam da energia de mecânica das massas de ar em movimento para gerar energia elétrica, o sistema de energia eólico é formado principalmente por um aerogerador em conjunto com um conversor que injeta a potência elétrica em um sistema de baterias, na carga ou na rede elétrica a depender da configuração do sistema. Abaixo uma breve introdução ao funcionamento do aerogerador.

Aerogerador

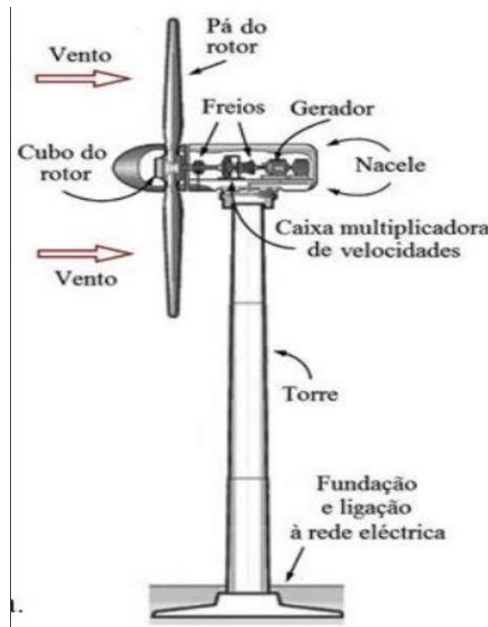
Aerogeradores são máquinas elétricas que funcionam convertendo a energia cinética presente no vento captado por pás acopladas no seu eixo, em energia elétrica. Na figura 9 é descrito alguns dos principais componentes dos aerogeradores:

Principais componentes:

- *Pás do Rotor*: Capturam a energia eólica e a convertem em energia rotacional no eixo.
- *Eixo*: Transfere a energia de rotação para o gerador.
- *Nacele*: Carcaça onde são abrigados os componentes.
- *Caixa de Engrenagens*: Aumenta a velocidade de rotação do eixo entre o gerador e o cubo do rotor.
- *Gerador*: Usa a energia rotacional para gerar eletricidade utilizando eletromagnetismo.
- *Unidade de Controle Eletrônico*: Monitora todo o sistema, realiza o desligamento da turbina em caso de falha e ajusta o mecanismo de alinhamento da turbina com o vento.

- *Controlador*: Alinha o rotor com a direção do vento.
- *Freios*: Em caso de falha no sistema ou sobrecarga de energia, detém a rotação do eixo.
- *Torre*: Sustenta o rotor e a nacelle, além de erguer todo o conjunto a uma altura onde as pás possam girar com segurança e distantes do solo.
- *Equipamentos Eléctricos*: Transmitem a electricidade do gerador pela torre e controlam os elementos de segurança da turbina.

Figura 9 – Componentes de um aerogerador.

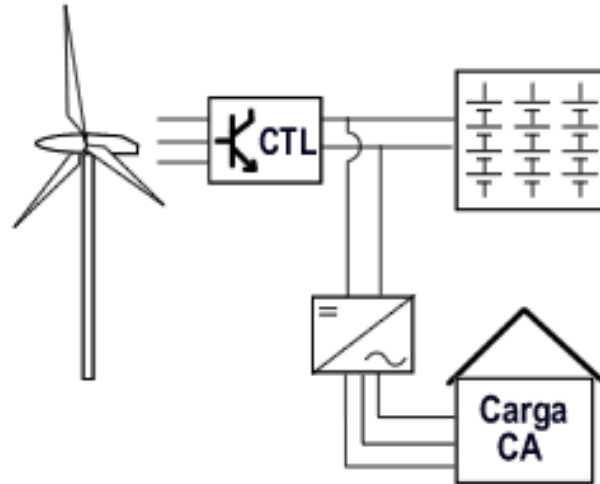


Fonte: www.researchgate.net, 2019.

- Sistema Eólico.

O aerogerador é formado por um rotor, composto pelas pás e pelo cubo, que impulsionado pelo vento aciona um gerador assíncrono, gerando electricidade em CA. A tensão de saída do aerogerador é então convertida de CA em corrente contínua (CC), por meio de um conversor eletrónico chamado de retificador, e alimenta o banco de baterias. A alimentação em CA dos equipamentos da Casa Solar (como os encontrados em uma casa convencional) é realizada a partir do controlador de carga, mas antes a tensão de saída é convertida de CC para CA através de um inversor de fonte de tensão. A figura 10 ilustra o funcionamento de um aerogerador.

Figura 10 – Ilustração de um sistema eólico.



Fonte: <http://www.cresesb.cepel.br>, 2019.

2.5.2 Sistemas de armazenamento de energia

Em função das características intermitentes dos recursos renováveis (vento e sol) e das variações sazonais e climáticas, a geração de energia elétrica proveniente destas fontes pode exceder ou ser deficitária em relação à demanda de energia elétrica solicitada pela carga.

O sistema de armazenamento tem como objetivo evitar o déficit entre geração e a energia elétrica demandada pela carga. Sejam estes déficits de longa ou curta duração, em sua maioria, decorrentes de dias nublados (chuvosos) e/ou dias de calmarias (baixa intensidade a velocidade do vento). Blasques, (2014) relaciona alguns sistemas de armazenamento, que são: baterias, células a combustível (eletrolise da água); volantes de inércia, superindutores e supercapacitores. Borges Neto e Carvalho, (2011) descrevem sobre a utilização de armazenamento de água em reservatórios através de bombeamento de água para uso posterior.

A literatura indica que as baterias do tipo chumbo-ácido são as mais aplicadas em sistemas isolados de geração provenientes de recursos renováveis, seja este de geração singular ou híbrida. (PINHO *et al*, 2008).

Baterias de Chumbo – Ácido

As baterias de chumbo ácido são o método mais barato e comum de se utilizar em um sistema de armazenamento de energia e foi utilizado no sistema analisado neste trabalho então cabe uma breve introdução.

Bateria (chumbo-ácido) é um conjunto de células que estão conectadas em série e/ou em paralelo, cada célula possui dois eletrodos (cátodo e o ânodo). O nível de tensão de cada célula é de 1,2 a 3,6 V, logo, uma bateria de 12V é um conjunto de 06 células conectadas em série (PALMER, 2008).

As baterias de chumbo-ácido são componentes que convertem energia química armazenada em energia elétrica (processo de descarga) ou energia elétrica em energia química (processo de carregamento) através de reações químicas. As principais baterias do tipo chumbo-ácido classificam em:

- Automotivas: São acumuladores que suportam descargas rápidas, elevadas taxas de corrente e com baixas profundidades de descargas;
- Ciclo Profundo: Opera em ciclos diários profundos, a desvantagem é a necessidade de manutenção;
- Fotovoltaicas: Operam em ciclos de carga e descarga. Vantagem são livres de manutenção, suportam a elevados níveis de *DOD*. Desvantagem custo. (LAMBERT, 2001).
- Estacionárias: Aplicadas em sistema de flutuações, são influenciadas pela temperatura. São livres de manutenção;

A capacidade de uma bateria é, usualmente, dada em Ah (ampère hora) que também pode ser expressa em energia (Wh). A energia da bateria é determinada em função da sua tensão e pela capacidade dada em Ah. A capacidade é dependente de parâmetros como: quantidade e dimensões das placas, corrente de descarga, temperatura, profundidade de descarga, densidade do eletrólito, idade das células eletroquímicas e outros. A capacidade nominal é definida como a quantidade de Ah que uma bateria pode fornecer em um intervalo de tempo. A tensão de descarga varia em função do fabricante, para baterias de 12 V, o nível de tensão da bateria descarregada é de aproximadamente 10,5 V. (MOURA, 2014). A figura 11 ilustra os principais componentes das baterias chumbo – ácido.

Figura 11 – Principais componentes de uma bateria chumbo – ácido.



Fonte: Moura, 2014.

2.5.3 Sistema de controle

O sistema de controle é o componente responsável em processar a potência entregue pelas fontes de energia e condiciona-la de forma a atender corretamente as cargas.

Os equipamentos que normalmente são encontrados nos sistemas de controle são:

- Inversores
- Controladores de carga
- Retificadores

2.5.4 Inversores

Inversores de frequência (ou conversores CC-CA) são dispositivos eletrônicos originados graças aos conceitos estudados na Eletrônica de Potência, que visam, principalmente, converter a tensão contínua em tensão alternada através da devida comutação de suas chaves semicondutoras, usualmente comandadas por microcontroladores, para os mais diversos fins, desde o controle de máquinas CA. As aplicações em projetos de conversão de energia ou geração de corrente alternada em projetos de sistemas FV. Esse tipo de equipamento é necessário em qualquer sistema de geração que funciona em corrente contínua, pois as cargas usualmente presentes em qualquer instalação elétrica funcionam em corrente alternada.

Os inversores mais modernos contam com várias funções que vão além da simples conversão de sistema contínuo para alternado contanto com sistemas de controle, proteção e monitoramento de todos os aspectos elétricos do sistema a ele conectado.

No meio do processo, o aparelho conta com interruptores ou chaves eletrônicas, que podem ser transistores do tipo IGBT (Transistor Bipolar de Porta Isolada), IGCT (Portão Integrado Controlado) ou MOSFET (Transistor de efeito de Campo Metal — óxido — semicondutor).

Os inversores podem ser: Inversores de Tensão – VSI; Inversores de Corrente-CSI. As formas de ondas da tensão disponibilizadas podem ser:

- Quadradas: apresentam elevada distorção harmônica (acima de 40% de DHT);
- Quadrada modificada: mesmo princípio do inversor de onda quadrada com defasamento através do chaveamento, tem-se uma redução no nível de distorção harmônica;
- Senoidal: Apresentam melhor eficiência, porém são os inversores de custo mais elevado devido aos circuitos de controles mais complexos e ao maior número de chaves. Apresentam distorção harmônica abaixo de 5%. (HART, 2011).

Figura 12 – Imagem de alguns Inversores de frequência.



Fonte: www.solarvoltenergia.com.br.

2.5.5 Controladores de carga

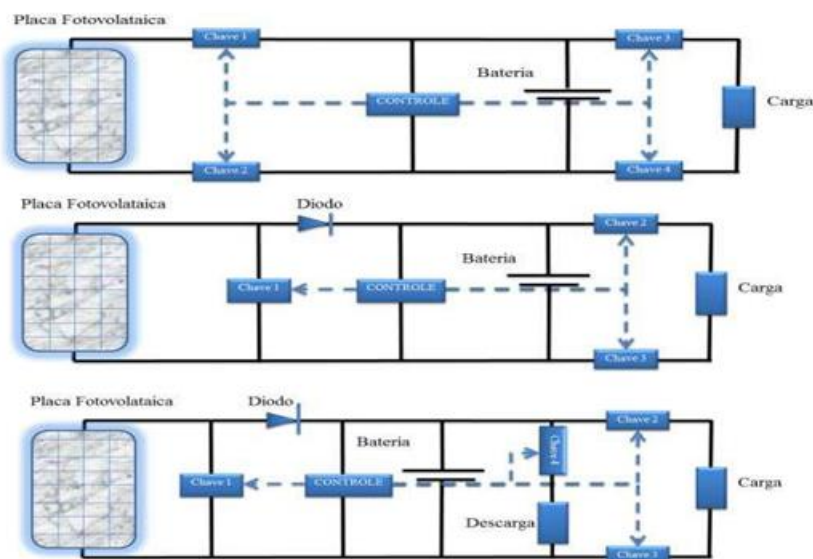
A função básica do controlador de carga é o acoplamento ao sistema de banco de baterias e a garantia do controle contra a sobrecarga e descarga profunda o qual o sistema de armazenamento (bateria) possa ser submetido. Os controladores tem objetivo controlar o processo de carga e descarga da bateria e com isso evitar que esta sofra sobrecarga ou descarga profunda, efeitos que possam trazer danos irreversíveis. (SILVA, 2011).

O mesmo tem como objetivo garantir um nível de tensão estável/adequado para o carregamento da bateria de acordo com as recomendações do manual do fabricante, de modo a prolongar sua vida útil.

O controle do processo de carga e descarga pode ser efetuado através das seguintes grandezas: *SOC*, da tensão e do nível eletrolítico da bateria. Pode-se encontrar três estratégias de controle que são: a série, paralela e a paralela com *dump load*. A desconexão pode ser efetuada através de chaves (*IGBT* ou *MOSFET*) ou por relés. O controle aplicado em função da tensão nos terminais da bateria é uma das estratégias mais aplicadas. Nesta estratégia, a tensão da bateria é permanentemente monitorada para verificação dos valores mínimo e máximo.

A figura 13, apresenta as três estratégias de desconexão em função do nível de tensão do banco de baterias que são: série, paralelo e paralelo com dispositivo de dissipação de excedente de energia (*dump load*). (F.KININGER, 2003).

Figura 13 – Estratégias de desconexão. a) Desconexão série; b) Desconexão paralelo; c) Desconexão paralelo com *dump load* (dispositivo aplicado para dissipação de excedente de energia).



Fonte: Adaptado de Kassel, 2003 e CRESESB, 2014.

2.5.6 Retificadores

Os retificadores são aplicados em sistemas híbridos para conexões de aerogeradores e de geradores diesel-elétrico ao barramento CC. O dispositivo eletrônico tem como finalidade de gerar uma saída retificada e controlada (adequada) para que as unidades de geração eólica e diesel possam ser acopladas ao barramento CC, sem prejuízo ao sistema de armazenamento.

3 RECURSOS ENERGÉTICOS

Neste capítulo são discutidas as fontes de energia utilizados no projeto objeto de estudo deste trabalho. Primeiramente é apresentada uma breve introdução às fontes de energia solar e eólica e sua complementaridade, em seguida é apresentado os dados de energia de velocidade do vento e irradiação registrados em Petrolina e Parnaíba.

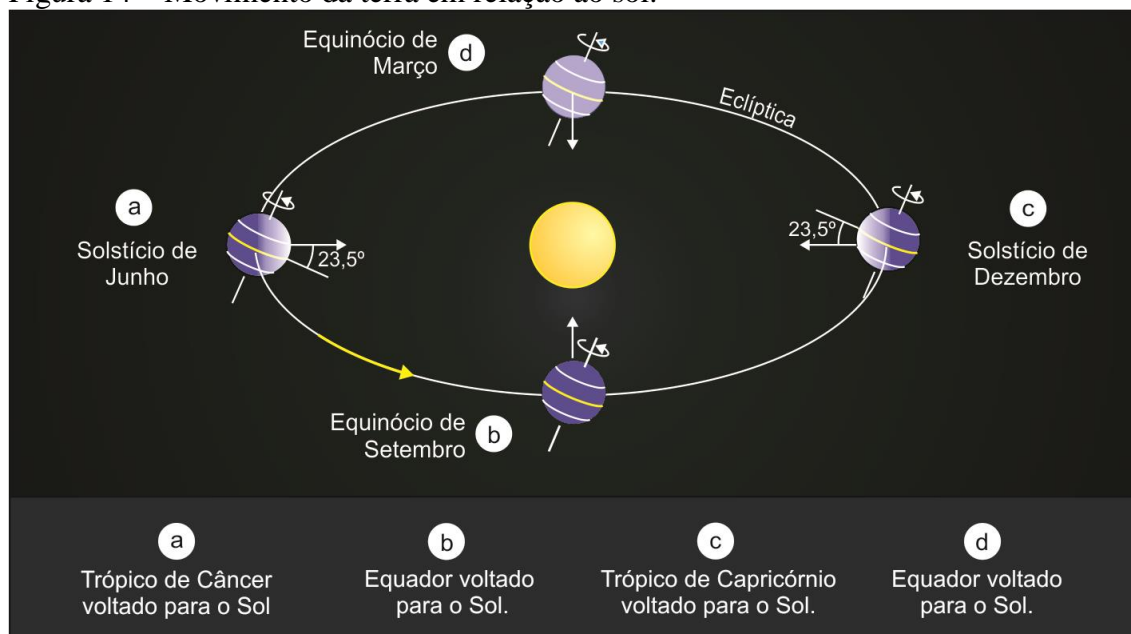
São esses dados de que foram utilizados na análise computacional discutida posteriormente neste trabalho.

3.1 Irradiação Solar no nordeste brasileiro

A irradiação proveniente do sol é o recurso energético utilizado para se gerar energia em uma usina de geração de energia elétrica FV. Esse recurso apesar de ser renovável e abundante, possui certas peculiaridades quando estudados a sua disponibilidade, pois a irradiação depende da forma com que os raios solares atingem a superfície da terra, assim como outros fatores como nebulosidade presente na região.

O Brasil é um país de proporções continentais localizado no hemisfério sul, particularmente o nordeste brasileiro é localizado próximo à linha do equador o que faz com que a irradiação varie bem menos do que em outras regiões do planeta mais próximas aos trópicos. Contudo, á variação na irradiação devido a distancia da terra em relação ao sol devido ao movimento da terra em relação ao sol que traça uma trajetória elíptica. A figura 14 ilustra esse movimento.

Figura 14 – Movimento da terra em relação ao sol.



Fonte: <http://astro.if.ufrgs.br>, 2019.

Pode-se observar na figura 14 que os locais de maior irradiação são aqueles próximos da linha do equador, isso devido a essa região não sofrer com variação de irradiação solar ao longo do ano devido ao movimento da terra em torno do sol, as regiões mais distantes da linha do equador são sujeitas a solstício e equinócio o que

causa uma variação ao longo do ano de irradiação. Contudo devido a trajetória elíptica da terra em volta do sol, nos meses de dezembro e junho podemos observar que esses são os meses em que a terra está mais distante do sol, e nos meses de setembro e março são os meses em que a terra está mais próxima o que causa uma variação na irradiação.

Figura 15 – Irradiação no território brasileiro.



Na figura 15 temos o mapa da irradiação ao longo do território brasileiro e pode ser observado que, a região nordeste do Brasil, possui as melhores taxas o país, isso se dá por esta região ser próxima da linha do equador e também por possui as menores taxas de nebulosidade o que favorece a irradiação direta nessas regiões. Também é notório que para uma mesma latitude, a região mais distante do litoral possui maior irradiação, isso ocorre devido a regiões mais próximas do litoral ter maior nebulosidade o que carreta em menor radiação direta na superfície terrestre.

3.2 Mecanismos de vento no nordeste brasileiro

Regiões próximas à linha do equador, como é o caso do Nordeste brasileiro, merecem destaque no que tange o aproveitamento eólico-elétrico, pois estas regiões sofrem fortes influências dos ventos alísios e pelas diferentes posições da ZCIT (CARVALHO, 2003).

A posição da ZCIT converge em ciclos anuais, como foi demonstrado anteriormente. Essas variações em sua posição resultam em uma sazonalidade bem definida no Nordeste brasileiro, tendo o primeiro semestre como o período de

maiores ocorrências de chuvas e valores reduzidos de velocidade do vento e o segundo semestre como um período mais seco e com predominância das maiores intensidades de velocidades do vento do ano.

A região nordeste pode ser classificada em 3 regiões distintas com sub-regiões associadas. A figura 17 mostra cada uma dessas regiões e em seguida a tabela 2 com a caracterização de cada região.

Figura 16 – Representação esquemática das diferentes regiões eólicas brasileiras (a) Litoral Norte – Nordeste; (b) Litoral Nordeste - Sudeste; e (c) Nordeste Continental.

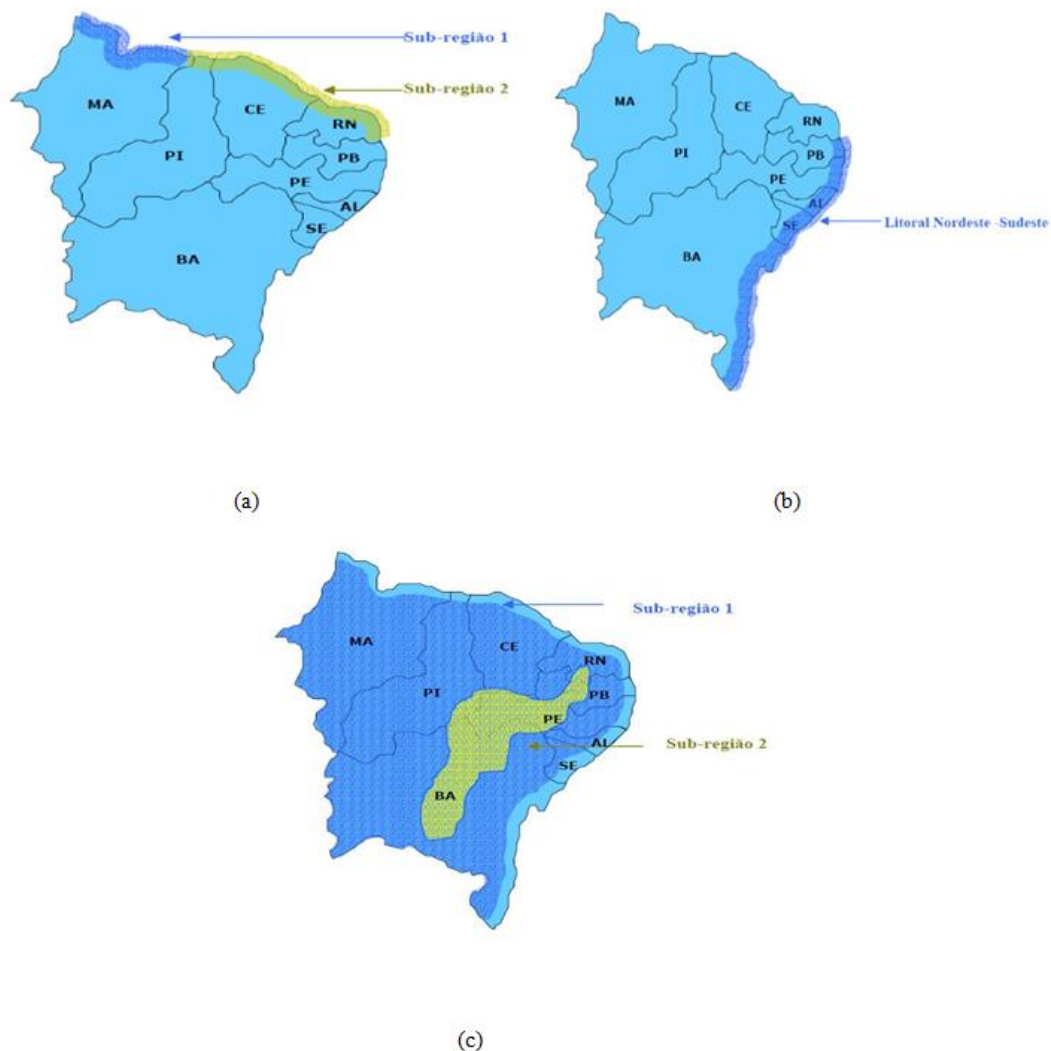


Tabela 2 – Sub-regiões do nordeste brasileiro.

Região Eólica	Mecanismos de Vento	Características Eólicas
Litoral Norte - Nordeste	Ciclo anual da ZCIT	Alta regularidade anual, alta constância no comportamento da direção e o que difere uma
Sub-região (1)	Brisas de terra e de mar	sub-região de outra, é apenas a intensidade que é maior dos ventos na sub-região 2.
Sub-região (2)	Fortes <i>Ventos Alísios</i>	
Litoral Nordeste - Sudeste	Redução dos <i>Ventos Alísios</i>	Alta regularidade anual, alta constância no comportamento da direção, diferente da região litorânea Norte – Nordeste, a aqui ocorre uma redução na intensidade dos ventos.
	Moderadas brisas de terra e mar	
Nordeste Continental	<i>Ventos Alísios</i>	Alta regularidade anual, moderada constância no comportamento da direção, a intensidade dos ventos é maior na sub-região 2,
Sub-região (1)	Brisas de montanhas e de vales	favorecida pela orografia da sub-região.
Sub-região (2)	interações de massas de ar.	

Fonte: Adaptado de Silva, 2003.

3.3 Complementariedade dos recursos energéticos.

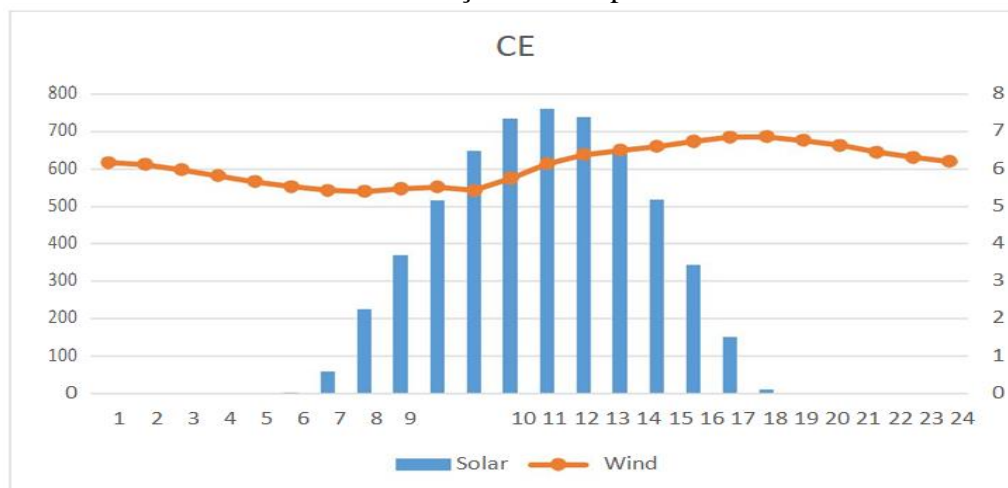
Como já foi discutido até agora, o Brasil, em particular a sua região nordeste, possui condições propensas para a utilização de usinas geradoras de energia solar FV e eólica, mas a disponibilidade dos recursos não é o único aspecto a ser considerado em um sistema de geração híbrido.

Um dos aspectos mais importantes a se levar em consideração em projetos de sistema híbridos é a complementariedade entre os recursos energéticos, pois toda a motivação que envolve a utilização de sistemas de geração com mais de uma fonte de energia é prover um sistema de geração mais eficiente e confiável o qual duas ou mais fontes de energia se complementam para alimentar a carga de maneira intermitente. Além disso, a complementariedade faz com que o estado das baterias de um sistema de geração sempre esteja na sua melhor forma possível / o que reduz consideravelmente o custo do projeto.

No geral, para um SHEFV, o comportamento da irradiação solar ao longo do dia segue um padrão constante ao longo dos dias do ano, iniciando um pouco antes das 6h e encerrando um pouco antes das 18h, então será o perfil da velocidade do vento que irá determinar se as fontes possuem uma boa, ou seja, o ideal seria a velocidade do vento ter média maior no horário ente 18h e 5h.

Segue a figura 17 mostra a complementariedade típica dos recursos de irradiação e velocidade do vento no Ceará, obtidos com dados do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LEEE) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Figura 17 – Complementabilidade dos recursos de velocidade do vento e irradiação diária típica.



Fonte: <http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/formato-try-swera-csv-bin>. 2017.

3.4 Dados de Recursos energéticos de Petrolina

Para fazer a análise computacional de um sistema híbrido primeiramente é necessário ter em mãos os recursos energéticos disponíveis para aquela localização. Como o sistema que será analisado é um sistema Híbrido Solar – Eólico precisamos ter uma análise boa a respeito dos dados de irradiação solar e de velocidade do vento. Por isso essa seção será dedicada a exibir os dados de vento e irradiação utilizados na análise.

Petrolina é um município brasileiro do estado de Pernambuco. Em conjunto com o município baiano de Juazeiro, forma o maior aglomerado urbano do semiárido. Tem a segunda maior população e o maior PIB do interior de Pernambuco. Localizada a 730 km da capital pernambucana, Recife, Petrolina possui a sexta maior economia do estado. O município de Petrolina está localizado na mesorregião do São Francisco, e na Microrregião de Petrolina no Estado de Pernambuco. Ocupa uma área municipal de 4737,1 km² e representa 4,81% do Estado de Pernambuco. O clima nesta área apresenta-se como tropical semiárido. (TATIANE CAROLYNE, 2014).

3.4.1 Dados de velocidade do vento em Petrolina

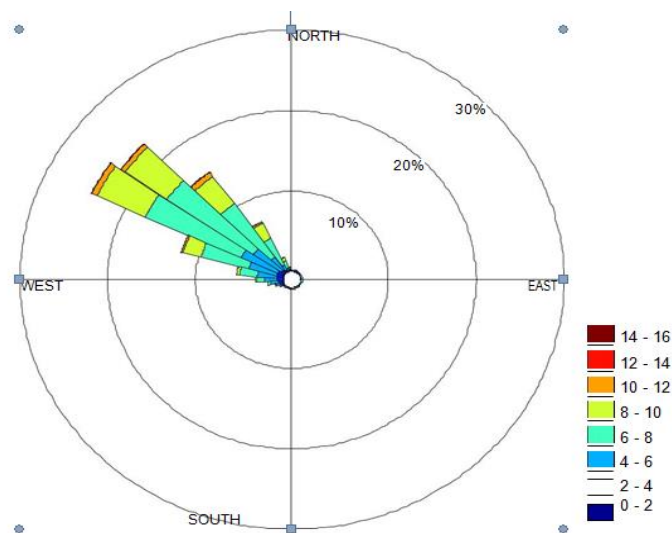
Tatiane Carolyne (2014). Forneceu-nos os dados de velocidade do vento utilizados para a simulação do sistema híbrido localizado em Petrolina através da dissertação de mestrado de Tatiane Carolyne Carneiro, de título “caracterização de potencial de geração eólica e estudo de caso para Maracanaú, Petrolina e Parnaíba”. Seguem na tabela 3 e figura 18 os dados de velocidade média do vento em Petrolina.

Tabela 3 – Velocidade do vento média ao longo de um ano em Petrolina.

Mês	Velocidade média do vento (78 m) m/s	Velocidade média do vento (50 m) m/s	Velocidade média do vento (20 m) m/s
Janeiro	5,40	4,88	3,64
Fevereiro	6,74	6,07	4,56
Março	6,05	5,47	3,99
Abril	6,80	5,75	4,32
Mai	6,91	6,13	4,60
Junho	6,87	6,09	4,45
Julho	7,25	6,42	4,84
Agosto	7,80	6,94	5,38
Setembro	7,54	6,76	5,15
Outubro	7,36	6,67	5,18
Novembro	5,54	5,03	3,78
Dezembro	6,24	5,67	4,23

Fonte: TATIANE CAROLYNE, 2014.

Figura 18 – Direção e velocidade do vento em m/s em Petrolina.



Fonte: TATIANE CAROLYNE, 2014.

3.4.2 Dados de Irradiação de Petrolina

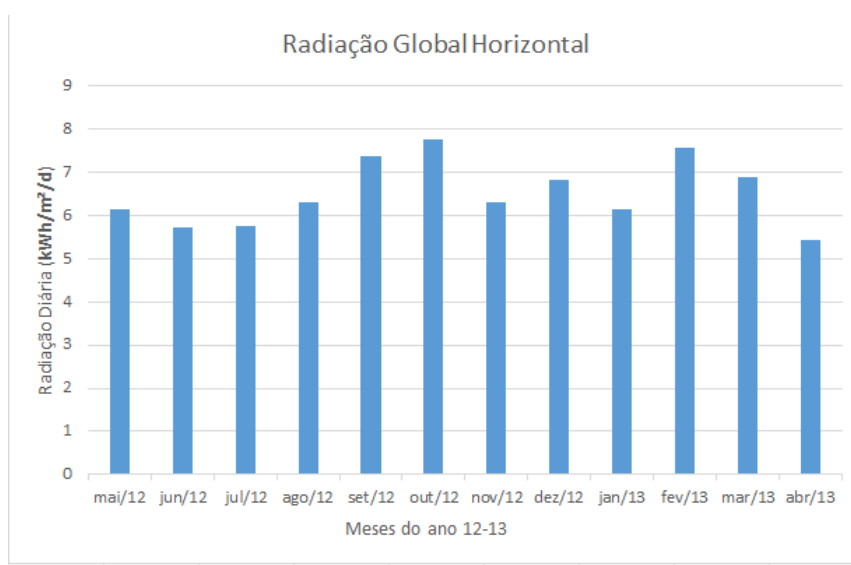
Tatiane Caroline (2014), no seu trabalho de levantamento energético também nos forneceu os dados de irradiação média de uma estação de medição em Petrolina, os dados fornecidos estão descritos na tabela 4 e na figura 19:

Tabela 4. Média de irradiação por dia em cada mês em Petrolina.

Mês	Irradiação kWh/m ² /dia
Janeiro	6,14
Fevereiro	7,54
Março	6,89
Abril	5,43
Maio	5,47
Junho	5,43
Junho	5,74
Agosto	6,04
Setembro	7,36
Outubro	7,76
Novembro	6,29
Dezembro	6,82

Fonte: TATIANE CAROLYNE, 2014.

Figura 19 – Irradiação média diária por mês em Petrolina.



Fonte Autor.

3.5 Dados de recurso energético de Parnaíba.

Parnaíba localiza-se na bacia hidrográfica do Rio Parnaíba e é cortada por este que se divide em vários braços formando o famoso Delta do Parnaíba. A cidade está localizada em terrenos do cenozóico quaternário e possui altitude de cerca de 5

metros nas regiões do centro urbano que é afastado do litoral. Encontra-se na planície litorânea e a topografia é bastante regular. Predominam na região a vegetação de igarapés e mangues nas margens dos rios e de caatinga, litorânea e da mata dos cocais no restante do território. Parnaíba é a segunda maior cidade do Estado com mais de 150 mil habitantes. (TATIANE CAROLYNE, 2014).

3.5.1 Velocidade do vento de Parnaíba

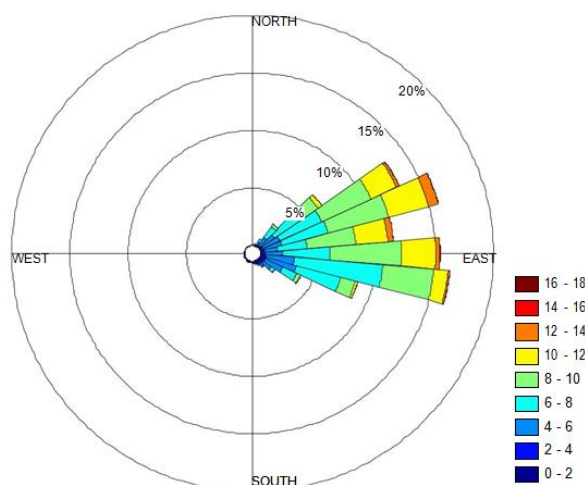
Assim como foi feito para Petrolina os dados relativos à velocidade do vento e irradiação de Petrolina como segue na tabela 5 e na figura 20:

Tabela 5 – Dados de Velocidades médias do vento médias por dia a cada mês de Parnaíba.

Mês	Velocidade média do vento (78 m) m/s	Velocidade média do vento (50 m) m/s	Velocidade média do vento (20 m) m/s
Janeiro	7,56	6,77	5,36
Fevereiro	7,55	6,77	5,22
Março	6,78	6,04	4,63
Abril	5,14	4,58	3,26
Mai	5,80	4,98	3,33
Junho	6,38	5,51	3,87
Julho	6,55	5,64	4,28
Agosto	7,71	7,08	5,65
Setembro	7,99	7,27	5,82
Outubro	10,08	9,25	7,50
Novembro	7,18	6,60	5,42
Dezembro	8,25	7,49	6,00

Fonte: TATIANE CAROLYNE, 2014.

Figura 20 – Direção e velocidade do vento em m/s em Parnaíba.



Fonte: TATIANE CAROLYNE, 2014.

3.5.2 Dados de Irradiação de Parnaíba

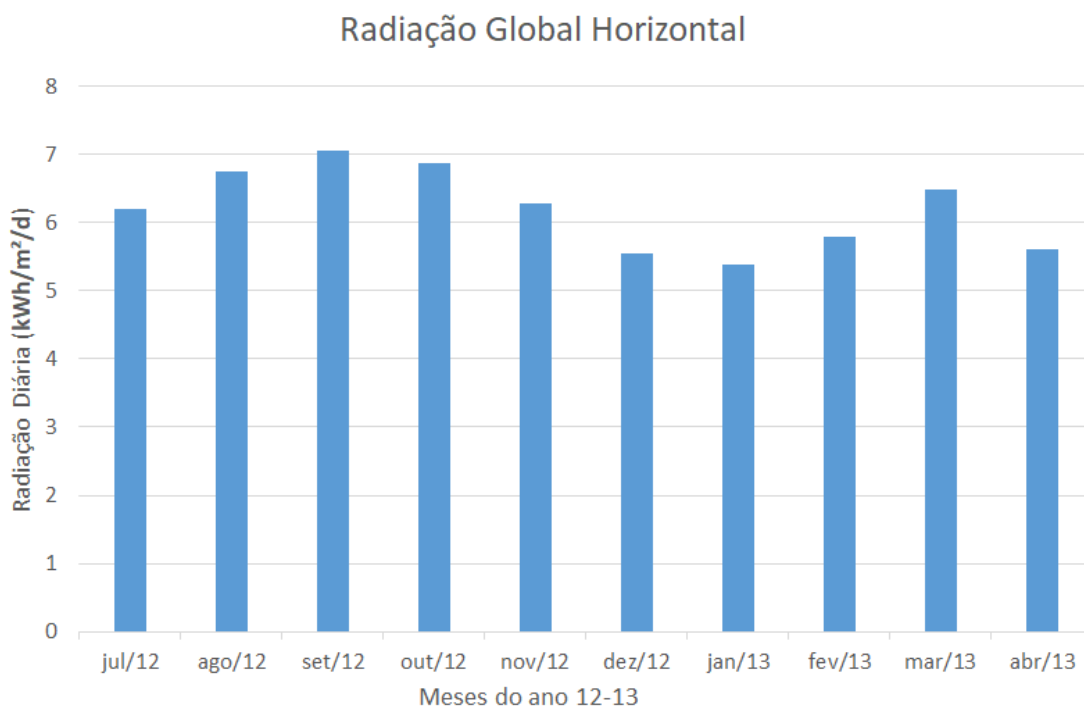
Assim como no caso de Petrolina, foram fornecidos os dados de irradiação de Parnaíba que são exibidos nas tabelas 6 e figura 21.

Tabela 6 – Dados de Irradiação usados no Projeto do sistema de Parnaíba.

Mês	Irradiação kWh/m ² /dia
Janeiro	5,38
Fevereiro	5,80
Março	6,48
Abril	5,94
Maio	5,68
Junho	5,61
Julho	5,81
Agosto	6,32
Setembro	7,06
Outubro	6,87
Novembro	6,29
Dezembro	5,56

Fonte: TATIANE CAROLYNE, 2014.

Figura 21– Dados de Irradiação de Parnaíba.



Fonte: TATIANE CAROLYNE, 2014.

4 HOMER PRO

Até agora, definimos os principais conceitos necessários para a elaboração de um projeto de uma usina de geração híbrida, sua aplicação, seus componentes e foram caracterizados todos os recursos energéticos necessários para se realizar o projeto. Contudo para realizar a análise energética, financeira e estudar a complementaridade da geração híbrida, precisamos dimensionar um projeto, simular usando com base uma carga desejada e recursos energéticos disponíveis em uma determinada localização. Essa não é uma tarefa simples, devido a usar múltiplos componentes sujeitos a múltiplos fatores que afetam o seu funcionamento, caracterizar a carga, levar em conta todos os fatores financeiros possíveis e assim por diante, tornaria muito complexa e incerta a análise.

Por isso nesse trabalho foi utilizado o software chamado de Homer Pro.

4.1 Introdução ao Homer Pro.

Homer é um software especializado em fazer análise técnica e financeira de sistemas de geração que se utiliza de recursos renováveis variados como solar, eólico, biomassa, geradores térmicos sejam eles conectados a rede ou não. Com Homer é possível realizar a análise financeira e energética de um determinado projeto de sistema de geração seja híbrido ou não, renovável ou não e conectado a rede elétrica ou não. Para utilizar o Homer basta selecionar a carga a qual se pretende alimentar, os componentes que pretende usar e os recursos energéticos disponíveis, com isso o programa pode responder algumas perguntas como quais componentes devo usar no meu sistema e em qual quantidade para realizar um projeto de maneira mais eficiente possível.

O Homer é um software que conta com mais de 150 000 usuários em mais de 193 países atendendo usuários que realizam projetos como a alimentação de clientes conectados a rede elétrica com geração própria, comunidades isoladas, base militares dentre outras aplicações. (HOMER ENERGY, 2019).

O Homer funciona da seguinte forma, é selecionada uma carga elétrica a qual se deseja alimentar, em seguida, é selecionado componente do projeto de geração, sistema solar, eólico, gerador térmico dentre outros, e por fim o Homer dá como o resultado, várias opções de projeto capazes de suprir a carga selecionada usando os componentes selecionados da forma mais eficiente possível do ponto de vista energético e financeiro.

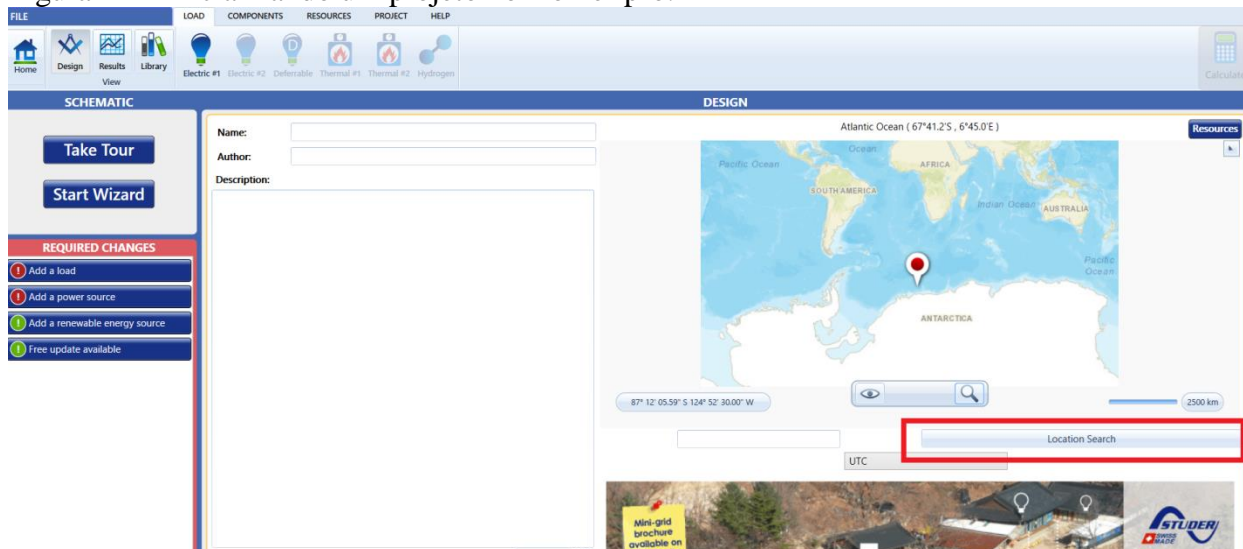
4.2 Realizando um projeto no Homer Pro.

Nesta sessão será realizado um pequeno projeto demonstrativo explanando as principais funcionalidades e procedimentos para realizar a análise de um projeto usando o Homer pro.

4.2.1 Criando um novo projeto

Para iniciar um novo projeto primeiramente deve-se clicar na tela de selecionar a localização do projeto como mostrado na figura 22.

Figura 22 – Inicializando um projeto no Homer pro.



Fonte: Autor.

No caso, foi escolhido o local do projeto como, campos do PICI da Universidade Federal do Ceará (UFC) em Fortaleza-CE no departamento de matemática como mostrado na figura 23.

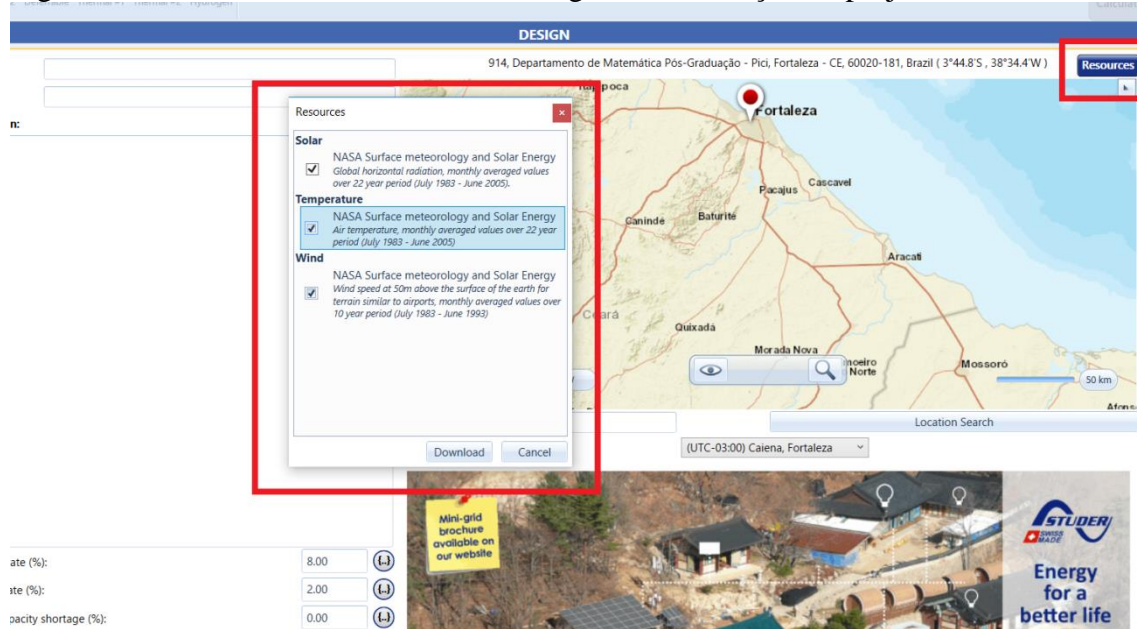
Figura 23 – Selecionando a Localidade do Projeto.



Fonte: Autor.

Em seguida é preciso selecionar com base na localização escolhida as fontes de energia disponíveis no lugar, no caso deste projeto será escolhidas fontes de energia eólica e solar, então basta clicar no botão Resources e em seguida irá abrir uma aba com a opção de usar o banco de dados da NASA de dados de vento, irradiação e temperatura da região do projeto para serem usadas no projeto do sistema como demonstrado na figura 24.

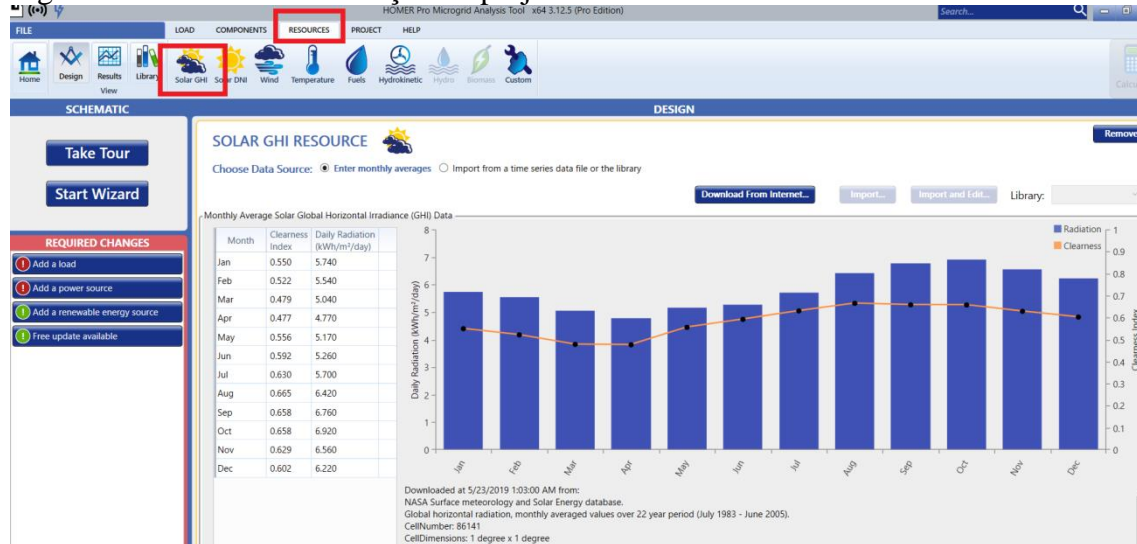
Figura 24 – Selecionando as fontes de energia da localização do projeto.



Fonte: Autor.

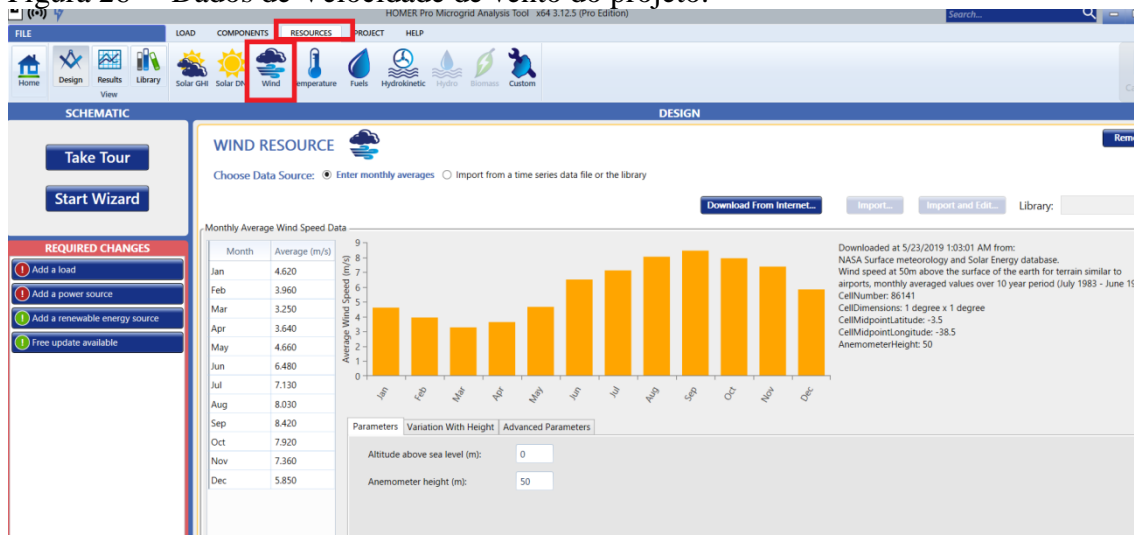
Após selecionar o botão de download o Homer irá baixar os dados selecionados e adicionar ao projeto, os dados baixados podem ser observados da aba Resources e em seguida selecionar o tipo de fonte escolhido, Wind para dados de vento e Solar GHI para dados de irradiação solar como mostrado nas figuras 25 e 26:

Figura 25 – Dados de Irradiação do projeto.



Fonte: Autor.

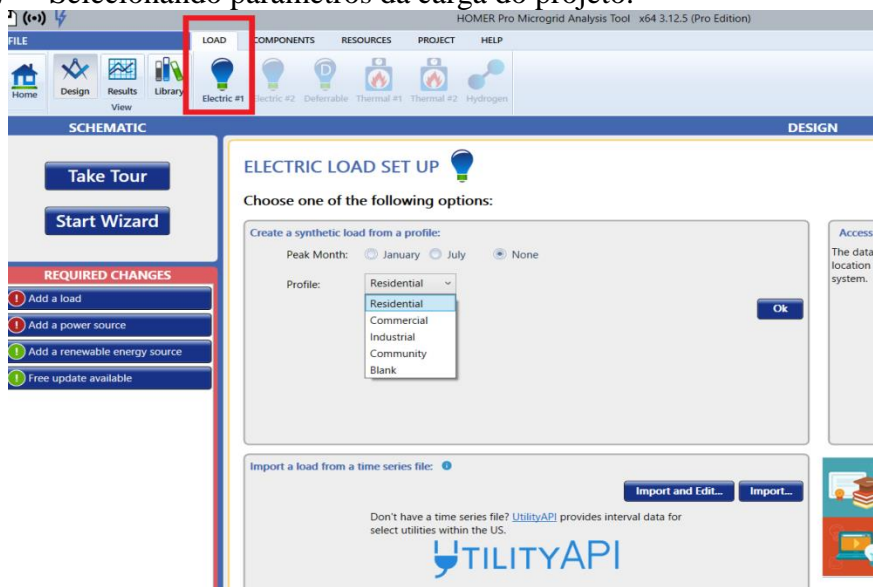
Figura 26 – Dados de Velocidade de vento do projeto.



Fonte: Autor.

O próximo passo é selecionar uma carga para o projeto. Basta ir à aba Load, em seguida selecionar o botão “eletric”, e na tela irá ter alguns parâmetros da carga o qual será ligada ao projeto e é com base nesta carga que o Homer irá dimensionar os sistemas de geração necessários. No caso deste projeto foi selecionada uma carga residencial sem nenhum mês de consumo de pico como mostrado na figura 27.

Figura 27 – Selecionando parâmetros da carga do projeto.



Fonte: Autor

Clicando em Ok irá aparecer uma tela com todos os dados de carga detalhadamente, com médias de consumo diárias anuais e mensais, padrões de consumo ao longo do dia do mês e do ano dentre outras informações e todas podendo ser modificadas manualmente nesta mesma tela como indicado na figura 28.

Figura 28 – Dados da carga do projeto.

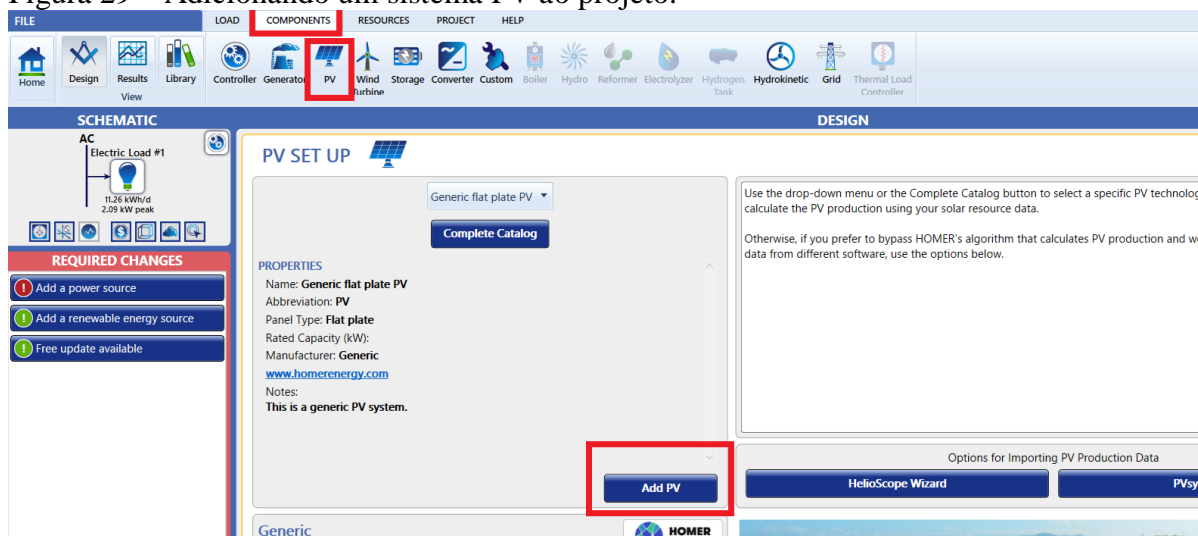


Fonte: Autor.

O próximo passo é selecionar as fontes de energia que iram suprir a carga selecionada, existem várias opções no Homer como energia solar, eólica, rede elétrica, gerador térmico, rede elétrica, célula combustíveis dentre outras, como o nosso objetivo é o projeto de um sistema híbrido desconectado da rede, os sistemas de geração selecionados serão solar e eólico.

Para selecionar o sistema FV basta ir à aba “componentes” e selecionar na opção PV. Nessa tela novamente podemos selecionar alguns parâmetros do sistema FV do projeto, mas para adicionar um sistema solar genérico basta clicar em Add PV como mostrado na figura 29.

Figura 29 – Adicionando um sistema FV ao projeto.

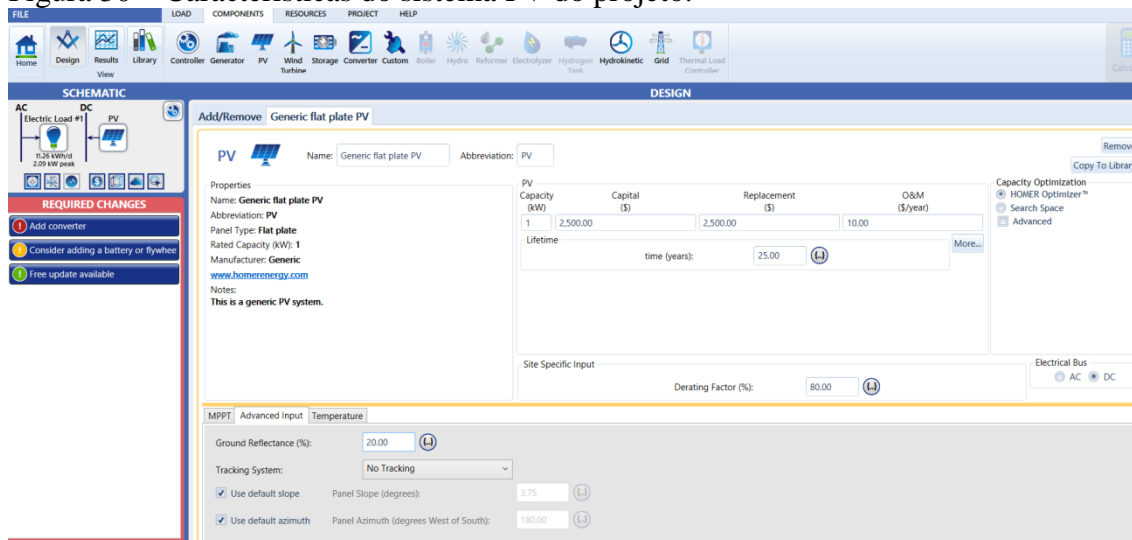


Fonte: Autor.

Após adicionar o sistema FV irá surgir na tela várias características sobre o mesmo, com diversos parâmetros todos editáveis como custo por kW, tamanho do sistema, eficiência, custo de manutenção, vida útil, fator de depreciação, refletância dos painéis, temperatura dos painéis e vários outros. Note que não há informações sobre o

número total de painéis do sistema ou o inversor do mesmo, o Homer irá dimensionar o sistema FV automaticamente de acordo com a carga selecionada, por tanto não há necessidade de estudo de dimensionamento prévio para fazer análise de um projeto no Homer, as características do sistema FV adotado nesse projeto de demonstração é mostrado na figura 30.

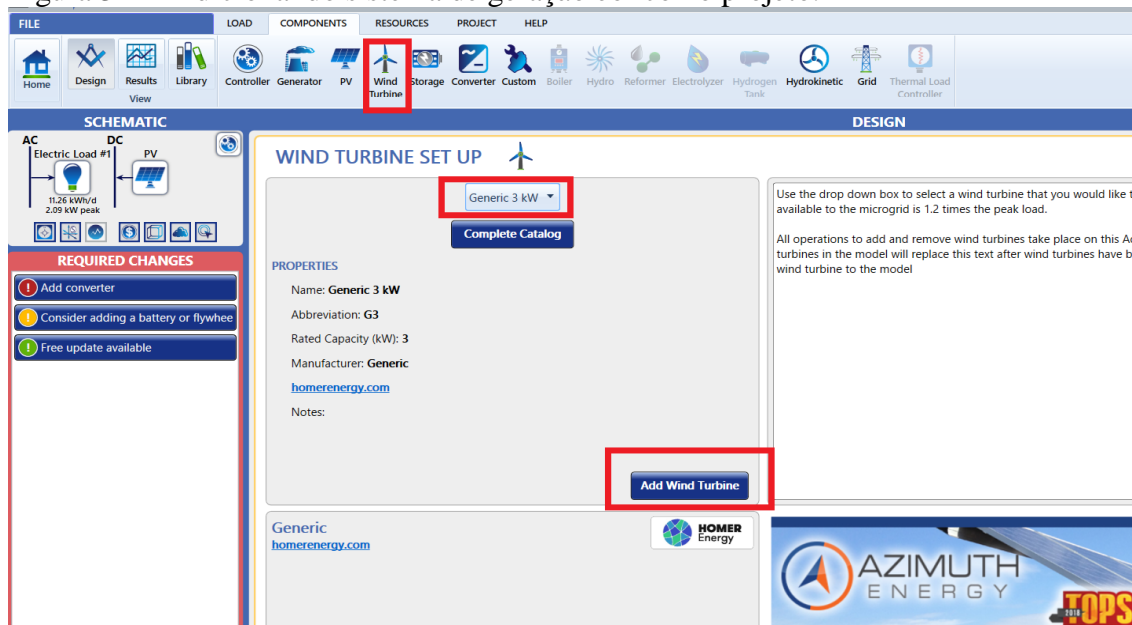
Figura 30 – Características do sistema FV do projeto.



Fonte: Autor.

Em seguida é preciso selecionar o sistema de eólico, para isso basta ir à aba componente e selecionar Wind Turbine. Nessa tela, novamente é possível selecionar alguns parâmetros da turbina eólica do projeto, no caso foi selecionado turbina de 1 kW genérica como mostrado na figura 31.

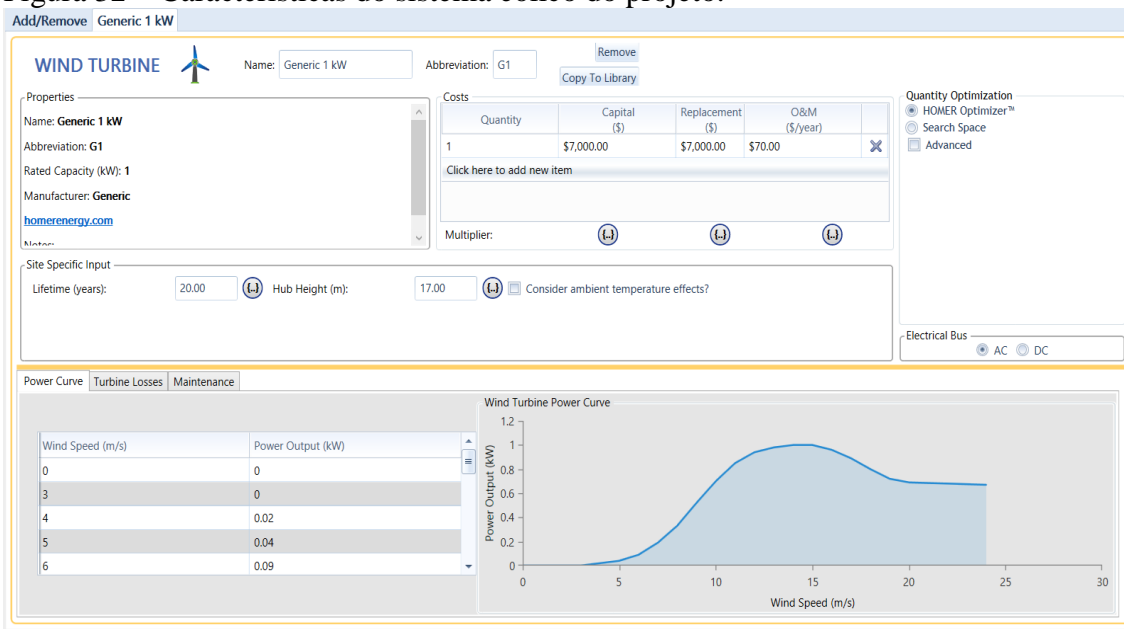
Figura 31 – Adicionando sistema de geração eólico no projeto.



Fonte: Autor.

Após clicar em add Wind Turbine, a próxima tela irá mostrar, assim como no caso do sistema FV, diversas características do sistema de geração eólico do projeto e todos editáveis as características desse sistema para o projeto demonstração, estão presentes na figura 32.

Figura 32 – Características do sistema eólico do projeto.

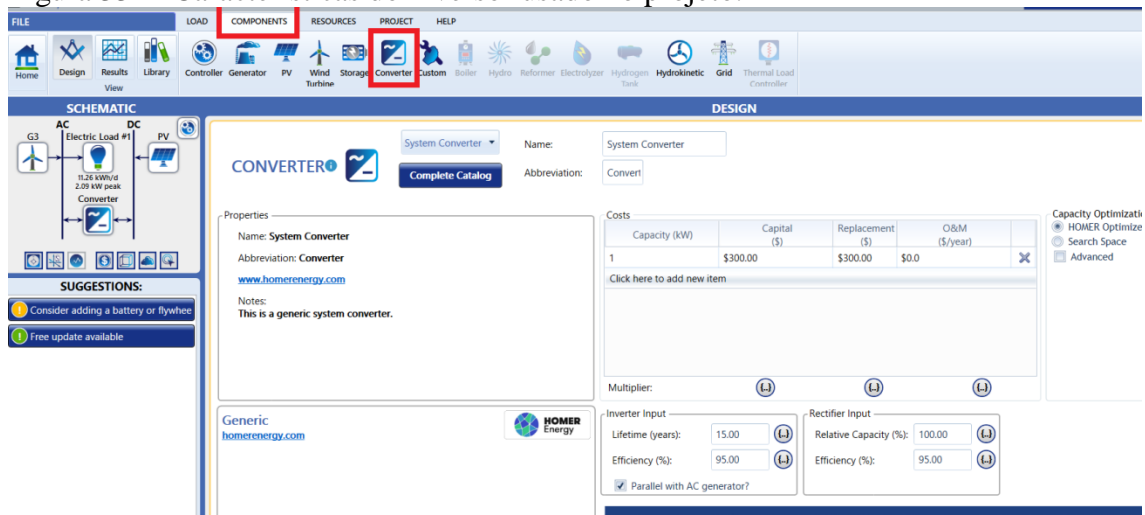


Fonte: Autor.

Diferente do sistema FV, para adicionar um sistema eólico é necessário selecionar a potência da turbina desejada. Com isso, o Homer irá dimensionar o número de turbinas daquele tipo escolhido de acordo com a carga e os outros componentes do projeto. Caso queira adicionar tipos diferentes de turbinas no mesmo projeto, basta adicionar um novo sistema eólico com a turbina desejada e o Homer irá processar as melhores opções de projeto levando em conta os diferentes sistemas eólicos.

Próximo passo é adicionar um inversor ao sistema, uma vez que o mesmo usa um sistema solar FV que gera energia elétrica em corrente contínua e a carga selecionada funciona com energia elétrica em corrente alternada. Para isso basta ir à aba componente e selecionar “Converter”. Uma janela irá aparecer com todas as características de inversor para serem editadas de acordo com o projetista, no caso foi selecionado um inversor genérico e o Homer irá dimensionar a sua potência de acordo com o sistema FV, a carga e o banco de baterias o qual irá alimentar a carga. A característica de dados de inversores utilizados neste projeto demonstração está mostrada na figura 33.

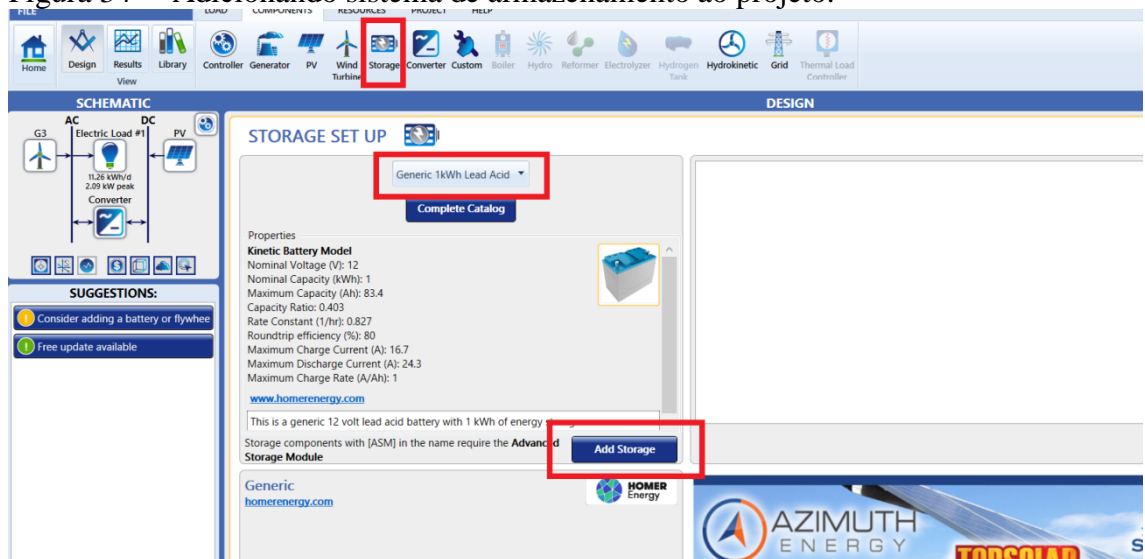
Figura 33 – Características do inversor usado no projeto.



Fonte: Autor.

O ultimo componente do projeto é o banco de baterias, uma vez que o sistema é desconectado da rede, se faz necessário o uso de um banco de baterias para alimentar a carga em momentos que os recursos eólico e solar não estejam disponíveis. Para isso basta selecionar a aba componente e escolher a opção “Storage”. Irá surgir uma tela a qual se pode selecionar o tipo de bateria do sistema e em seguida clicar em “add storage” como mostrado na figura 34.

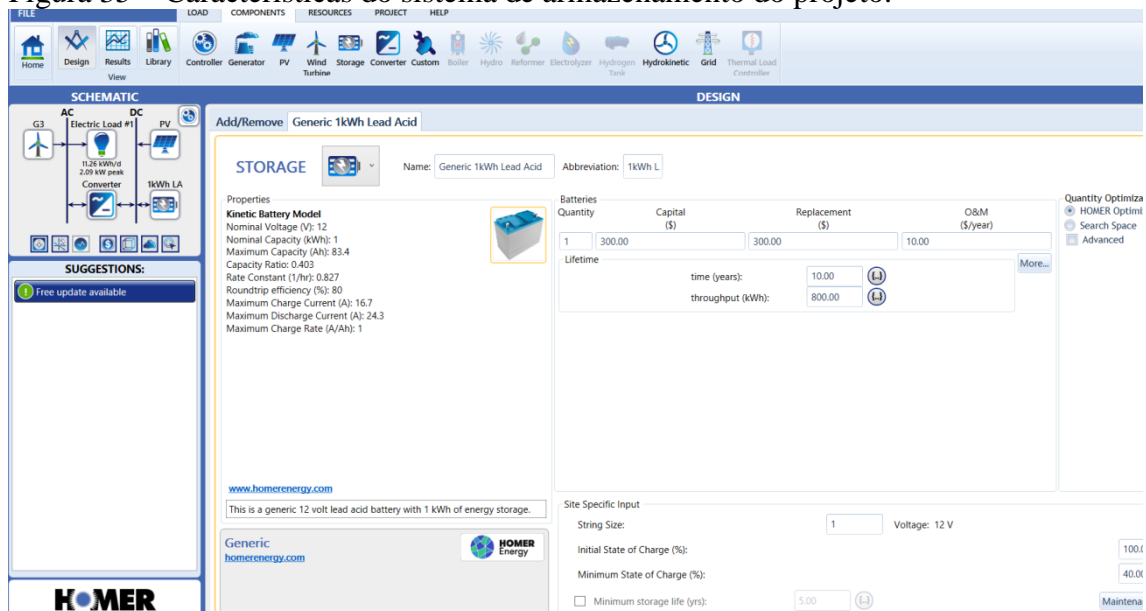
Figura 34 – Adicionando sistema de armazenamento ao projeto.



Fonte: Autor.

Uma janela com todas as características do sistema de armazenamento será exibida e nela é possível editar qualquer característica do sistema de armazenamento como tipo de baterias, custo, vida útil dentre outros como mostrado na figura 35.

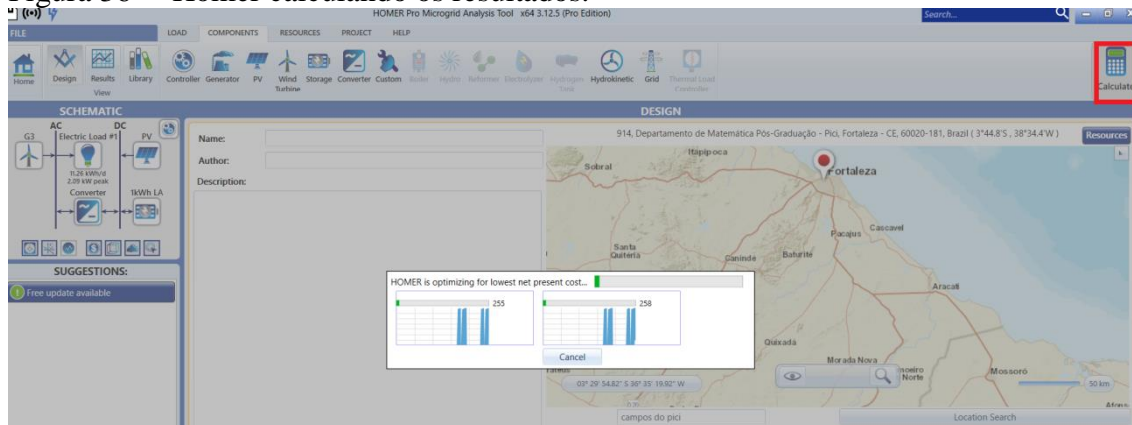
Figura 35 – Características do sistema de armazenamento do projeto.



Fonte: Autor.

Com isso temos o projeto de um sistema de geração híbrido solar – eólico desconectado a rede completamente montado basta clicar no ícone “Calculate” e o Homer irá processar as informações do projeto e nos dar os resultados como mostrado na figura 36.

Figura 36 – Homer calculando os resultados.



Fonte: Autor.

A seguir o Homer irá exibir na tela os projetos viáveis de acordo com os parâmetros seleccionados previamente. Na parte superior da tela é colocado o caso mais viável e na parte inferior outra opção de projetos viáveis de acordo com os componentes seleccionados previamente como está mostrada na figura 37.

Figura 37 – Resultados do Homer pro para os parâmetros selecionados.

Architecture		Cost				System			PV		G1			1k			
PV (kW)	G1	1kWh LA	Converter (kW)	Dispatch	NPC (\$)	COE (\$)	Operating cost (\$/yr)	Initial capital (\$)	Ren Frac (%)	Total Fuel (L/yr)	Capital Cost (\$)	Production (kWh/yr)	Capital Cost (\$)	Production (kWh/yr)	O&M Cost (\$)	Autonomy (hr)	Annus
6.44	28	2.26	CC		\$37,315	\$0.703	\$938.67	\$25,180	100	0	16,103	10,977				35.8	2,461
6.50	1	27	2.50	CC	\$44,754	\$0.843	\$978.81	\$32,100	100	0	16,250	11,077	7,000	1,316	70.0	34.6	1,950
72	128	8.00	CC		\$726,780	\$13.69	\$14,077	\$544,800	100	0			504,000	94,731	5,040	164	1,110

Fonte: Autor.

No caso o Homer nos deu Três opções de projeto, sendo um híbrido, um com apenas geração eólica e outro com apenas geração FV. Como pode ser observado, o Homer selecionou o sistema FV como o mais viável, devido ao custo associado a ele ser bem menor. O fato de o sistema FV ser o mais viável com certeza está associado às características das fontes de energia do local.

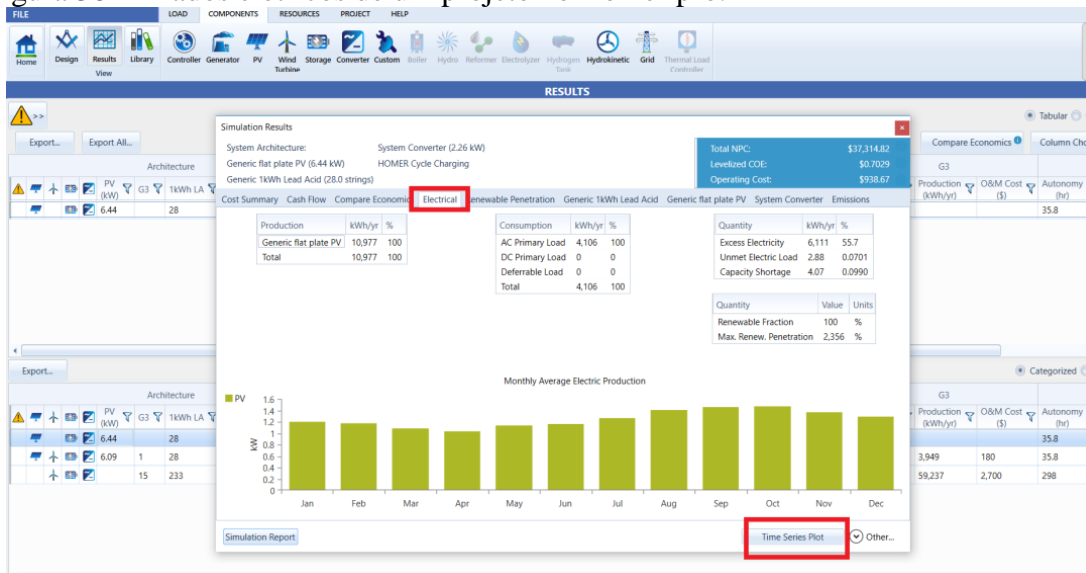
4.3 Análises de projeto usando o Homer Pro.

Após obter todos os resultados com o Homer pro, podemos fazer uma complexa análise financeira e elétrica usando todos os dados disponibilizados pelo software. Nesta seção será mostrado como obter esses dados.

4.3.1 Dados Elétricos

Para obter informações sobre os dados elétricos de um projeto no homer pro, basta da um clique duplo na linha do projeto desejado na tela de resultados, logo em seguida será exibida uma tela com todas as informações do projeto e em seguida selecionar a aba electrical como mostrado na figura 38.

Figura 38 – Dados elétricos de um projeto no Homer pro.

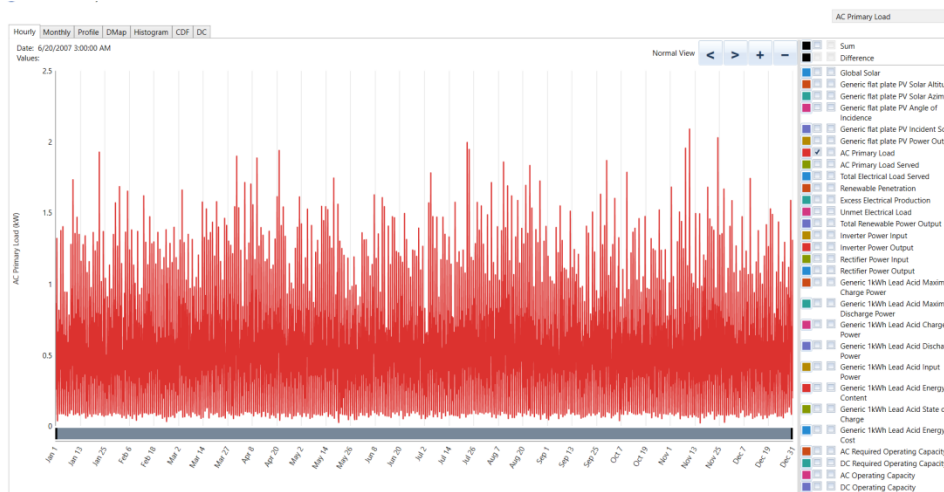


Fonte: Autor.

Nesta tela temos vários dados elétricos a respeito do projeto como produção média por mês excesso de energia, o quanto o projeto está atendendo a carga elétrica e vários outros.

Clicando no botão de Time Series Plot outra janela será aberta, nela é possível plotar o gráfico de todas as informações do projeto, como carga de baterias, produção de energia por cada uma das fontes de energia, a energia das fontes de energia que está sendo utilizada dentre várias outras como pode ser notado na figura 39.

Figura 39 – Tela de gráficos do projeto.



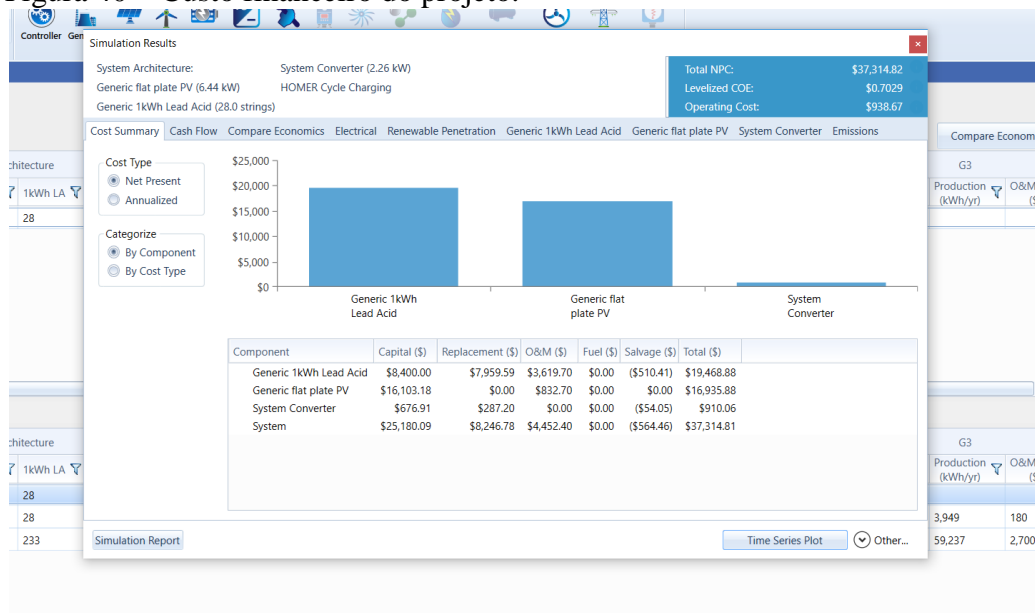
Fonte: Autor.

4.3.2 Dados Financeiros

Os dados financeiros podem ser obtidos da mesma forma que os dados elétricos, basta selecionar a “aba cost summary”, nela há todas as informações financeiras a

respeito do investimento necessário para se realizar o projeto em análise como mostrado na figura 40.

Figura 40 – Custo financeiro do projeto.



Fonte: Autor.

Outra aba importe para ser analisada é a aba “cash flow”, que nos da o fluxo de caixa do projeto como mostrado na Figura 41.

Figura 41 – Fluxo de caixa do projeto.



Fonte: Autor.

Com esses dados é possível então realizar todas as análises que temos como objetivo neste trabalho, O próximo capítulo será dedicado à simulação do projeto de sistema de geração em Petrolina e Parnaíba considerando parâmetros reais de disponibilidade de energia, componentes do projeto e financeiro.

4.4 Validando o Homer Pro.

O Homer realiza o dimensionamento de sistemas de geração de energias renováveis de maneira muito eficiente, mas para validar esse dimensionamento faremos o dimensionamento do sistema híbrido realizado no Homer deste capítulo usando método de dimensionamento técnico. O método a seguir é descrito em detalhes na tese de doutorado “Dimensionamento, Modelagem e Controle de Componentes de Sistema Híbrido de Energia Baseado em Energias Renováveis e Hidrogênio” do autor Manuel Jesús Castañeda Balbuena, (2013). Nele é realizado o dimensionamento de sistemas híbridos de geração usando diversos métodos. Um dos métodos usados é o método de dimensionamento técnico que é descrito que será a metodologia que iremos adotar para validar os resultados do Homer.

Os parâmetros a serem definidos são o tamanho da turbina eólica, painéis solares fotovoltaicos, e a capacidade das baterias e a carga a ser atendida é uma carga com consumo de 11,26 kWh por dia, idêntica a do projeto exemplo que foi dimensionado usando o Homer.

O fator de capacidade de um sistema Híbrido é definido na equação 1:

$$Kcf = \frac{\text{Potência de saída}}{\text{Potência nominal}} \quad (1)$$

Os valores de Kcf adotados são os mesmos adotados pelo autor em sua tese, que representa um fator de capacidade típico para cada sistema de geração, ou seja, 22% para o sistema eólico e dos painéis FVs de 17 %.

O objetivo do dimensionamento é minimizar a diferença entre a energia gerada a partir de fontes de energia renováveis e demanda durante período de tempo determinado como é descrito pela equação 2:

$$P = Kcf_{wt} \times P_{wt} + Kcf_{pv} \times P_{pv} - P_{Demanda} = 0 \quad (2)$$

Em que, P_{wt} é a potência nominal do aerogerador, P_{pv} é a potência do sistema FV e $P_{Demanda}$ é a demanda da carga diária que no nosso caso é de 0,47 kW .

Assim, nosso objetivo é encontrar os valores de P_{wt} e P_{pv} que levam esta equação a próximo de 0.

Turbina Eólica:

A turbina escolhida é de 1 kW genérica como escolhida no projeto exemplo. Assim podemos dimensionar o sistema FV considerando 1 turbina eólica. Como o fator de capacidade adotado é de 22% a geração da turbina será de 5,28 kWh/dia

Fotovoltaico (FV):

Para dimensionar o sistema FV inicialmente devemos adotar o painel usado, no caso serem painéis de 330 W, para determinar o valor necessário de potência de painéis iremos primeiro calcular a geração diária de energia elétrica necessária para suprir a carga como descrito na equação 3:

$$P_{PV} = 330 \times 0,17 \times 5,56 = 311,91 \text{ Wh} \quad (3)$$

Sendo que 330 é o valor da potência nominal dos painéis, 0,17 é o valor do fator de capacidade do sistema FV e 5,56 é o número de horas no dia em que o painel fica próximo do seu valor de potência nominal em Fortaleza.

Então para atender a carga com demanda de 5,98 kWh/dia é necessário, então o número de painéis necessários são calculados na equação 4:

$$\frac{5,98}{0,311} = 19,22 = 20 \text{ painéis} \quad (4)$$

Logo, a potência do sistema será como descrito na equação 5:

$$20 \times 330 = \mathbf{6,6 \text{ kW}}. \quad (5)$$

Baterias: As baterias são dimensionadas utilizando como base as características da bateria e o consumo da carga, no caso temos um consumo diário de 11,26 kWh e baterias de 12V e 80 Ah, logo podemos determinar o número de baterias com a equação 6.

$$\text{Baterias} = \frac{11,26 \times 10^3}{12 \times 80} = 11,729 = 12 \text{ Baterias} \quad (6)$$

Ou seja, o segundo este método o número de baterias mínimas necessárias para suprir a carga são 12 baterias.

Comparativo dos métodos:

A tabela 7 nos dá um resumo dos resultados dos dimensionamentos dos dois métodos com isso podemos estimar se o dimensionamento realizado pelo Homer pro é condizente com o método de dimensionamento técnico.

Tabela 7 – Comparativo dos métodos de dimensionamento. Fonte: Autor.

	Método do Dimensionamento Técnico.	Homer Pro
Potência do sistema Fotovoltaico (kW)	6,6	6,5
Potência do sistema Eólico	1	1
Baterias (unidades)	12	27

Fonte: Autor.

Com isso temos que os valores dimensionados pelo método técnico para a potência dos sistemas de geração são bem próximos dos valores calculados pelo Homer, entretanto o número de baterias dimensionado pelo Homer foi bem maior, isso devido ao Homer dimensionar as baterias considerando variedade dos recursos energéticos de modo que é necessário um uso maior de baterias para garantir o atendimento à carga.

5 REALIZANDO OS PROJETOS DE PETROLINA E PARNAÍBA

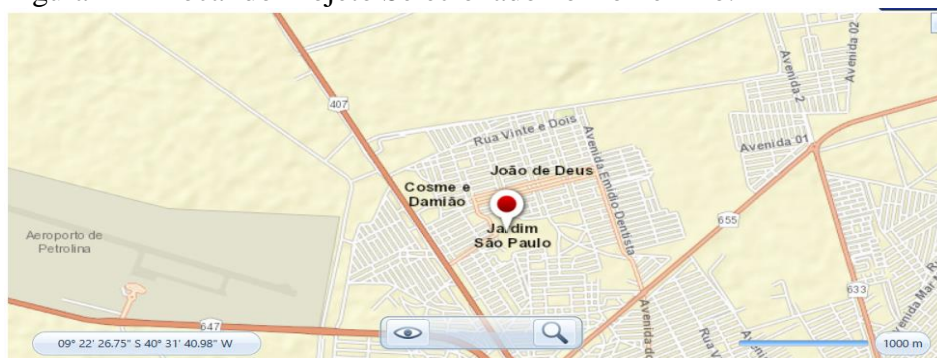
Agora que foram apresentados os dados de energia, sabemos os componentes necessários para realizar o projeto de sistemas híbridos e um poderoso software de projeto, podemos finalmente realizar a simulação de tais projetos do modo mais realista possível para utilizar os dados resultantes em nossas análises.

5.1 Projeto em Petrolina

5.1.1 Local do Projeto em Petrolina

O primeiro projeto que iremos simular é um projeto de sistema híbrido solar – eólico localizado na cidade de Petrolina, mais especificamente localizado no Instituto Federal do Sertão Pernambucano, de endereço BR 407, Km 08, Jardim São Paulo, Petrolina – PE, que é o local o qual foram realizadas as medições dos valores de velocidade do vento e irradiação, cujos dados já foram apresentados no capítulo 3. A figura 42 mostra o local selecionado no projeto do Homer.

Figura 42 – Local do Projeto Selecionado no Homer Pro.



Fonte: Autor.

Outro fator importante é a temperatura, ao escolher a localização do projeto no Homer pro, o mesmo nos fornece os dados de temperatura do local indicado segundo a biblioteca da National Aeronautics and Space Administration (NASA), é importante levar em consideração a temperatura da localidade, pois é um fator determinante na geração de energia elétrica em uma usina FV. Esses dados são mostrados na figura 43.

Figura 43 – Dados de Temperatura de Petrolina.



Fonte: Autor.

5.1.2 Recursos Energéticos do Projeto de Petrolina

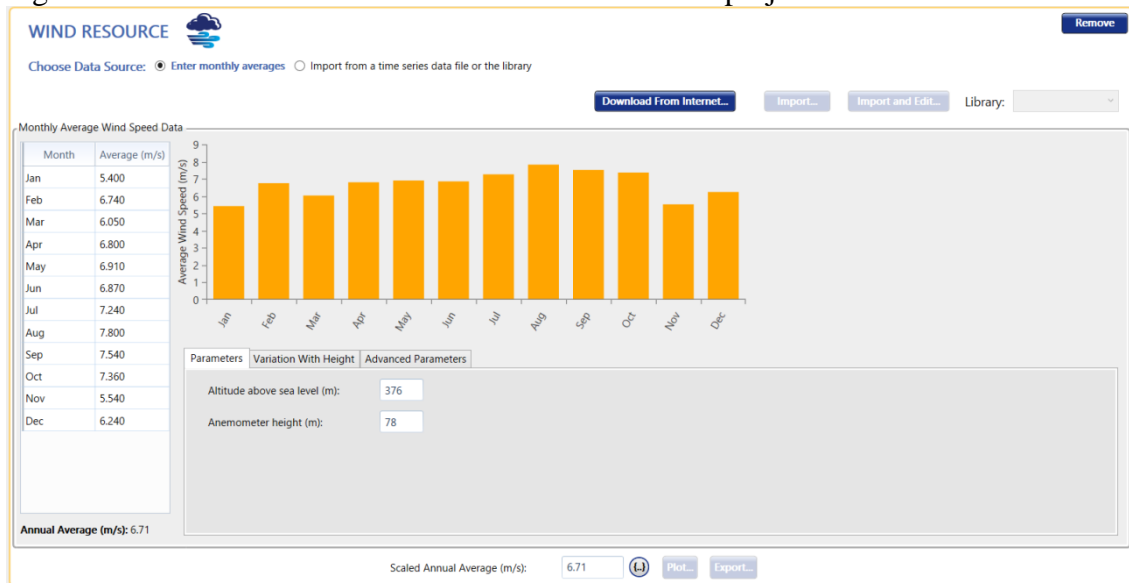
Usando os dados de energia disponibilizados e caracterizados no capítulo 3 para alimentar o Homer pro, temos como resultados as características de velocidade de vento e irradiação GHI como descrito nas figuras 44 e 45.

Figura 44 – Características de Irradiação Do Projeto de Petrolina.



Fonte: Autor.

Figura 45 – Características de Velocidade do vento do projeto de Petrolina.

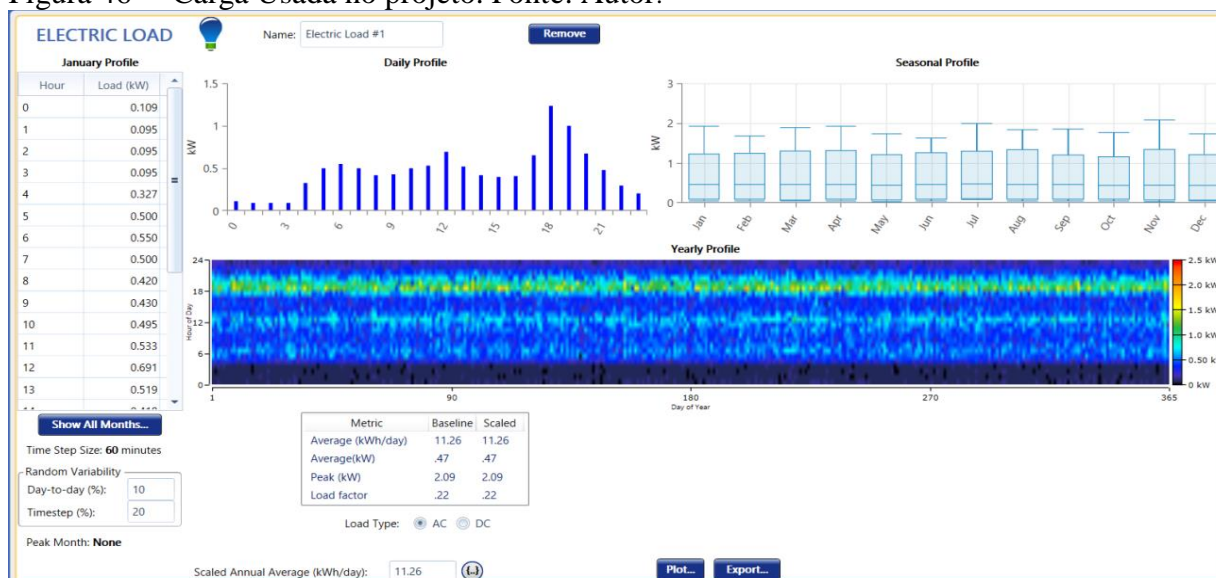


Fonte: Autor.

5.1.3 Carga do Projeto

O próximo passo é escolher a carga a qual será alimentada pelo sistema de geração do projeto, no caso foi escolhida uma carga do tipo residencial com os parâmetros padrões do Homer, que consiste em uma carga com 11,26 de demanda diária com o padrão de consumo está mostro na figura 46:

Figura 46 – Carga Usada no projeto. Fonte: Autor.



Fonte: Autor.

5.1.4 Sistema fotovoltaico do projeto

O Próximo passo é estabelecer cada um dos componentes utilizados no projeto, no caso primeiramente vamos determinar os parâmetros do sistema solar FV do projeto. Para ter um projeto no Homer o mais próximo da realidade foi preciso realizar uma pesquisa de mercado a respeito do custo por kW de um sistema solar FV sem considerar o inversor, pois no caso do nosso projeto o sistema é desconectado da rede então é necessário um inversor a parte do sistema fotovoltaico. Segue abaixo a lista de materiais tipicamente necessários para a instalação de um sistema FV com seu custo como descrito na tabela 8:

Tabela 8 – lista de materiais típicos de um sistema FV.

Equipamento	Preço por unidade (R\$)
Módulo Fotovoltaico Canadian 335 W Poly cristalino	460
String Box Sices ½ DC	507
Perfil de alumínio	32
Junção para perfil de alumínio	11,19
Terminal final 39..41mm	3,45
Terminal intermediário	4,83
Parafuso Cabeça de martelo	3,30
Porca M10 INOX A2	0,65
Parafuso estrutural AISI 316 M10X256	19,80
Conectores Macho/Femea MC4	10,67
Cabo Solar 6 mm CC	3,56

Fonte: Sices Sola, 2019.

Todos os materiais listados correspondem aos materiais típicos de um kit de geração FV de 3 kWp que tem um custo total de 5107,37 R\$, como o Homer necessita do custo por kW do sistema FV, basta dividir esse valor por 3 dando um total de

1702,45 kW/R\$. Com isso os parâmetros do sistema FV foram inseridos como mostrado na figura 47.

Figura 47 – Parâmetros do sistema FV adotados.

The screenshot displays the configuration window for a PV system in HOMER software. The main configuration area includes the following fields:

- Name:** Canadian Solar33SCS6U-3: | **Abbreviation:** Solar
- Capacity (kW):** 1 | **Capital (\$):** 1,702.45 | **Replacement (\$):** 1,702.45 | **O&M (\$/year):** 25.00
- Lifetime (years):** 25.00
- Derating Factor (%):** 85.00
- Electrical Bus:** AC (selected) / DC

The **Costs** table is as follows:

Size (kW)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/year)
1	\$0.00	\$0.00	\$0.00

The **Search Space** section shows a list with one entry: Size (kW) 100.

The **Capacity Optimization** section has the following options:

- HOMER Optimizer™
- Search Space
- Advanced

Fonte: Autor.

5.1.5 Armazenamento do Projeto

Como o projeto que queremos analisar é um sistema off grid, ou seja, desconectado da rede elétrica, há necessidade de um sistema de armazenamento, para alimentar a carga de maneira adequada. Novamente, para configurar um componente do Homer basta estabelecer alguns parâmetros, no caso do sistema de armazenamento, é necessária a configuração do tipo de bateria usado e o seu custo. A bateria escolhida para o projeto foi uma bateria de Chumbo – Ácido de 12 V com 80 Ah, da marca Moura, modelo 12mn80 com o valor de 460 R\$ por unidade. Essa bateria foi escolhida por ser uma bateria com bom custo benefício e de fácil acesso por estar bastante consolidada no mercado pelo seu uso como bateria automotiva, mas por ser uma bateria chumbo – Ácida pode ser utilizada em diversas aplicações como em centrais de telecomunicação, sistemas de energia solar, Iluminação de emergência, Alarmes, entre outras. Os parâmetros adotados no Homer para o sistema de armazenamento do projeto são mostrados na figura 48.

Figura 48 – Parâmetros do sistema de armazenamento do projeto.

STORAGE

Name: Bateria Estacionaria 12v 80 Abbreviation: Baterias

Properties
Kinetic Battery Model
 Nominal Voltage (V): 12
 Nominal Capacity (kWh): 1
 Maximum Capacity (Ah): 83.4
 Capacity Ratio: 0.403
 Rate Constant (1/hr): 0.827
 Roundtrip efficiency (%): 80
 Maximum Charge Current (A): 16.7
 Maximum Discharge Current (A): 24.3
 Maximum Charge Rate (A/Ah): 1

www.homerenergy.com

This is a generic 12 volt lead acid battery with 1 kWh of energy storage.

Generic
homerenergy.com

Batteries

Quantity	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/year)
1	460.00	460.00	10.00

Lifetime

time (years): 5.00

throughput (kWh): 800.00

Quantity Optimization
 HOMER Optimizer™
 Search Space
 Advanced

Site Specific Input

String Size: 1 Voltage: 12 V

Initial State of Charge (%): 100.00

Minimum State of Charge (%): 40.00

Minimum storage life (yrs): 5.00

Maintenance Schedule...

Fonte: Autor.

5.1.6 Inversor do Projeto

Como o nosso projeto se utiliza de um sistema de armazenamento para alimentar as cargas e as baterias que compõe esse sistema funcionam é corrente contínua, logo é necessário o uso de inversor para que as cargas sejam alimentadas de maneira coerente. O inversor escolhido para ser utilizado no projeto é um inversor do modelo ABB Inverter UNO-DM-3.3-TL-PLUS, esse inversor é um inversor de uma das marcas com maior renome no mundo, faz parte do catálogo de inversores da biblioteca do Homer e atende muito bem as necessidades do nosso projeto, uma vez que não é necessário um inversor com potência superior a 3 kW para atender as necessidades de uma carga do perfil do projeto, seu preço de mercado no Brasil segundo a SICES gira em torno de 4600 R\$. Os parâmetros adotados para o inversor inseridos no Homer são mostrados na figura 49.

Figura 49 – Parâmetros do inversor do projeto.

CONVERTER

Name: INVERSOR UNO-DM-3.3-T Abbreviation: Inversor

Properties
 Name: INVERSOR UNO-DM-3.3-TL-PLUS-SB COM WI-FI
 Abbreviation: Inversor
www.homerenergy.com
 Notes:
 This is a generic system converter.

Generic
homerenergy.com

Costs

Capacity (kW)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/year)
3	\$4,600.00	\$4,600.00	\$0.00

Multiplier: [] [] []

Inverter Input

Lifetime (years): 15.00

Efficiency (%): 95.00

Parallel with AC generator?

Rectifier Input

Relative Capacity (%): 100.00

Efficiency (%): 95.00

Capacity Optimization
 HOMER Optimizer™
 Search Space

Size (kW): [] [] []

Mini-grid brochure available on our website

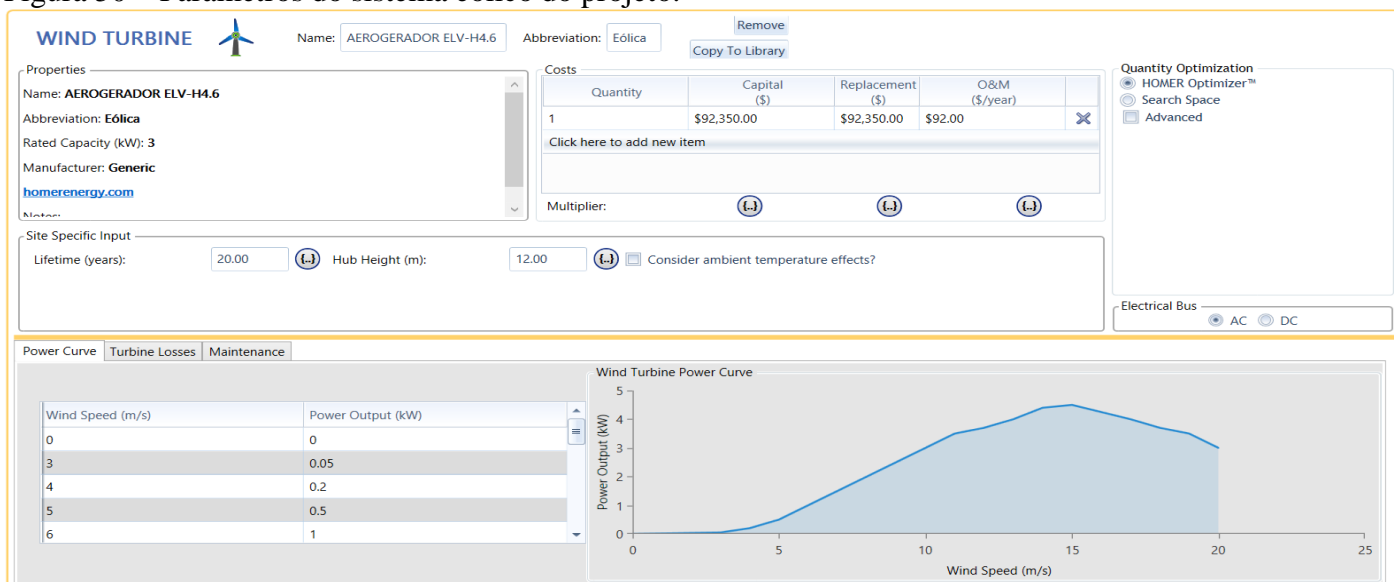
STUDER Energy for a better life

Fonte: Autor.

5.1.7 Sistema Eólico do projeto

O ultimo componente do projeto é o sistema de energia eólico, para estabelecer os parâmetros do Homer desse sistema precisamos escolher a turbina do sistema e o seu custo. Para isso foi solicitada uma proposta comercial para empresa ELETROVENTO S.A, 2019. Nesta proposta foi solicitado o orçamento de um sistema de geração eólica utilizando um gerador eólico de 3 kW, considerando todo o custo de projeto, instalação, componentes e transporte o custo do sistema foi de 92 320 R\$, então é com base neste orçamento que iremos configurar os parâmetros do sistema do projeto no Homer como mostrado na figura 50.

Figura 50 – Parâmetros do sistema eólico do projeto.



Fonte: Autor.

5.1.8 Resultados do projeto de Petrolina

Ao rodar o Homer pro para encontrar os sistemas viáveis com base nos componentes citados nos itens anteriores, foram apresentados como possíveis configurações de projeto as seguintes descritas na tabela 9:

Tabela 9 – Resultados do Homer para o projeto em Petrolina.

Tipo do sistema	Sistema FV (kW)	Sistema eólico (Unidades)	Inversor (kW)	Baterias (Unidades)	Valor presente Líquido (VPL) (R\$)
Geração FV	7,55	0	3,00	15	44 528
Geração Eólica	0	3	3,00	30	371 445
Geração SHEFV	7,35	1	3,00	12	145 894

Fonte: Autor.

Podemos notar que o projeto mais recomendado para o padrão de carga e energias disponíveis, é o solar FV, com um valor muito inferior aos outros devido aos custos do projeto com geração eólica serem muito mais elevados que o FV. Entretanto há vantagens em se utilizar o sistema híbrido em relação a este projeto utilizando apenas sistema FV que será explorado no próximo capítulo onde serão tratados todos os dados do resultado do Homer e será realizada a análise elétrica e financeira dos projetos.

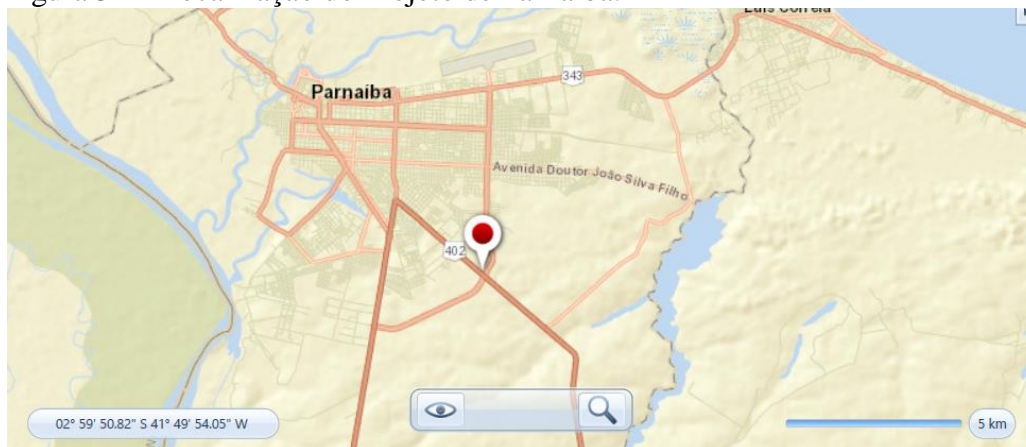
5.2 Projeto de Parnaíba

A seguir foi realizado o projeto em Parnaíba, nos mesmos moldes do projeto anterior alterando apenas a localização e por consequência, os parâmetros de energia, devido Parnaíba ter características geográficas distintas das de Petrolina, principalmente por ser uma cidade localizada mais próxima do litoral é de se esperar que haja uma intensidade maior de ventos nessa região, contudo, há mais nebulosidade o que leva a reduzir a velocidade do vento e a irradiação, todos esses fatores serão analisados com maior cautela no próximo capítulo.

5.2.1 Localização do Projeto de Parnaíba

O local escolhido foi o Instituto Federal de Parnaíba, o mesmo local onde foram realizadas as medições de velocidade do vento e irradiação. Esse local foi inserido no Homer como mostrado na figura 51 a baixo.

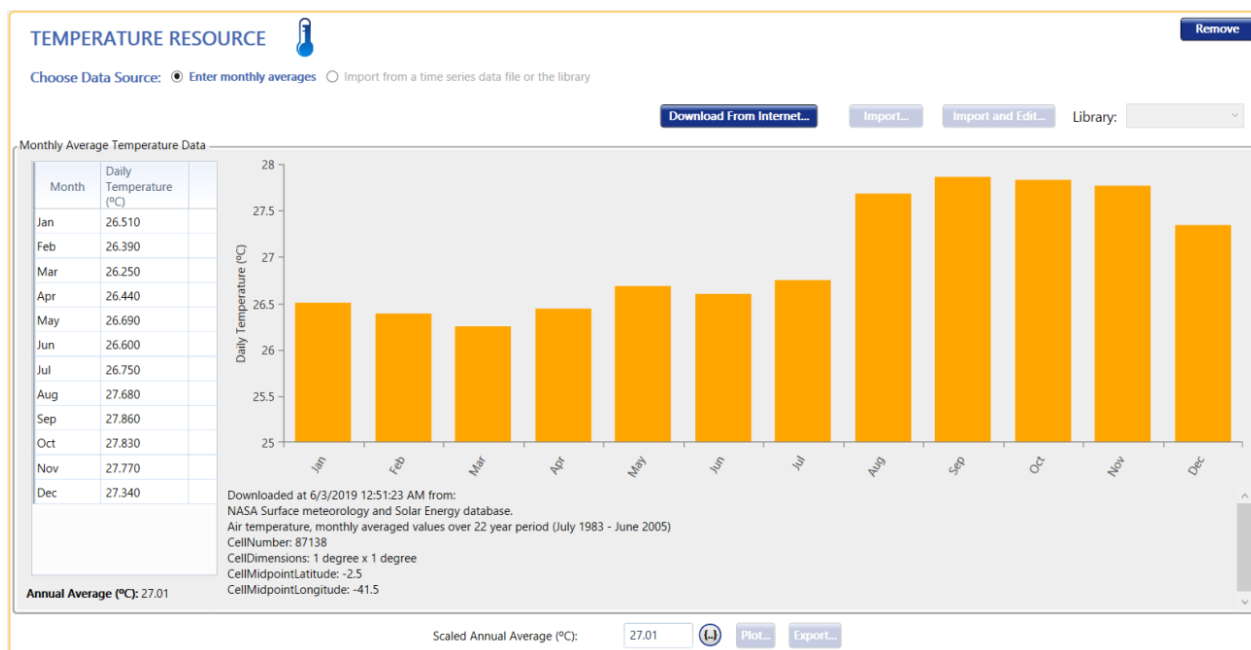
Figura 51 – Localização do Projeto de Parnaíba.



Fonte: Autor.

Um comentário importante a se falar a respeito desta localizar é notar que fica afastado do centro da cidade, o que contribui para médias de velocidade mais adequadas a geração eólica, assim como sofrer menos com sombreamentos do que em regiões localizadas no centro urbano de Parnaíba. A temperatura média por mês será distinta da presente em Petrolina uma vez que Parnaíba é uma cidade litorânea. A figura 52 mostra os dados de temperatura adotados pelo Homer para a localização do projeto.

Figura 52 – Dados de Temperatura de Parnaíba.



Fonte: Autor.

5.2.2 Recursos energéticos do projeto de Parnaíba

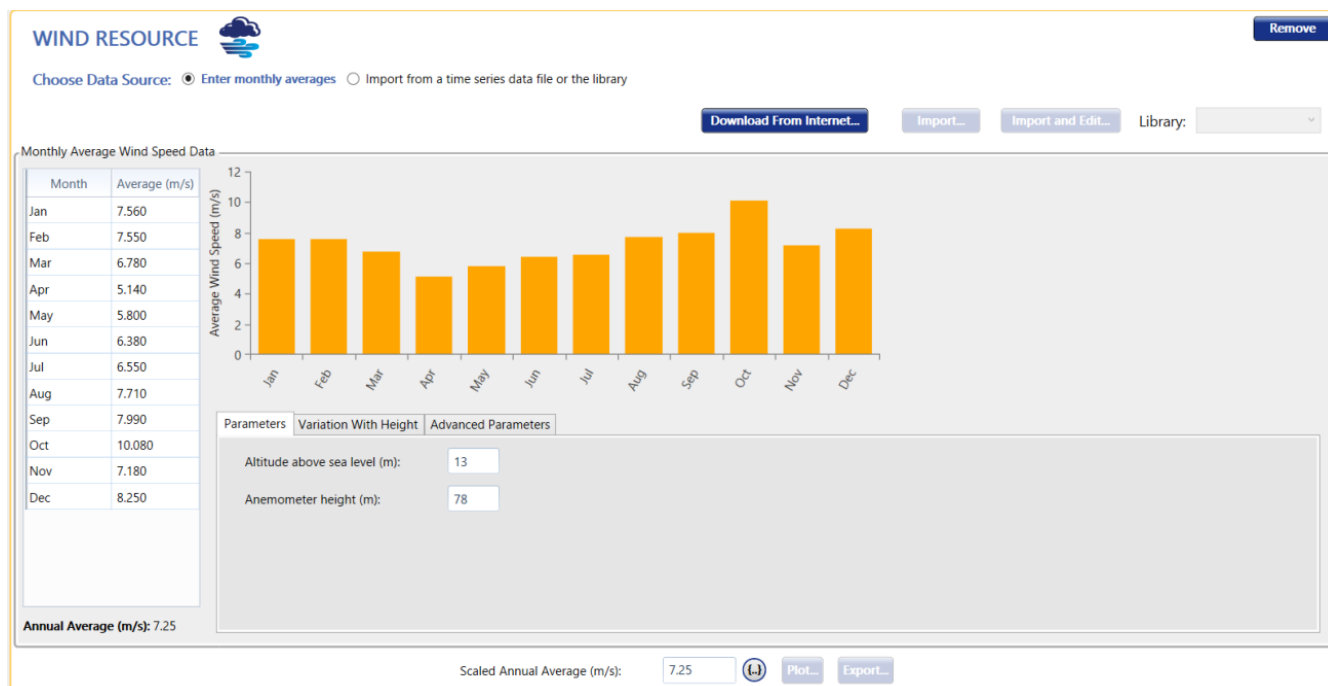
Os dados das fontes de energia eólica e solares utilizados no projeto de Parnaíba, assim como no caso de Petrolina, são os mesmos descritos no capítulo 3, assim foi colocado no Homer Pro os dados de irradiação GHI e velocidade do vento como mostrado nas figuras 53 e 54.

Figura 53 – Parâmetros de irradiação solar usados no Projeto de Parnaíba.



Fonte: Autor.

Figura 54 – Parâmetros de velocidade do vento utilizados no Projeto de Parnaíba.



Fonte: Autor.

5.2.3 Componentes do projeto de Parnaíba

Os componentes utilizados no projeto de Parnaíba e todos os seus custos são os mesmos adotados no projeto de Petrolina, desta forma, podemos comparar os resultados dos dois projetos e tirar conclusões sabendo que a única diferença entre os projetos é a localização e por consequência os recursos energéticos do local.

5.2.4 Resultados do Projeto de Parnaíba no Homer Pro

Após inserir todos os componentes desejados ao projeto, estabelecer o local do projeto com seus recursos energéticos, o projeto no Homer está completo, e assim obtivemos os seguintes resultados as seguintes opções de projetos viáveis a serem realizados em Parnaíba como descritos na tabela 10.

Tabela 10 – Resultados do Homer para o projeto em Parnaíba.

Tipo do sistema	Sistema FV (kW)	Sistema eólico (Unidades)	Inversor (kW)	Baterias (Unidades)	Valor Líquido (R\$)	Presente (VPL)
Geração FV	9,74	0	3	15	48 959	
Geração Eólica	0	3	3	20	356 080	
Geração Híbrida Eólica – Solar	6,00	1	3	15	147 774	

Fonte: Autor.

Podemos notar que o custo do projeto híbrido teve um aumento significativo em relação ao projeto localizado em Petrolina, o que nos dá uma conclusão interessante, os projetos localizados mais próximos ao litoral do nordeste tem um custo maior, logo é menos viável economicamente, isso ocorre principalmente devido a mudança nos recursos energéticos.

Toda a análise financeira dos projetos assim como o impacto que recursos energéticos na escolha dos componentes de cada um dos projetos serão o foco de estudo no próximo capítulo.

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1 Avaliando os resultados do Homer Pro

Como pode ser observado pelos resultados dos projetos no Homer pro, o projeto em Petrolina é consideravelmente mais viável economicamente do o de Parnaíba, nesse capítulo será discutido dos os dados elétricos e financeiros envolvidos no projeto assim como a relação desses resultados com os recursos energéticos usados nos projetos.

Como já foi mencionado, Petrolina teve um resultado melhor financeiramente do que Parnaíba, nas tabelas 11 e 12 tem um resumo de todos os aspectos financeiros dos projetos viáveis de Petrolina e Parnaíba.

Tabela 11 – Resultados Financeiros dos projetos em Petrolina.

Tipo do sistema	Investimento Inicial (R\$)	Custo por kWh (R\$/kWh)	Custo Operacional por ano (R\$/Ano)	Valor Presente Líquido (VPL) (R\$)
Geração Fotovoltaica	24 356	0,839	1 560	44 528
Geração Eólica	295 450	6,99	5 879	371 445
Geração Híbrida Eólica – Solar	114 979	2,75	2 391	145 894

Fonte: Autor.

Tabela 12 – Resultados Financeiros dos projetos em Parnaíba.

Tipo do sistema	Investimento Inicial (R\$)	Custo por kWh (R\$/kWh)	Custo Operacional por ano (R\$/Ano)	Valor Presente Líquido (VPL) (R\$)
Geração Fotovoltaica	28 080	0,922	1 615	48 959
Geração Eólica	290 850	6,71	5 046	356 080
Geração Híbrida Eólica – Solar	114 065	2,78	2 608	147 774

Fonte: Autor.

Com esses valores financeiros, está claro que para as fontes de energia disponíveis e para o padrão de carga selecionado, a melhor opção é um sistema solar fotovoltaico. Também está claro que Petrolina é a melhor opção de local para se efetuar o projeto devido o mesmo ser mais economicamente viável. O motivo de o sistema eólico ser menos viável economicamente está ligado ao seu custo elevado, entretanto isso não quer dizer que para qualquer tipo de projeto no nordeste brasileiro, o sistema de geração FV será sempre o mais viável, contudo para um sistema de geração com padrão

de carga o qual foi trabalhado neste trabalho, realmente o sistema FV é bem mais viável.

O projeto de Parnaíba é menos viável economicamente, como em ambos os projetos foram utilizados os mesmos componentes e mesma carga, com certeza o motivo dessa disparidade entre os sistemas está ligado aos recursos energéticos.

6.2 Análise dos recursos energéticos disponíveis em Petrolina e Parnaíba

Comparando os resultados do Homer dos projetos de Parnaíba e Petrolina tem-se um resultado interessante, o projeto de Parnaíba requer menos potência de geração fotovoltaica que o de Petrolina, entretanto requer mais baterias o que o torna mais caro do que o projeto de Petrolina devido ao custo de manutenção do sistema de armazenamento.

Nessa seção iremos justificar esse resultado meio de análise das fontes de energia envolvidas nesses projetos.

6.2.1 Comparativo da irradiação

Primeiro comparativo que devemos levar em consideração, a irradiação GHI (global horizon irradiation) das duas localidades, ou melhor, dizendo a irradiação direta que é a irradiação principal para a geração fotovoltaica. Segue abaixo a tabela 13 comparando os dados desse recurso nas duas localidades do projeto.

Tabela 13 – Comparativo dos dados de irradiação de Petrolina e Parnaíba.

	Petrolina	Parnaíba	Diferença (%)
Média anual de irradiação (kWh/m ² /dia)	6,409	6,066	5,35
Mês com maior irradiação (kWh/m ² /dia)	7,76	7,06	9,02
Mês com menor irradiação (kWh/m ² /dia)	5,43	5,38	0,920
Amplitude dos Dados (kWh/m ² /dia)	2,33	1,68	27,89

Fonte: Autor.

Podemos observar que Petrolina tem melhores médias de irradiação melhores do que Parnaíba, isso se dá pelo fato de Parnaíba ser uma cidade litorânea o que faz com que ela esteja sujeita a maior nebulosidade, esse resultado bate com os resultados do dimensionamento dos sistemas no Homer pro, uma vez que os sistemas que usam

energia fotovoltaica são mais viáveis economicamente que em Petrolina do que em Parnaíba. Outro fator importante é a amplitude, a amplitude dos dados em Parnaíba é menor do que em Petrolina o que nos leva a crer que Parnaíba tem dados de irradiação mais constantes ao longo do ano. A seguir será avaliado o impacto dessa diferença de irradiação no dimensionamento do projeto de geração híbrida.

6.2.2 Comparativo da velocidade do vento

O próximo comparativo será a respeito da velocidade do vento médio em Petrolina e Parnaíba, foi escolhido comparar velocidades de vento a 78 metros, pois foram os dados usados para alimentar o Homer, segue a tabela 14 com o comparativo com desse recurso energético nas localidades usadas nos projetos.

Tabela 14 – Comparativo dos dados de irradiação de Petrolina e Parnaíba.

	Petrolina	Parnaíba	Diferença (%)
Média anual de velocidade do vento (m/s ²) a 78 metros	6,708	7,247	7,450
Mês com melhor média de velocidade do vento (m/s ²) a 78 metros	7,870	10,08	21,920
Mês com menor velocidade do vento (m/s ²) a 78 metros	5,400	5,140	4,810
Amplitude dos dados	2,470	4,940	50,002

Fonte: Autor.

Como esperado, Parnaíba tem melhor média de velocidade do vento, o que impacta positivamente no dimensionamento do sistema eólico do local como pode ser observado pelos resultados do Homer, de fato dos três tipos de sistemas geradores de energia o único que Parnaíba é melhor financeiramente que Petrolina. Outro aspecto interessante deste comparativo é que, embora Petrolina tenha média anual de velocidade do vento menor que Parnaíba, é em Parnaíba que temos o mês com menor velocidade do vento. Isso leva a um valor de amplitude dos dados em Parnaíba muito maior que os dados de Petrolina que tem valor mais constante de velocidade do vento, tal fator é determinante no dimensionamento do projeto de um sistema de geração.

6.3 Complementariedade dos recursos energéticos nos projetos

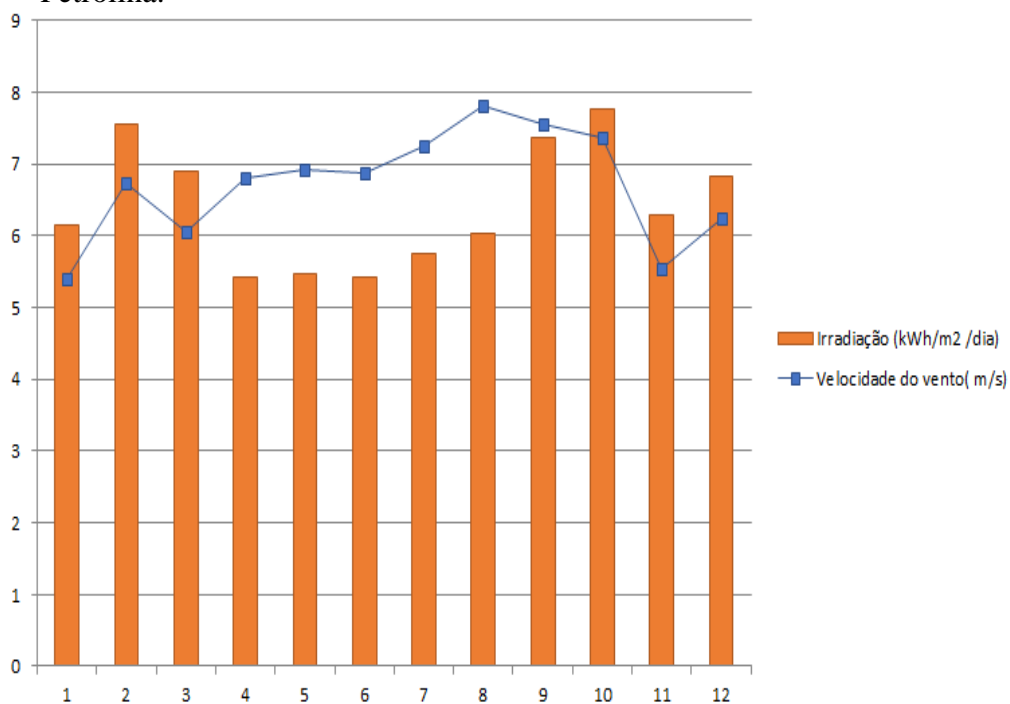
A complementariedade das fontes também é um fator determinante para o dimensionamento de projetos de geração híbrida, pois afeta diretamente o funcionamento dos componentes presentes no sistema híbrido, quão melhor a complementariedade, o dimensionamento do sistema será mais eficiente, uma vez que o balanço dos componentes usados para alimentar a carga é o mais eficiente possível.

Portanto na seção a seguir, iremos analisar a complementariedade dos recursos energéticos presentes em Petrolina e Parnaíba e avaliar em qual das duas localidades ela ocorre de maneira mais adequada.

6.3.1 Complementariedade ao longo do ano

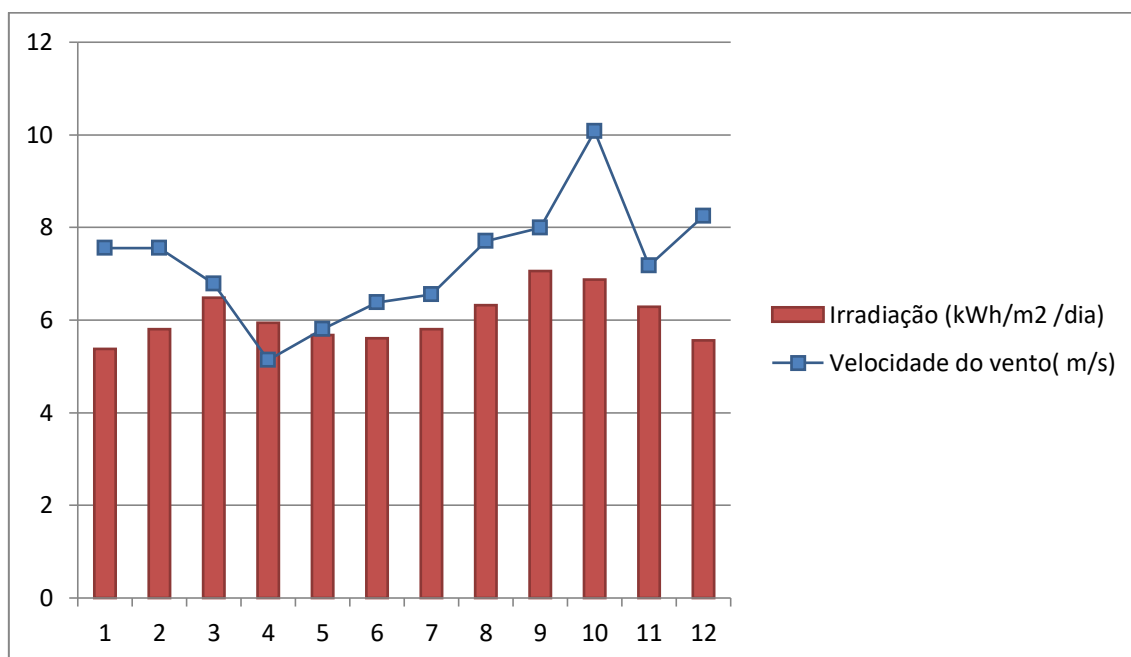
A primeira avaliação em relação à complementariedade das fontes de energia é em relação das médias mensais de cada uma das fontes de energia, segue as figuras com 55 e 56 apresentam os gráficos que mostra a complementariedade das medias mensais dos recursos energéticos ao longo do ano para Petrolina e Parnaíba.

Figura 55 – Complementariedade das médias mensais das fontes de energia de Petrolina.



Fonte: Autor.

Figura 56 – Complementariedade das médias mensais das fontes de energia de Parnaíba.



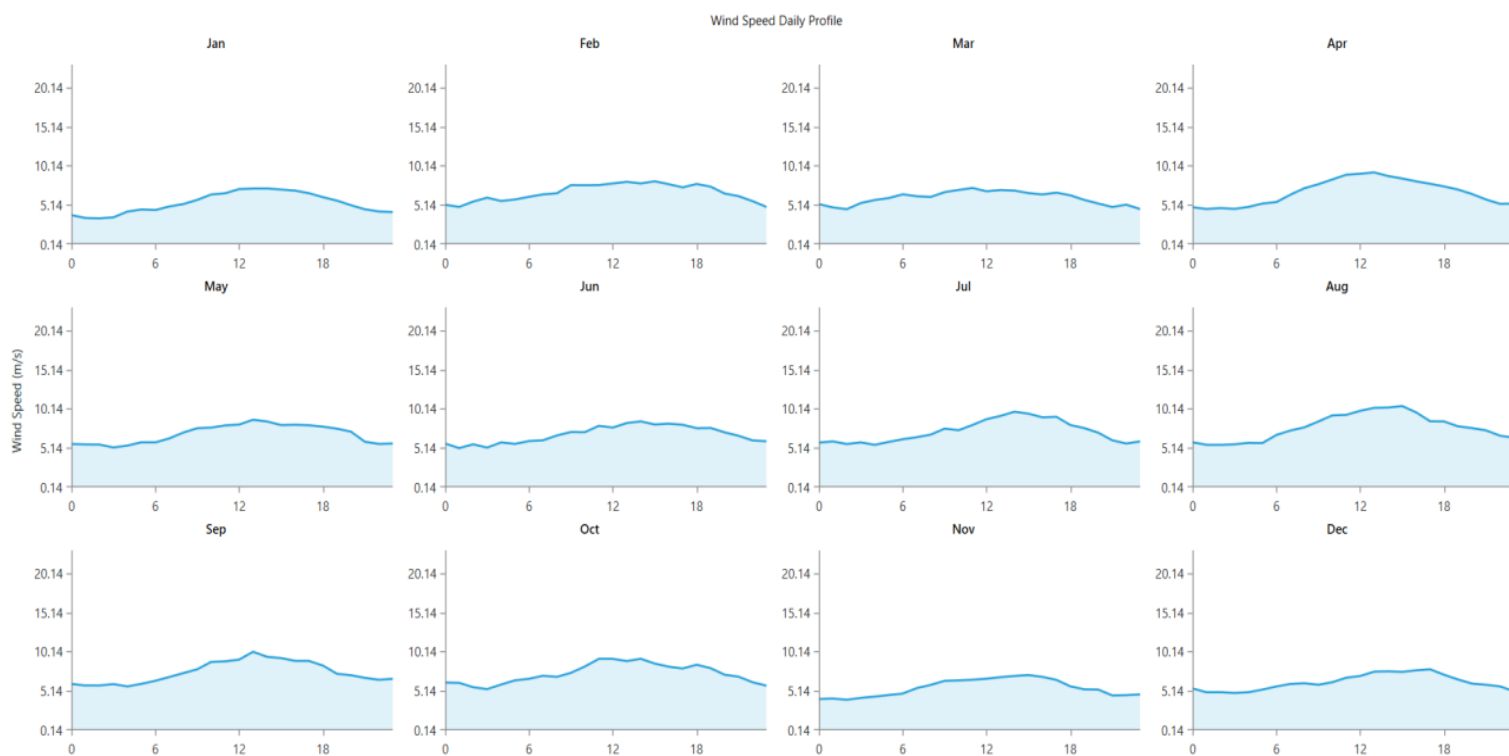
Fonte: Autor.

Podemos notar que a complementariedade mensal das fontes no caso de Petrolina é melhor do que em Parnaíba, pois em Petrolina nos meses de Abril a Agosto em que temos os menores valores de irradiação, temos um aumento na velocidade do vento. Em Parnaíba o mês em que temos melhor velocidade dos ventos é próximo do mês com melhor irradiação e um dos meses com pior velocidade do vento o que caracteriza uma péssima complementariedade entre as fontes de energia.

6.3.2 Complementariedade diária das fontes de energia

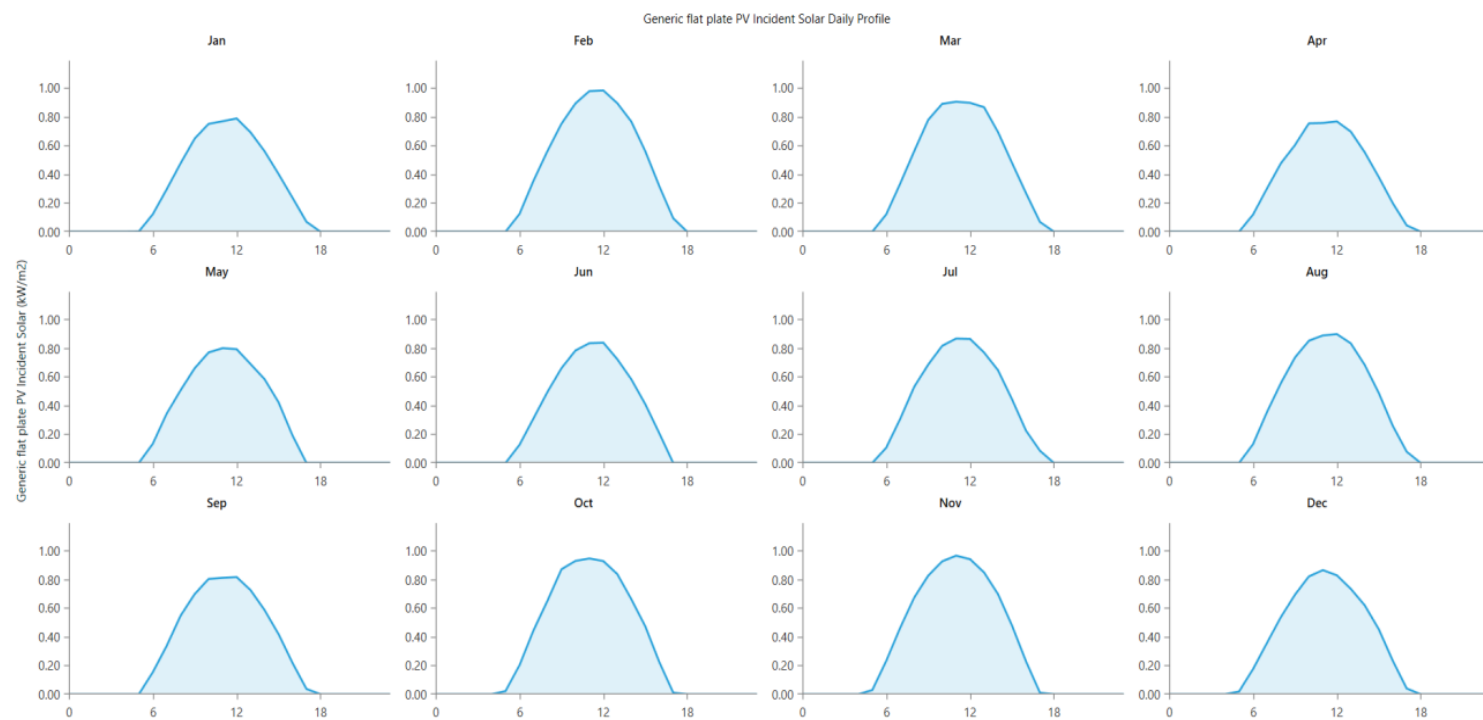
Como pôde ser notado na seção anterior, o perfil das fontes de energia variam com o passar dos meses, mas não é apenas a intensidade média que se altera com o passar dos meses, o perfil diário também é alterado, desse modo devemos avaliar a complementariedade da irradiação e velocidade do vento ao longo dos dias de cada mês. A maneira adequada de se fazer isso é avaliar os recursos energéticos em dias característicos de cada mês assim será possível avaliar a complementariedade diária de cada mês. As figuras 57, 58,59 e 60 apresentam o perfil diário de cada mês de cada fonte de energia nas duas localidades.

Figura 57 – Perfil diário por mês de velocidade do vento de Petrolina.



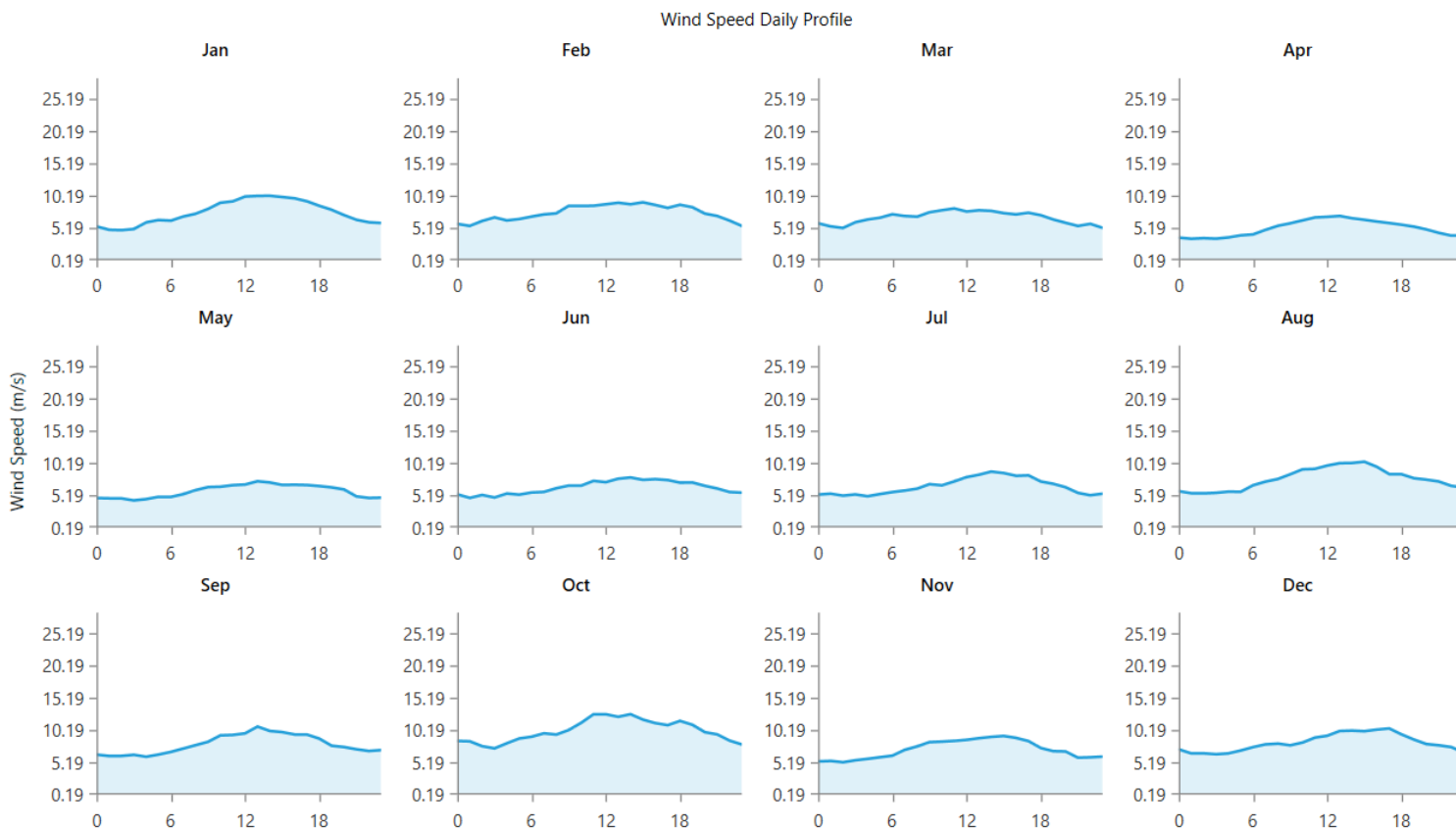
Fonte: Autor

Figura 58 – Perfil diário por mês de irradiação de Petrolina.



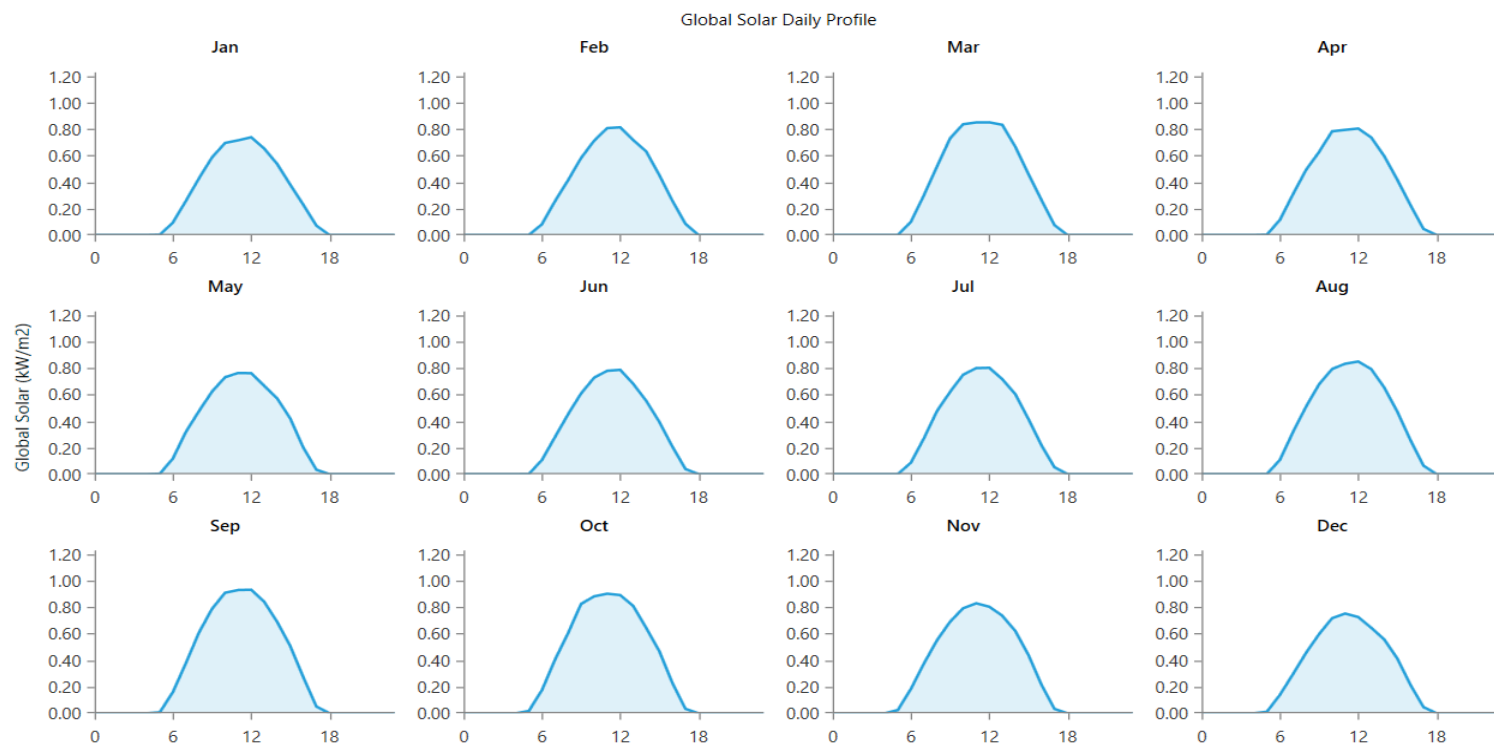
Fonte: Autor.

Figura 59 – Perfil diário por mês de velocidade do vento de Parnaíba.



Fonte: Autor

Figura 60 – Perfil diário por mês de irradiação de Parnaíba.



Fonte: Autor.

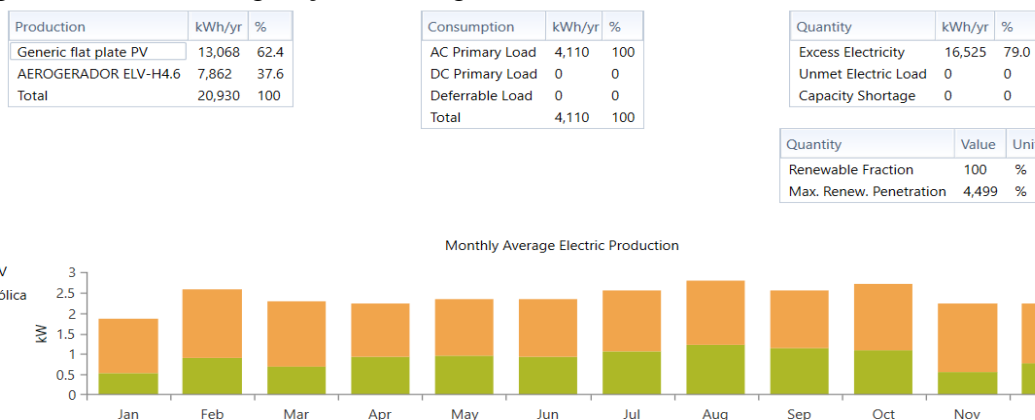
Podemos observar que nas duas localidades os perfis das fontes de energia são bem similares, diferenciando basicamente na sua intensidade e nos dois caso as fontes de energia solar e eólica não se complementam tão bem, no geral tanto a irradiação quanto a velocidade do vento são maiores nos entre 6h e 18h, alguns meses tem pode ser observada uma complementariedade como é no caso de dezembro em Parnaíba, mas no geral não á grande complementariedade entre as fontes com base no perfil diário.

6.4 Análises elétricas dos sistemas híbridos de Petrolina e Parnaíba

Para tirar conclusões sobre a influência das fontes de energia nos projetos de sistemas híbridos, devemos analisar os aspectos elétricos do funcionamento desses sistemas e esse é o objetivo desta seção.

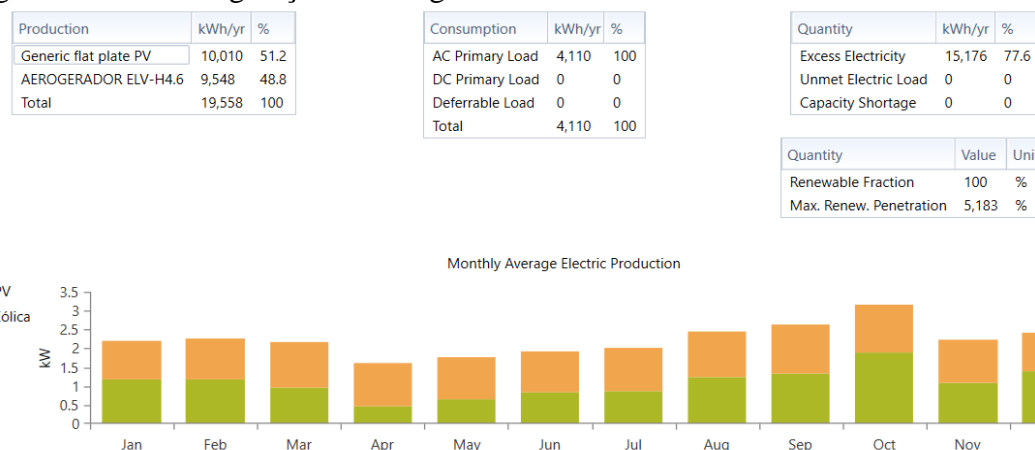
O primeiro aspecto que iremos analisar é como cada fonte de energia afeta a geração de energia do sistema híbrido ao longo do ano, nas figuras 61 e 62 retiradas dos resultados do projeto de Petrolina no Homer temos, diversos dados sobre importantes a respeito da geração de energia elétrica.

Figura 61 – Dados de geração de energia elétrica do sistema híbrido de Petrolina.



Fonte: Autor.

Figura 62 –Dada de geração de energia elétrica do sistema híbrido de Parnaíba.



Fonte: Autor.

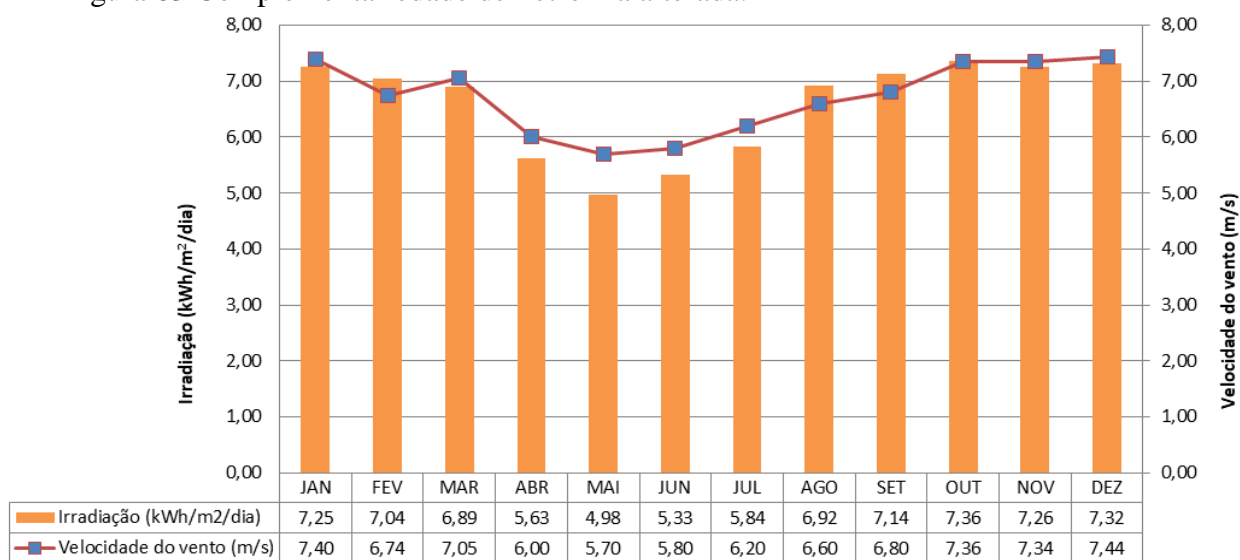
Algumas observações que podem ser feitas com base nesses dados. Primeiramente está bem claro que, a geração de energia vinda de um determinado recurso energético é diretamente proporcional à disponibilidade daquele recurso. Outra observação que pode ser feita é que a proporção entre a geração de energia elétrica proveniente das fontes solar e eólica em Petrolina. Como pode ser observado na figura 61, a geração de energia elétrica é de $2/3$ da energia vinda do sistema solar e $1/3$ vinda de energia eólica em média, isso por que Petrolina tem melhores médias de irradiação anual e foi dimensionado para ter mais painéis solares que Parnaíba. Em quanto Parnaíba, por ter menores médias de irradiação, e maiores médias de velocidade do vento, sua produção de energia é praticamente $1/2$ vinda de energia solar e $1/2$ vinda de energia eólica.

Um fator importante que pode ser observado é que a geração de energia elétrica de Petrolina é bem mais constante que a de Parnaíba, mais especificamente pode-se observar o mês de abril em Parnaíba tem uma média de irradiação relativamente pequena, mas em Petrolina como têm uma boa complementariedade com a velocidade do vento, o mês de abril tem uma geração boa. O que nos leva a conclusão que, para sistemas híbridos com fontes de energias complementares a sua geração anual se mantém mais constante.

Essa conclusão implica diretamente na escolha dos componentes do sistema híbrido, mais especificamente na escolha do número de baterias, pois uma vez que temos um mês que possui menor geração do que os demais, essa defasagem pode ser compensada acrescentando mais baterias ao sistema, e é esse o motivo do sistema híbrido de Parnaíba necessitar de maior número de baterias e é por isso que ele é menos viável economicamente que o de Petrolina, devido aos custos associados ao sistema de armazenamento ao longo do tempo ser maiores que o do sistema FV.









Para validar essa hipótese foram alterados os valores de recurso energético de Petrolina a fim de causar no mês de abril uma má complementariedade dos recursos energéticos, similar ao que se tem em Parnaíba como mostrado na figura 63, e em seguida observado os resultados do Homer na figura 64.

Figura 63 Complementariedade de Petrolina alterada.



Fonte: Autor

Figura 64 – Resultados do sistema de Petrolina modificado.

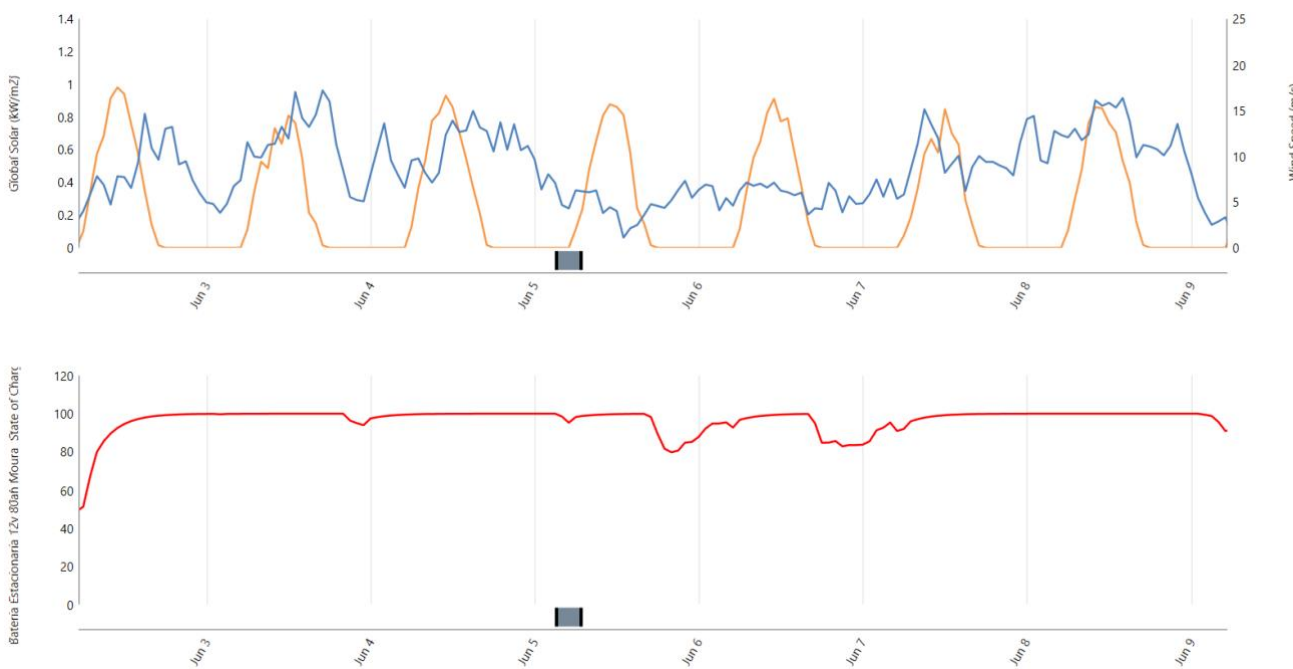
			7.88		19	3.00	CC	\$51,329
			6.00	1	15	3.00	CC	\$147,774
				3	30	3.00	CC	\$371,445

Fonte: Autor.

Como esperado, ao alterar os dados de Petrolina causando uma má complementariedade em apenas causam a mesma necessidade que ocorre em Parnaíba, o uso de mais baterias no sistema híbrido, o que confirma a nossa hipótese a complementariedade afeta na escolha dos componentes do projeto, diretamente na bateria.

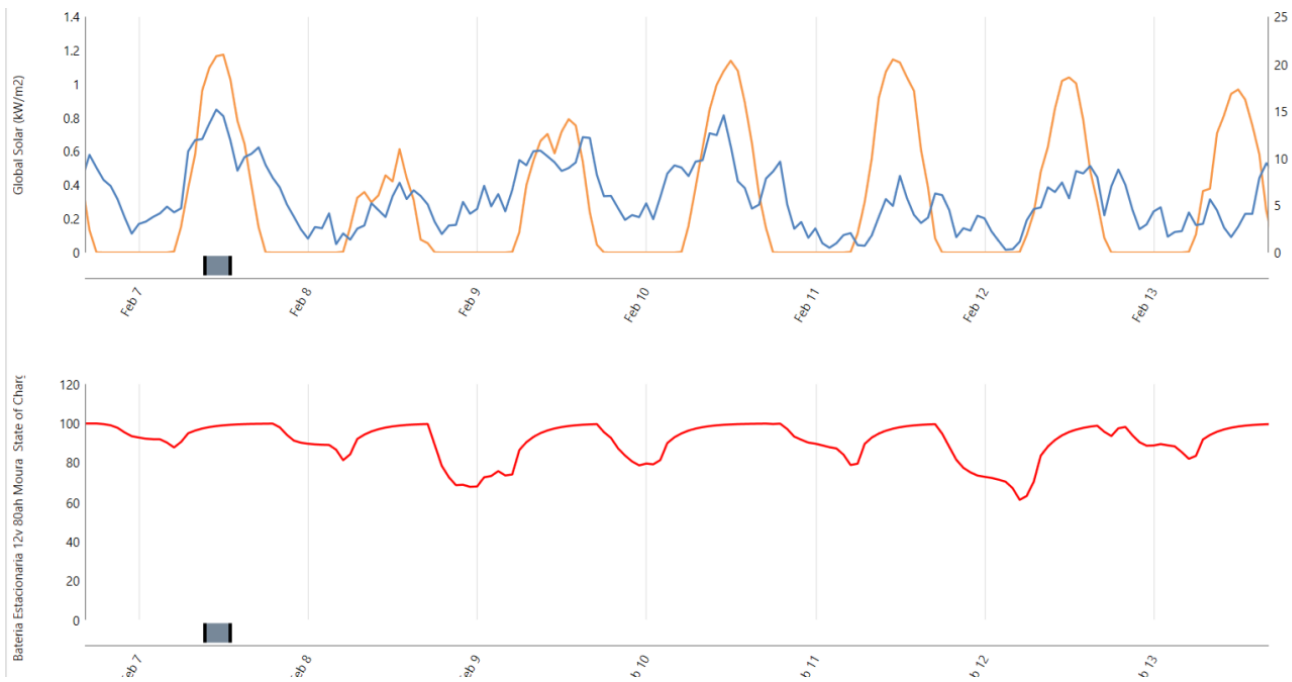
Foi mostrado que a complementariedade afeta diretamente na escolha dos componentes do sistema híbrido, nessa seção iremos avaliar mais detalhadamente como cada fonte de energia afeta o estado das baterias. Para isso será exibido os gráficos do estado das baterias na situação em que os recursos energéticos se complementam, figura 65, e na situação em que não se complementam é exibido na figura 66.

Figura 65 – Comportamento do estado da carga das baterias quando temos recursos energéticos complementares.



Fonte: Autor.

Figura 66 – Comportamento do estado da carga das baterias, quando temos recursos energéticos não complementares.



Fonte: Autor.

Com esses dados fica evidente a importância da complementariedade dos recursos energéticos para manter o estado de carga das baterias o melhor possível, e é devido esse fator que se faz necessário o uso de mais baterias no caso quando que temos fontes de energia não complementares.

7 CONCLUSÃO

Utilizando de dados de recurso energético solar e eólico reais de Petrolina e Parnaíba, considerando uma carga residencial com consumo de 11,26 kWh ao dia, através do Homer foi atingido o objetivo de determinar o impacto das fontes de energia em projetos de geração de energia elétrica baseados em energia solar e eólica.

Parnaíba é uma cidade no litoral do nordeste brasileiro, e como tal possui médias de velocidade do vento superior em 7,45 % ao encontrado em Petrolina, que é uma cidade no interior do nordeste. Isso garante uma melhor viabilidade financeira ao realizar um projeto de geração eólica. O resultado da simulação do projeto no Homer mostra que o projeto tem um custo 4,3% menor, em Parnaíba quando comparado a Petrolina.

Já Petrolina, por ser uma cidade localizada no interior do nordeste brasileiro, possui melhores médias de irradiação solar, uma vez que as cidades localizadas no litoral sofrem com maior nebulosidade, como é no caso de Parnaíba. Assim por ter irradiação 5,35 % superior a de Parnaíba, ao se realizar um projeto fotovoltaico em Petrolina temos uma melhor viabilidade financeira, tendo um custo 9,05% menor do que quando comparado a Parnaíba.

No caso dos sistemas híbridos de geração os quais se utilizam simultaneamente de recursos solar e eólico. Foi em Petrolina que tivemos um melhor desempenho, tendo um custo 1,2% menor do que em Parnaíba. Isso ocorre devido à complementariedade dos recursos energéticos de Parnaíba ser pior do que quando comparamos com Petrolina. Como foi mostrada nas análises, a complementariedade dos recursos afeta diretamente o estado das baterias o que impacta nos custos do projeto.

Quão melhor seja a complementariedade dos recursos menor o número de baterias necessárias para alimentar uma mesma carga, pode-se argumentar que a diferença de custo dos projetos é muito baixa, mas temos que ter em mente que a carga utilizada para fazer essa análise foi uma carga residencial típica com um consumo diário de 11,26 kWh se fosse necessário alimentar uma carga de maior porte, essa diferença no custo do projeto devido o impacto da complementariedade, seria bem impactante.

Com isso temos que para a realização do projeto de um sistema de geração desconectado da rede que se utiliza de recurso energético solar e eólico é mais viável financeiramente em regiões de boa complementariedade e disponibilidade entre os recursos energéticos de velocidade do vento e irradiação solar.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Ao concluir esse se pôde notar que o assunto em questão é bastante rico, e pode ser abordado em outros trabalhos futuros. Segue a baixo uma lista de sugestões de novos trabalhos abordando o assunto de dimensionamento e análise de desempenho de sistemas de geração híbridos.

- Realizar a mesma análise utilizando no projeto cargas diferentes.
- Realizar a análise em diferentes localidades.
- Realizar a análise considerando sistemas conectados à rede elétrica.
- Realizar a análise levando em conta mais fatores no projeto como sujeira e sombreamento dos painéis fotovoltaicos.
- Estudar mais a fundo o impacto da complementariedade equacionando e relacionando-a com o número de baterias de um sistema de geração híbrido desconectado da rede.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA – ABSOLAR: **Expansão do mercado de energia fotovoltaica.** <http://absolar.org.br/noticia> , acessado em Abril de 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL: **Projeção de micro e mini geração distribuída.**<http://www.aneel.gov.br>. Acessado em junho de 2019.

BLASQUES, L. C. M. **Otimização de Sistemas Híbridos para Eletrificação de Mini – redes com fontes renováveis: aspecto de projeto, operação e gestão.** Tese de Doutorado – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belém, 2014.

BORGES NETO, M. R.; CARVALHO, P. C. M. **Introdução à geração de energia elétrica.** IF Sertão Pernambucano, Petrolina, 2011.

CARVALHO, P. C. M. **Geração Eólica**, Imprensa Universitária, 146, Fortaleza, 2003.

CRESESB. **ENERGIA SOLAR PRINCÍPIOS E APLICAÇÕES:** http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_solar_2006.pdf. Acessado em 12 de Fevereiro de 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE: **Balanco Energético Nacional – Ano base 2014.** Rio de Janeiro, 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE: **Plano Decenal de Expansão de Energia 2022**, acessado em 2019.

EXEMPLOS DE SISTEMAS HÍBRIDOS, www.thisienergias.com, acessado em abril de 2019.

F., KININGER. **Photovoltaic Systems Technology** - UNIVERSITÄT KASSEL, 2003.

HART, D. W. **Power Eletronics.** 477p. New York–NY, McGraw-Hill Inc., 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATISTICA – IBGE: **Censo 2010: Características da População e dos domicílios. Rio de Janeiro 2011.** http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/caracteristicas_da_populacao/default_caracteristicas_da_populacao. Acessado em Março de 2019.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA): <http://www.worldenergyoutlook.org/resources/>. Acessado em Março de 2019.

LAMBERT, D. W. H. **Staying in Charge: batteries for small PV and solar home systems.** Renewable Energy World, 66 – 73, 2001.

COMPLEMENTARIEDADE SOLAR – EÓLICA DO ESTADO DO CEARÁ, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LEEE), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

MANUEL JESÚS CASTAÑEDA BALBUENA, **Dimensionamento, Modelagem e Controle de Componentes de Sistema Híbrido de Energia Baseado em Energias Renováveis e Hidrogênio**. Tese de doutorado, Universidade de Cádiz (2013).

MAPAS DE RECURSOS ENERGÉTICOS DO BRASIL, <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/brazil>, acessado em Abril de 2019.

MARCELO FERREIRA DE ARRUDA, **Desempenho Técnico Financeiro de Sistema Híbrido Eólico – Solar Aplicado ao Bombeamento de Água**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza-CE, 2014.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME: PROGRAMA LPT PROJETOS ESPECIAIS.

http://www.iee.usp.br/lfs/sites/default/files/Apresentacao_Paulo_Cerqueira. Acessado em Março de 2019.

MOURA: www.moura.com.br. Acessado em Abril de 2019.

MOVIMENTO ANUAL DO SOL E ESTAÇÕES DO ANO, <http://astro.if.ufrgs.br/tempo/mas.htm>, acessado em Maio de 2019.

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS: **FATOS SOBRE ÁGUA E SANEAMENTO**. <http://www.onu.org.br/rio20/temas-agua/>. Acessado Março de 2019.

PINHO, J.T., BARBOSA, C.F.O., PEREIRA, E.J.S., SOUZA, H.M.S., BLASQUES, L.C.M., GALHARDO, M.A.B. MACÊDO, W.N., **Sistemas Híbridos – Soluções Energéticas para a Amazônia**. 1ª Edição, Brasília, Ministério de Minas e Energia 2008.

PALMER, R. V. **Estudo Da Sulfatação Durante a Formação de Placas Positivas Empastadas de Bateria de Chumbo-Ácido**. Dissertação de Mestrado Universidade Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Elétrica, Curitiba, 2008.

SILVA G. R. **Características de vento da Região Nordeste, análise, modelagem e aplicações para projetos de centrais eólicas**. 2003. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Mecânica), Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife-Pe, 2003.

SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, <http://www.sitecnosolar.com>, acessado em Abril de 2019.

SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA, www.portalsolar.com.br, acessado em Abril de 2019.

TATIANE CAROLYNE CARNEIRO, **Caracterização de potencial eólico para fins de geração elioelétrica: estudo de caso para Maranguape (CE), Parnaíba(PI) E Petrolina(PE). Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica).** Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza-CE, 2014.

HOMER ENERGY, www.homerenergy.com , acessado em junho de 2019.

ANEXO A-DADOS TÉCNICOS DO INVERSOR ESCOLHIDO

3P219901000A



UNO-DM-3.3-TL-PLUS-SB Inverter



General Information

Global Commercial Alias	3P219901000A
Extended Product Type	UNO-DM-3.3-TL-PLUS-SB
Product ID	6AGC063452
EAN	8054529631254
Catalog Description	UNO-DM-3.3-TL-PLUS-SB Inverter
Long Description	Single-phase string inverter, 3300Wac, 2 MPPT, Wireless communication channel, Dynamic feed-in control and load manager, Advanced web user interface, Modbus SunSpec RTU/TCP, IP65 (NEMA4x), Integrated DC disconnect
Number of Batteries	0

3P219901000A

Country of Origin	Italy (IT)
Product Main Type	UNO
Product Name	Inverter
Short Description	UNO-DM-3.3-TL-PLUS-SB Single-phase string inverter, 3300Wac, 2 MPPT
WEEE Category	4. Large Equipment (Any External Dimension More Than 50 cm)

Certificates and Declarations (Document Number)

Data Sheet, Technical Information	BCD.00680
Declaration of Conformity - CE	9AKK106930A5924
Instructions and Manuals	M000036BG

Classifications

ETIM 6	EC001747 - Photovoltaics DC/AC grid inverter
ETIM 7	EC001747 - DC/AC grid inverter

Categories

Power Converters and Inverters → Solar Inverters → String Inverters → Single Phase

Dimensions

Product Net Depth / Length:	175 mm
Product Net Height:	553 mm
Product Net Weight:	15 kg
Product Net Width:	418 mm

ABB string inverters

UNO-DM-3.3/3.8/4.6/5.0-TL-PLUS-US

3.3 to 5.0 kW



Technical data and types

Type code	UNO-DM-3.3-TL-PLUS-US		UNO-DM-3.8-TL-PLUS-US		UNO-DM-4.6-TL-PLUS-US		UNO-DM-5.0-TL-PLUS-US	
General specifications								
Rated grid AC voltage (V_{AC})	208 V	240 V	208 V	240 V	208 V	240 V	208 V	240 V
Nameplate Apparent Power (S_{max})	3300 VA	3300 VA	4200 VA	4200 VA	4600 VA	4600 VA	5000 VA	5000 VA
Nameplate Output Active Power (P_{max} @ $\cos\phi=1$)	3300 W	3300 W	4200 W	4200 W	4600 W	4600 W	5000 W	5000 W
PRATED: Output Active Power @VACr and $\cos\phi=\pm 0.9$	2700 W	3000 W	3000 W	3450 W	3780 W	4140 W	4118 W	4500 W
Input side (DC)								
Number of Independent MPPT channels	2		2		2		2	
Maximum usable power for each channel	2000 W		3000 W		3000 W		3500 W	
Absolute maximum voltage (V_{max})	600 V		600 V		600 V		600 V	
Start-up voltage (V_{start})	200 V (Adj. 120-350)		200 V (Adj. 120-350)		200 V (Adj. 120-350)		200 V (Adj. 120-350)	
Full power MPPT voltage range with parallel MPPT configuration at P_{max}	160-530 V	170-530 V	120-530 V	140-530 V	140-530 V	150-530 V	130-530 V	145-530 V
Operating MPPT voltage range	0.7*Vstart - 580 V (≥ 90)		0.7*Vstart - 580 V (≥ 90)		0.7*Vstart - 580 V (≥ 90)		0.7*Vstart - 580 V (≥ 90)	
Maximum usable current per channel	10 A		16 A		16 A		19 A	
Maximum current ($I_{ac,max}$)	20 A		32 A		32 A		38 A	
Maximum short circuit current per channel	12,5 A		25 A		25 A		25 A	
Number of wire landing terminals	2 pairs, capable of connecting two parallel strings							
Array wiring termination	Terminal block, pressure clamp, AWG20-8							
Output side (AC)								
Grid connection type	1 Φ /2W	Split- Φ /3W	1 Φ /2W	Split- Φ /3W	1 Φ /2W	Split- Φ /3W	1 Φ /2W	Split- Φ /3W
Adjustable voltage range (V_{min} - V_{max})	183-228 V	211-264 V	183-228 V	211-264 V	183-228 V	211-264 V	183-228 V	211-264 V
Grid frequency	60 Hz		60 Hz		60 Hz		60 Hz	
Adjustable grid frequency range	50-64 Hz		50-64 Hz		50-64 Hz		50-64 Hz	
Maximum current ($I_{ac,max}$)	14,5 A		16 A		20 A		22 A	
Power factor	>0.995, adj. +/-0.8		>0.995, adj. +/-0.8		>0.995, adj. +/-0.8		>0.995, adj. +/-0.8	
Total harmonic distortion at rated power	<2%		<2%		<2%		<2%	
Contributory fault current	16 A		19 A		22 A		24 A	
Grid wiring termination type	Terminal block, pressure clamp, AWG20-6							
Input protections								
Reverse polarity protection	Yes, from limited current source							
Over-voltage protection type	Varistor							
PV array ground fault detection	Pre start-up RISO and dynamic GFDI							
Output protections								
Anti-islanding protection	Meets UL1741 / IEEE1547 requirements							
Over-voltage protection type	Varistor, 2 (L1 - L2 / L1 - G)							
Maximum AC OCPD rating	20 A		20 A		25 A		30 A	
Efficiency								
Maximum efficiency	97%		97%		97%		97,4%	
CEC efficiency	96.5%	96.5%	96%	96.5%	96%	96.5%	96.5%	97%
Operating performance								
Stand-by consumption	<8 W _{ENB}							
Nighttime consumption	<0.6 W _{ENB}							
Auxiliary Output								
Isolated Auxiliary Power Supply ^{*)}	24 Vdc, 0.4 A max							

ANEXO B-DADOS TÉCNICOS DA BATERIA DO PROJETO

ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS

Bateria Estacionária Moura NoBreak 12MN80

Produzida sob rigoroso padrão internacional de qualidade de processo e com plataforma tecnológica de classe mundial, a **bateria estacionária Moura** para aplicações estacionárias é a **bateria** ideal para equipamentos que demandem alta segurança, confiabilidade e autonomia.

CARACTERÍSTICAS DIMENSIONAIS POR MODELO

MODELO	CAPACIDADE NOMINAL (Ah)				PESO (Kg)	DIMENSÕES (mm)	RESISTÊNCIA INTERNA (mΩ)	CORRENTE RECARGA MÁXIMA (A)
	C20	C10	C5	C1				
12MN36	36	33	27	20,8	11,4	212x175x175	7,1	7,2
12MN45	45	41	37	27,8	11,8	212x175x175	6,9	9
12MN55	55	50	44,2	33,7	14,1	242x175x175	6,2	11
12MN63	63	57	52,6	40,2	16,1	282x175x175	5	12,6
12MN80	80	72	60,3	45,6	21,6	306x172x203	4,9	16
12MN105	105	95	87,2	61,4	25,4	330x172x220	4,9	21
12MN150	150	135	115,3	79,1	39	509x211x219	3,1	30
12MN175	175	160	136,5	104,2	50,6	517x272x217	2,5	35
12MN220	220	200	179,4	131	56	517x272x217	2,5	44



ANEXO C-DADOS TÉCNICOS DOS PAINÉIS DOS PROJETOS

CANADIAN SOLAR 335W POLY SOLAR PANEL - MAXPOWER - CS6U-335P

Canadian Solar, 335W PV Module, T-4 (MC4-comparable), PV Wire, 40mm Silver Frame, 72 Cell Poly, 15A Fuse, 1000VDC, 5BB, 308.8 PTC, CS6U-335P

Canadian Solar's modules use the latest innovative cell technology, increasing module power output and system reliability, ensured by 16 years of experience in module manufacturing, well-engineered module design, stringent BOM quality testing, an automated manufacturing process and 100% EL testing.

Canadian Solar is committed to providing high quality solar products, solar system solutions and services to customers around the world. As a leading PV project developer and manufacturer of solar modules with over 15GW deployed around the world since 2001, Canadian Solar Inc. (NASDAQ: CSIQ) is one of the most bankable solar companies worldwide.

Canadian Solar's new MaxPower2 poly modules use the latest innovative five busbar cell technology, increasing module power output and system reliability.

Features

- **Higher Energy Yield** - Enhanced reliability with new 5 busbar cell technology. Cell efficiency of up to 18.8%. Outstanding low irradiance performance: 96%. IP67 junction box for long-term weather endurance. Heavy snow load up to 5400 Pa, wind load up to 2400 Pa.

General Information

Manufacturer:	Canadian Solar
Product Line:	MaxPower
Model ID:	CS6U-335P
Certifications and Safety Ratings:	    

Mechanical Data

Technology:	Polycrystalline (Poly)
Dimensions:	77.20 x 39.10 x 1.38 inches (CS6U-335P Dimensions)
Weight:	49.40 lbs
Front Glass:	3.2 mm Tempered Glass
Cell Type:	Polycrystalline, 6 Inch
Cell Arrangement:	72 (6x12)
Frame:	Anodized Aluminum Alloy
J-Box:	IP67, 3 Bypass Diodes
Cable:	4.0 mm ² (IEC), 12 AWG (UL); 1160 mm (45.7 Inches)
Connectors:	T4 Series
Temperature Coefficient (Pmax):	-0.41% / °C
Temperature Coefficient (Voc):	-0.31% / °C
Temperature Coefficient (Isc):	0.053% / °C
Nominal Operating Cell Temperature:	45±2°C

Electrical Data

Nominal Maximum Power (Pmax):	335 Watts
Optimum Operating Voltage (Vmp):	37.4 Volts
Optimum Operating Current (Imp):	8.96 Amps
Operating Voltage (Voc):	45.8 Volts
Short Circuit Current (Isc):	9.54 Amps
Module Efficiency:	17.23%
Operating Temperature:	-40°C~ + 85°C
Module Efficiency:	16.97%
Maximum System Voltage:	1000V (IEC/UL) or 1500V (IEC/UL)
Module Fire Performance:	Type 1 (UL 1703) or Class C (IEC 61730)
Maximum Series Fuse Rating:	15 Amps
Application Classification:	Class A
Power Tolerance:	0 / +5 W

ANEXO D-DADO TÉCNICOS DOS GERADORES EÓLICOS USADOS

SISTEMA AEROGERADOR ELV-H4.6 – 3 kW

Potência Nominal (W)	Potência Máxima (W)	Diâmetro das Pás (m)	Rotação das Pás (rpm)	Vento de Partida (m/s)	Altura da Torre (m)	Peso do Sistema (Kg)	Geração* (kWh/mês)
3.000	4.500	4,9	340	2,5	12	182	450

* Considerando vento médio anual de 6 m/s (22 Km/h)

CURVA DE POTÊNCIA

