

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Pedro Augusto de Almeida Real

**ANÁLISE DE MODELO DE MICRORREDE DE ENERGIA
SOLAR CONECTADA À REDE PARA CARREGAMENTO
DE VEÍCULOS ELÉTRICOS**

Santa Maria, RS
2020

Pedro Augusto de Almeida Real

**ANÁLISE DE MODELO DE MICRORREDE DE ENERGIA SOLAR CONECTADA À
REDE PARA CARREGAMENTO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia Elétrica**.

Orientadora: Prof. Dr^a. Luciane Neves Canha

Santa Maria, RS

2020

de Almeida Real, Pedro Augusto

Análise de Modelo de Microrrede de Energia Solar Conectada à Rede para Carregamento de Veículos Elétricos / por Pedro Augusto de Almeida Real. – 2020.

57 f.: il.; 30 cm.

Orientadora: Luciane Neves Canha

Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, RS, 2020.

1. Estação de carregamento. 2. Veículo elétrico. 3. Energia solar. 4. Armazenamento. 5. HOMER. I. Neves Canha, Luciane. II. Análise de Modelo de Microrrede de Energia Solar Conectada à Rede para Carregamento de Veículos Elétricos.

© 2020

Todos os direitos autorais reservados a Pedro Augusto de Almeida Real. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: pedro.almeida.8@hotmail.com

Pedro Augusto de Almeida Real

**ANÁLISE DE MODELO DE MICRORREDE DE ENERGIA SOLAR CONECTADA À
REDE PARA CARREGAMENTO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia Elétrica**.

Aprovado em 02 de Outubro de 2020:

Luciane Neves Canha, Dr^a. (UFSM)
(Presidente/Orientadora)

Wagner da Silva Brignol, Dr. (IF Sul Pelotas)

Hérciles Eduardo Oliveira Farias, Eng. (PPGEE/UFSM)

Santa Maria, RS

2020

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, aos meus familiares por todo suporte que sempre tive. Aos meus amigos, que passaram por mim em algum momento dessa jornada e aos que permanecem, meu muito obrigado pelo apoio, conversas, incentivo e lealdade. Aos meus colegas de curso e aos que se tornaram amigos além, agradeço pelas ajudas e companheirismo. À Prof^ª. Dr^ª. Luciane Neves Canha por compartilhar seus conhecimentos e me orientar no processo de realização desse trabalho, bem como os mestrandos e doutorandos. Por fim, mas não menos importante, à UFSM por promover um espaço de aprendizado bem estruturado e essencial para pesquisas.

RESUMO

ANÁLISE DE MODELO DE MICRORREDE DE ENERGIA SOLAR CONECTADA À REDE PARA CARREGAMENTO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

AUTOR: PEDRO AUGUSTO DE ALMEIDA REAL

ORIENTADORA: LUCIANE NEVES CANHA

Esse trabalho apresenta a análise de um modelo de microrrede de geração de energia por meio de painéis fotovoltaicos conectada à rede de distribuição e com sistema de armazenamento de baterias para abastecimento de estação de carregamento de veículos elétricos. Através do *software* HOMER Grid é possível estimar a quantidade de energia necessária a ser utilizada tanto do sistema solar quanto da rede convencional além de comparar com outros arranjos de rede. A utilização de baterias para estoque de energia dá maior confiabilidade para suprir a demanda das cargas durante os períodos de baixa produção.

Palavras-chave: Estação de carregamento. Veículo elétrico. Energia solar. Armazenamento. HOMER.

ABSTRACT

ANALYSIS OF THE SOLAR MICROGRID MODEL CONNECTED TO GRID FOR CHARGING ELECTRIC VEHICLES

AUTHOR: PEDRO AUGUSTO DE ALMEIDA REAL

ADVISOR: LUCIANE NEVES CANHA

This work presents the analysis of a microgrid model of energy generation through photovoltaic panels connected to the distribution network and with a battery storage system to supply the charging station for electric vehicles. Through the HOMER Grid software it is possible to estimate the amount of energy needed to be used both from the solar system and the conventional grid, in addition to comparing it with other network arrangements. The use of batteries for energy storage gives greater reliability to supply the demand of the loads during periods of low production.

Keywords: Charging station. Electric vehicle. Solar energy. Storage. HOMER.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Comparação das matrizes elétricas brasileira e mundial, respectivamente. ...	11
Figura 2 –	Representação do funcionamento de uma célula fotovoltaica de silício cristalizado.	16
Figura 3 –	Conexão paralelo das células.	17
Figura 4 –	Conexão série das células.	17
Figura 5 –	Ligação de diodo <i>bypass</i> entre células e diodo de bloqueio.	17
Figura 6 –	Gráfico dos parâmetros de potência máxima.	18
Figura 7 –	Movimento de translação e inclinação da Terra.	18
Figura 8 –	Curva característica $V \times I$ para diversos níveis de radiação solar.	19
Figura 9 –	Curva da influência da temperatura nos parâmetros de módulos fotovoltaicos.	20
Figura 10 –	Sistema fotovoltaico.	21
Figura 11 –	Esquemático de uma célula eletroquímica.	23
Figura 12 –	Estação de carregamento para veículo elétrico 2x22kVA.	26
Figura 13 –	A microrrede.	29
Figura 14 –	Radiação solar média por mês do ano em Santa Maria.	30
Figura 15 –	Incidência da radiação solar média por hora do dia em cada mês do ano.	31
Figura 16 –	Periodicidade de abastecimento em posto por veículos.	34
Figura 17 –	Probabilidade de abastecimento por hora do dia.	35
Figura 18 –	Utilização por hora dos carregadores.	36
Figura 19 –	Arranjo dos componentes da microrrede.	37
Figura 20 –	Curva de carga dos carregadores.	38
Figura 21 –	Curva de carga da iluminação.	38
Figura 22 –	Comparativo mensal de produção de energia solar e fornecimento da rede para cenário principal.	40
Figura 23 –	Estado da carga para cenário principal.	41
Figura 24 –	Comparativo mensal de produção de energia solar e fornecimento da rede para cenário 2.	42
Figura 25 –	Arranjo da microrrede sem sistema de armazenamento.	42
Figura 26 –	Comparativo mensal de produção de energia solar e fornecimento da rede para cenário 3.	43
Figura 27 –	Comparativo mensal de produção de energia solar e fornecimento da rede para cenário 4.	44
Figura 28 –	Estado da carga para cenário 4.	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Parâmetros do painel.	31
Tabela 2 –	Parâmetros do banco de baterias.	32
Tabela 3 –	Veículos Elétricos e suas características.	32
Tabela 4 –	Valor da variável X para cada hora.	34
Tabela 5 –	Número de veículo abastecido por hora no eletroposto.	36
Tabela 6 –	Potência instalada para cenário principal.	39
Tabela 7 –	Produção de energia para cenário principal.	39
Tabela 8 –	Consumo de energia para cenário principal.	40
Tabela 9 –	Energia de entrada e saída do banco de baterias.	40
Tabela 10 –	Potência instalada para cenário 2.	41
Tabela 11 –	Produção de energia para cenário 2.	41
Tabela 12 –	Consumo de energia para cenário 2.	42
Tabela 13 –	Potência instalada para cenário 3.	43
Tabela 14 –	Produção de energia para cenário 3.	43
Tabela 15 –	Potência instalada para cenário 4.	44
Tabela 16 –	Produção de energia para cenário 4.	44
Tabela 17 –	Valores da incidência de radiação solar (G) média por hora em Santa Maria para o mês de JANEIRO.	52
Tabela 18 –	Valores da incidência de radiação solar (G) média por hora em Santa Maria para o mês de FEVEREIRO.	52
Tabela 19 –	Valores da incidência de radiação solar (G) média por hora em Santa Maria para o mês de MARÇO.	53
Tabela 20 –	Valores da incidência de radiação solar (G) média por hora em Santa Maria para o mês de ABRIL.	53
Tabela 21 –	Valores da incidência de radiação solar (G) média por hora em Santa Maria para o mês de MAIO.	54
Tabela 22 –	Valores da incidência de radiação solar (G) média por hora em Santa Maria para o mês de JUNHO.	54
Tabela 23 –	Valores da incidência de radiação solar (G) média por hora em Santa Maria para o mês de JULHO.	55
Tabela 24 –	Valores da incidência de radiação solar (G) média por hora em Santa Maria para o mês de AGOSTO.	55
Tabela 25 –	Valores da incidência de radiação solar (G) média por hora em Santa Maria para o mês de SETEMBRO.	56
Tabela 26 –	Valores da incidência de radiação solar (G) média por hora em Santa Maria para o mês de OUTUBRO.	56
Tabela 27 –	Valores da incidência de radiação solar (G) média por hora em Santa Maria para o mês de NOVEMBRO.	57
Tabela 28 –	Valores da incidência de radiação solar (G) média por hora em Santa Maria para o mês de DEZEMBRO.	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BP	British Petroleum
MMA	Ministério do Meio Ambiente
CPFL	Companhia Paulista de Força e Luz
VE	Veículo Elétrico
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
GEPEA	Grupo de Energia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
CRESESB	Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S.Brito
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
DETRAN	Departamento de Trânsito

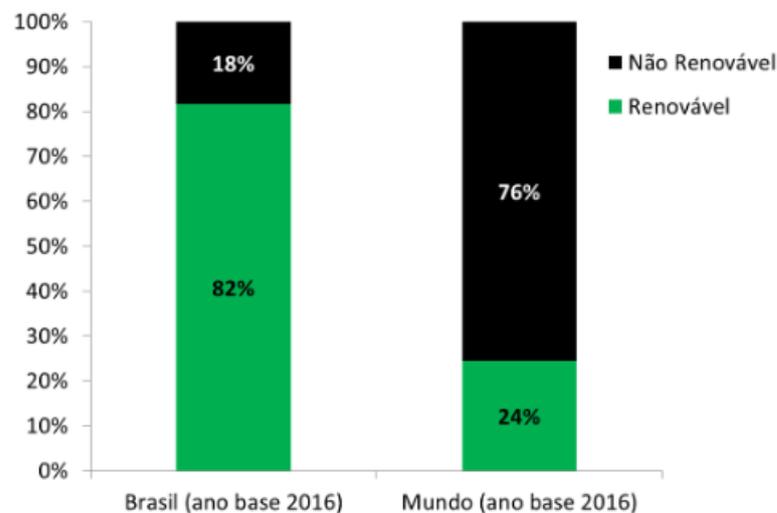
SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVO GERAL	13
1.1.1	Objetivos específicos	13
1.2	ORGANIZAÇÃO DA MONOGRAFIA	13
2	REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO	15
2.1	ENERGIA SOLAR	15
2.1.1	Células fotovoltaicas	15
2.1.2	Módulos fotovoltaicos	16
2.1.3	Efeito da incidência de radiação solar e da temperatura	18
2.2	SISTEMA FOTOVOLTAICO	20
2.2.1	Bloco gerador	21
2.2.2	Bloco condicionador de potência	21
2.2.3	Bloco de armazenamento	22
2.2.4	Sistema fotovoltaico <i>On-Grid</i>	22
2.2.5	Sistema fotovoltaico <i>Off-Grid</i>	22
2.2.6	Sistema Híbrido	22
2.3	SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA SOLAR	22
2.3.1	Baterias	23
2.3.1.1	<i>Bateria de Chumbo-ácido</i>	24
2.3.1.2	<i>Bateria de Níquel-cádmio</i>	24
2.3.1.3	<i>Bateria de Íons-lítio</i>	25
2.4	ESTAÇÃO DE CARREGAMENTO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS	26
2.5	MÉTODO DE MONTE CARLO	27
2.6	<i>SOFTWARES</i>	27
2.6.1	HOMER Grid	27
2.6.2	Excel	28
3	MODELAGEM DO SISTEMA	29
3.1	MODELAGEM DA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA	30
3.2	MODELAGEM DAS BATERIAS DO SISTEMA	31
3.3	MODELAGEM DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS	32
3.4	MODELAGEM DA UTILIZAÇÃO DA ESTAÇÃO DE RECARGA	33
4	OTIMIZAÇÃO E CONSUMO DE ENERGIA	37
4.1	CONSUMO	38
5	RESULTADOS	39
6	CONCLUSÃO	46
6.1	TRABALHOS FUTUROS	46
	REFERÊNCIAS	47
	APÊNDICES	51

1 INTRODUÇÃO

As energias renováveis ganharam bastante espaço no cotidiano da população nos últimos trinta anos alcançando 18% da geração elétrica mundial em 2018 (BP, 2019). Entende-se por energia renovável as provenientes de geração solar, eólica, geotérmica, biomassa, maré e hidroelétrica. No Brasil, no entanto, o Ministério de Minas e Energia informa que 83% da matriz elétrica brasileira é formada fontes renováveis, fato que coloca o país em destaque no cenário mundial de produção desse tipo de energia (BARROS, 2020). Um comparativo entre as matrizes elétricas brasileira e mundial é exibido na Figura 1 onde verifica-se a vantagem do país na produção de energia limpa.

Figura 1 – Comparação das matrizes elétricas brasileira e mundial, respectivamente.



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética, 2018.

De acordo com os dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), em 2019, os sistemas instalados de energia solar obtiveram aumento de 161% em relação ao ano de 2018 (ECODEBATE, 2020). O uso do sol como fonte infinita de geração de eletricidade, ainda, promove a autossuficiência de sistemas isolados, não conectados à rede, por meio de banco de baterias que armazenam a energia obtida durante o dia para utilização durante a noite. Investimentos cada vez mais significativos, a baixa complexidade para instalação de painéis fotovoltaicos e produção completamente limpa impulsionam esse mercado e o aproximam da população.

A motivação para o uso de energias limpas e renováveis comprova-se pelo aumento da emissão de gases nocivos ao meio ambiente causados pelos combustíveis tradicionais e finitos,

pela independência de geração de energia e pela economia na fatura de energia para o usuário. O Brasil tem como meta reduzir gradativamente a emissão de dióxido de carbono (CO₂) até 2020 de, aproximadamente, 39% (MMA, 2019) a qual grande parcela deve-se a frota de veículos movidos a combustíveis fósseis.

Com o pensamento mais sustentável, começaram a surgir novas tecnologias capazes de reduzir a poluição a zero, no caso do veículo elétrico. Até 2030 a quantidade de veículos híbridos ou completamente elétricos no Brasil deverá chegar a 2 milhões de unidades e, acompanhando esse crescimento, mais de 80 mil eletropostos deverão ser criados para suprir essa frota (CPFL, 2018).

Atualmente, porém, o proprietário de um veículo elétrico não dispõe de carregadores ao longo de estradas e estacionamentos em todas as cidades, portanto a autonomia do seu carro depende do tempo de carregamento em sua casa e da capacidade de armazenamento da bateria. Ainda, quando eletropostos são encontrados na via pública, na maioria das vezes, são conectados somente à rede da concessionária que pode estar utilizando meios poluentes de geração de energia que vão de encontro com a idealização de sustentabilidade promovida por um VE.

Adicionalmente ao sistema fotovoltaico, o armazenamento da energia solar promove autonomia ao proprietário, pois independe de fornecimento da rede para o uso da eletricidade durante período de geração baixa de dias nublados ou geração nula, nas noites. Essas baterias geralmente são de chumbo-ácido, níquel-cádmio ou íons de lítio. Embora as baterias de chumbo-ácido sejam as pioneiras e mais utilizadas em sistemas solares, estudos recentes mostram que as de íons de lítio são mais duradouras e têm maior capacidade de estoque de energia (PORTALSOLAR, 2020), tanto que são amplamente utilizadas em automóveis elétricos.

Com o mercado de veículos de motor elétrico crescendo surge, também, a preocupação com o abastecimento dos mesmos em vias públicas de fácil acesso e rápida recarga. Algumas cidades já adotam eletropostos na área central, em estacionamentos públicos e, ainda, em rodovias como é o caso da Eletrovia Paranaense, a maior do Brasil, idealizada e construída pela Companhia Paranaense de Energia (COPEL, 2019) em parceria com a Itaipu Binacional. A via conta com doze estações de recarga de 50kVA (kilovoltampere) de potência cada e carga rápida ao longo de 730 quilômetros que ligam Foz do Iguaçu a Paranaguá, no estado do Paraná.

Para manter o intuito do carro elétrico de ser uma solução livre de emissão de gases nocivos à natureza, a energia utilizada da estação de carregamento deve, da mesma forma, ter origem limpa e renovável. Uma alternativa está no uso de sistema fotovoltaico em eletropostos,

acoplado ou a distância, gerando energia que será armazenada em baterias e injetada na rede. Com isso, gera-se um modelo de carregamento sustentável que pode ser replicado em pontos estratégicos das cidades, principal tema deste trabalho.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objeto de estudo nesse trabalho de conclusão de curso é realizar a análise de uma estação de recarga para veículos elétricos que utiliza fonte solar para geração de energia elétrica e sistema de armazenamento em baterias, conectada à rede de distribuição.

Será demonstrado como realizar o abastecimento de veículos elétricos e armazenamento de energia com fontes energéticas renováveis. Esse sistema tem como estrutura painéis fotovoltaicos, baterias, conversor e postes com carregadores.

O propósito central consiste em analisar elementos para promover autonomia ao proprietário de VE e o uso de um sistema de estoque de energia elétrica para períodos em que os módulos fotovoltaicos estejam em baixa produção. A geração de energia limpa pode ser remota ou conjunta com o eletroposto. As características solares serão extraídas da cidade de Santa Maria, no Rio Grande do Sul.

1.1.1 Objetivos específicos

- Demonstrar a utilização de módulos fotovoltaicos para alimentar estação de carregamento e baterias em sistema *on-grid* (conectado à rede).
- Estimar recarga de veículos elétricos de forma rápida e segura por meio de energia solar e baterias.
- Determinar a demanda de energia necessária para suprir frota em eletroposto em vias públicas.
- Analisar o modelo proposto verificando seu desempenho e comparando com outros cenários a serem elaborados.

1.2 ORGANIZAÇÃO DA MONOGRAFIA

O Capítulo 2 apresenta um estudo bibliográfico acerca dos temas abordados por esse trabalho referenciados em livros, artigos, dissertações, teses.

O Capítulo 3 aborda as modelagens da energia solar, do banco de baterias, da estação de recarga e dos veículos elétricos.

Já, no Capítulo 4, apresenta-se a curva de carga do eletroposto baseada nas escolhas feitas durante o projeto e a otimização promovida pelo *software* HOMER Grid.

No Capítulo 5 fica evidenciado os resultados das modelagens realizadas no capítulo anterior e a análise e comparação do arranjo principal de estudo desse trabalho com alguns diferentes cenários. Já no Capítulo 6 são exibidas as conclusões obtidas e a sugestão de trabalho futuro.

2 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

No capítulo serão evidenciados os conhecimentos abordados na literatura sobre os assuntos tratados nessa monografia.

2.1 ENERGIA SOLAR

O sol, fonte infinita de energia, é utilizado como combustível diretamente para aquecimento de fluidos e geração direta de energia elétrica por meio de materiais fotovoltaicos (ANEEL, 2012).

Foi criada, em 1954, a primeira célula solar de silício pelo cientista Russell Shoemaker Ohl e no mesmo ano o cientista Calvin Fuller criou o processo de dopagem do silício, o que originou as células solares modernas que são usadas desde então. Uma das aplicações pioneiras dos painéis fotovoltaicos se deu no espaço em 1958 quando utilizados acoplados a um satélite. No ano de 2000 começaram, finalmente, a integração de sistemas fotovoltaicos à rede aumentando, ao longo dos anos, a difusão e produção no mundo (PORTALSOLAR, 2016).

As células solares produzem energia que é convertida diretamente em eletricidade pela radiação emanada do sol e formam os módulos e placas com o princípio do efeito fotoelétrico ou fotovoltaico (IMHOFF, 2007). A quantidade mundial acumulada de potência de energia solar alcançou 480 gigawatts (GW) em 2018, sendo a China, Japão e Estados Unidos os países maiores produtores, respectivamente (BLUESOL, 2019).

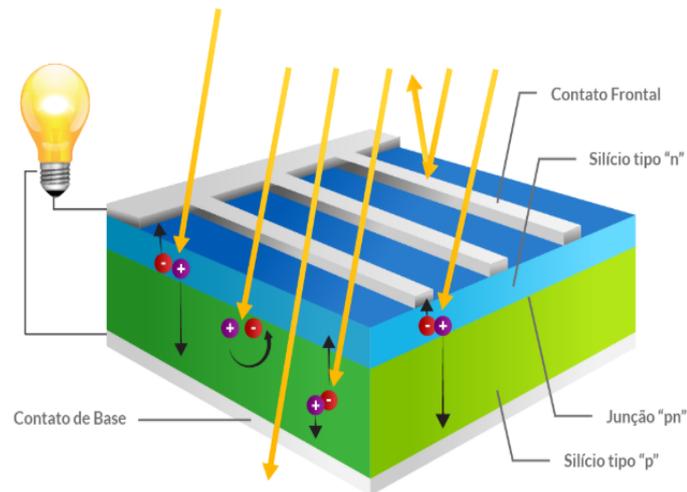
2.1.1 Células fotovoltaicas

Para a obtenção de energia elétrica por meio da fonte solar, são necessárias células formadas por materiais semicondutores encontrados na natureza como o silício. Esses materiais possuem uma banda de valência preenchida por elétrons e outra vazia quando em temperaturas muito baixas, devido a isso a sua condutividade aumenta com a variação da temperatura. O funcionamento da célula somente é possível com uma estrutura que garanta a coleta de elétrons para geração de corrente útil (GEPEA, 2020).

A célula clássica solar, de silício cristalizado, podendo ser mono ou policristalino, tem na sua composição uma lâmina de silício purificado a qual é dopada com boro e fósforo. A parte que contém o fósforo, tipo-N fica em contato com a radiação solar e a parte com boro,

tipo-P, abaixo. A Figura 2 representa a formação da célula fotovoltaica.

Figura 2 – Representação do funcionamento de uma célula fotovoltaica de silício cristalizado.



Fonte: Blue Sol.

A célula terá máxima eficiência quando o maior número de contatos possível estiver na menor área possível.

A célula de silício amorfo também é utilizada pois demonstra vantagens nas propriedades elétricas, na fabricação e nos custos. Porém, apresenta menor eficiência na conversão quando comparada as estruturas cristalinas e baixa durabilidade.

2.1.2 Módulos fotovoltaicos

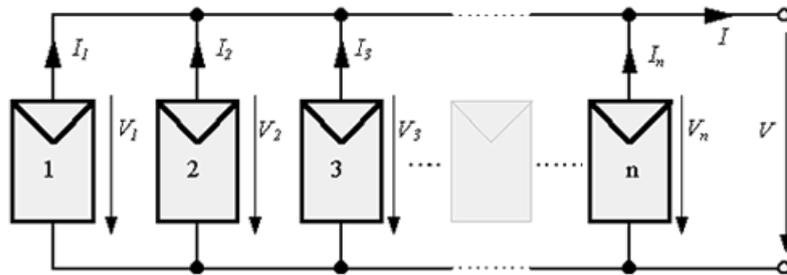
Uma célula representa baixa tensão e corrente de saída, portanto deve-se agrupar várias para formar módulos por meio de conexão série ou paralelo. Na conexão paralelo (Figura 3), as correntes são somadas e a tensão do módulo é igualmente a da célula (CRESESB, 2008).

A conexão em série (Figura 4) é a mais utilizada pois possibilita a soma das tensões de cada célula para obtenção de 12 volts (V) faixa que operam as baterias.

Na configuração série, ainda, comumente utiliza-se o diodo *bypass* que fornece um caminho alternativo para a corrente caso uma das células esteja encoberta e com isso o desempenho das outras não é afetado.

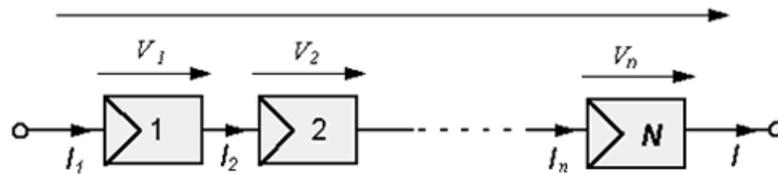
Outro problema possível de ocorrer se dá pelo surgimento de correntes negativas, as quais causam danos à eficiência das células podendo até desconectá-las do arranjo e interromper o fluxo de energia no módulo. Como solução a esse caso, coloca-se um diodo de bloqueio que

Figura 3 – Conexão paralelo das células.



Fonte: CRESESB (2008).

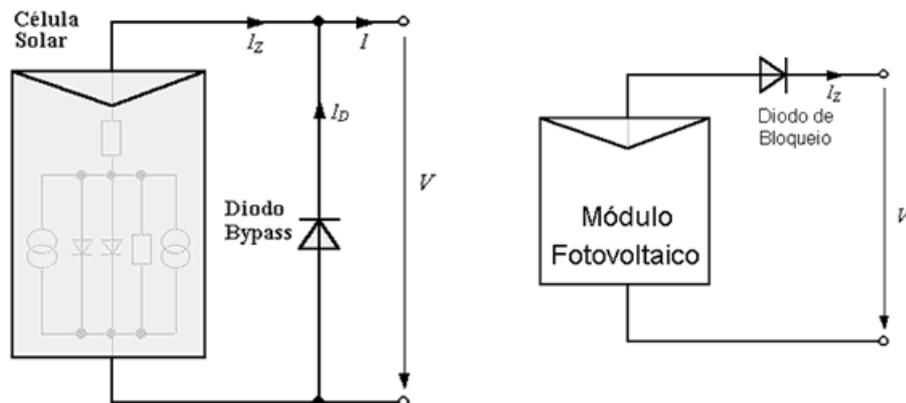
Figura 4 – Conexão série das células.



Fonte: CRESESB (2008).

impede as correntes reversas de circular. A Figura 5 mostra o arranjo dos diodos utilizados juntamente ao módulo fotovoltaico.

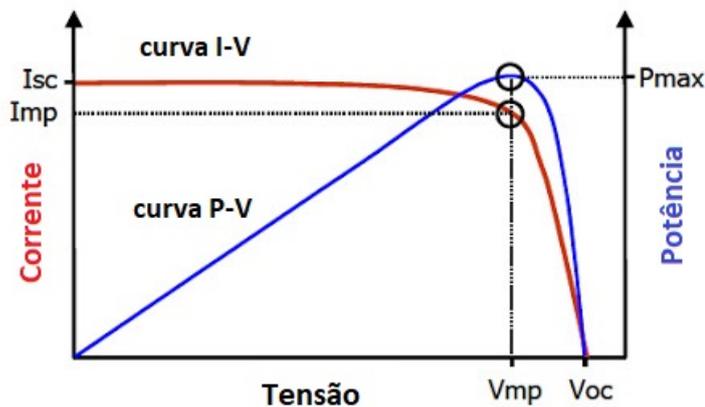
Figura 5 – Ligação de diodo *bypass* entre células e diodo de bloqueio.



Fonte: CRESESB (2008).

Os módulos fotovoltaicos se caracterizam pela potência de pico, a qual se deseja obter para melhor rendimento. As curvas típicas são obtidas para radiação de 1000W/m^2 e temperatura na célula de 25°C , mostrados na Figura 6.

Figura 6 – Gráfico dos parâmetros de potência máxima.



Fonte: CRESESB (2008).

2.1.3 Efeito da incidência de radiação solar e da temperatura

A incidência dos raios solares sobre a superfície terrestre depende das condições atmosféricas, da latitude do local e da posição no tempo (ANEEL, 2012). Esse fato ocorre devido a inclinação da terra e seus movimentos de rotação e translação, mostrados na Figura 7.

Figura 7 – Movimento de translação e inclinação da Terra.

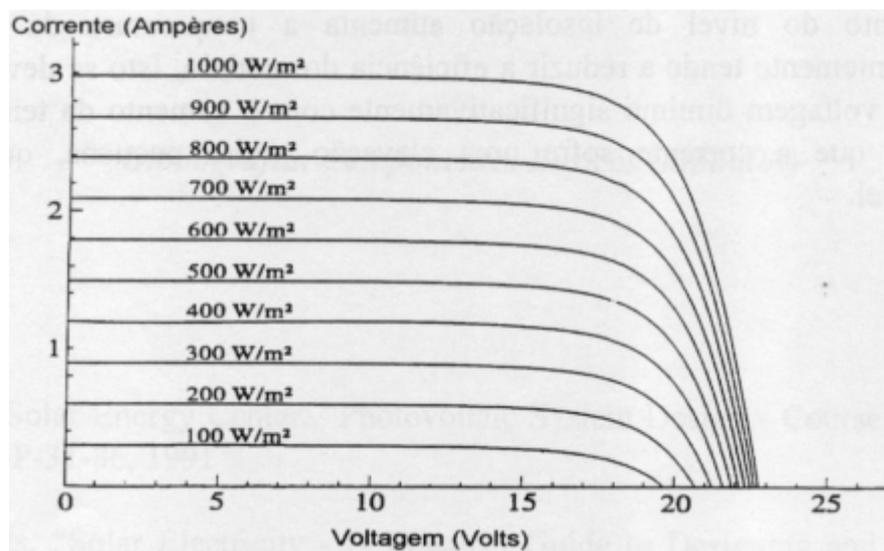


Fonte: MAGNOLI, D.; SCALZARETTO. R. Geografia, espaço, cultura e cidadania. São Paulo: Moderna, 1998.

A radiação varia e se intensifica mais nos polos. Portanto, recomenda-se, para melhor eficiência, posicionar os painéis fotovoltaicos de acordo com a latitude e período do ano que se deseja maior geração. Em geral, no Hemisfério Sul, deve-se posicionar as placas solares viradas para o norte e inclinação seguindo a latitude do local. Já no Hemisfério Norte, a direção sul deve ser buscada para posicionamento dos painéis.

Quando a incidência solar for máxima sobre os painéis, a corrente gerada pelos mesmos também será máxima (GEPEA, 2020). Na ocorrência de fatores que diminuem a radiação, como nuvens, a corrente reduzirá proporcionalmente. No entanto, a tensão de circuito aberto (V_{CA}) apresenta moderada redução. A Figura 8 mostra a curva característica $V \times I$ de um módulo fotovoltaico para algumas intensidades de radiação solar.

Figura 8 – Curva característica $V \times I$ para diversos níveis de radiação solar.



Fonte: (GEPEA, 2020)

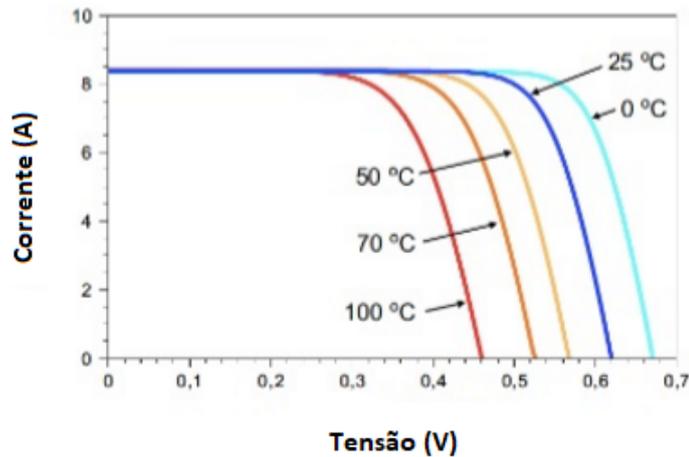
A variação de temperatura também provoca alteração no desempenho final dos painéis fotovoltaicos, como mostra a Figura 9. A medida que a temperatura cresce, a tensão passa a diminuir nos terminais, como a corrente não sofre significativa mudança, o rendimento final é reduzido (CRESESB, 2008).

Outros fatores que também alteram a eficiência do painel fotovoltaico são:

- Deterioração dos componentes pela exposição a luz.
- Sujeira acumulada sobre as placas.
- Cabeamentos.

- Tolerância e compatibilidade elétrica.

Figura 9 – Curva da influência da temperatura nos parâmetros de módulos fotovoltaicos.



Fonte: Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos (GTES, 2014).

2.2 SISTEMA FOTOVOLTAICO

Em busca de utilizar novas tecnologias para geração de eletricidade, os sistemas fotovoltaicos vêm em crescente desenvolvimento ao longo dos anos. Novos materiais constantemente sendo explorados e inúmeras pesquisas na área sendo realizadas (CEMIG, 2012).

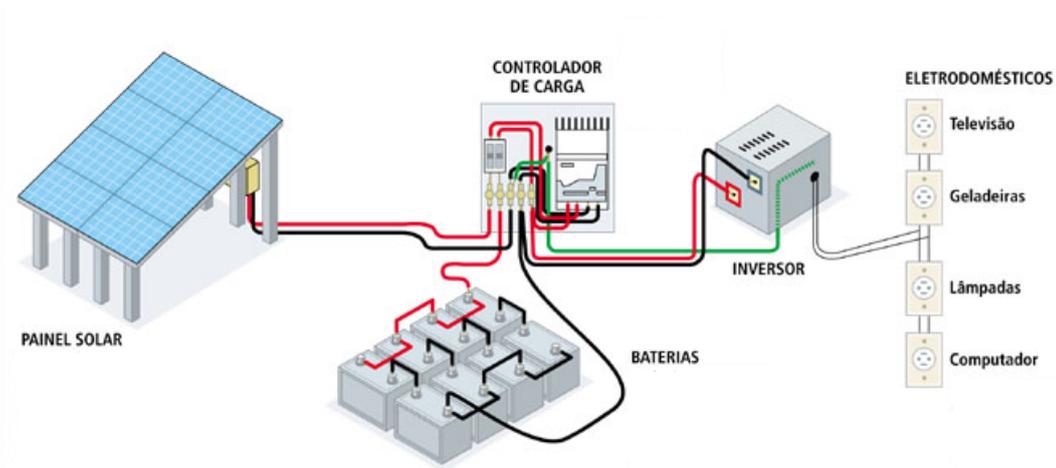
Para a conversão da energia do sol em eletricidade é necessário um conjunto de equipamentos os quais, geralmente, são divididos em blocos: o bloco gerador, o bloco condicionador de potência e o bloco de armazenamento (ECYCLE, 2020). Cada bloco contém componentes com função específica, listados abaixo:

- Bloco gerador: painéis solares, estrutura de suporte e cabos;
- Bloco condicionador de potência: inversores e controladores de carga;
- Bloco de armazenamento: baterias.

Uma forma geral de sistema fotovoltaico pode ser demonstrado na Figura 10. O sistema ainda pode ser integrado com a rede de distribuição (*On-Grid*) ou isolado (*Off-Grid*) dependendo das necessidades do cliente.

Os componentes de cada bloco são explicados a seguir:

Figura 10 – Sistema fotovoltaico.



Fonte: ANEEL (adaptado).

2.2.1 Bloco gerador

- Painéis solares: conjunto de células fotovoltaicas responsáveis por converter a radiação solar em eletricidade. O tamanho e quantidade de painéis depende da disponibilidade de área física e da demanda de energia do consumidor. A instalação indicada para residências é acima do telhado pois minimiza-se chances de interferências.
- Estrutura de suporte: materiais que apoiam os painéis fotovoltaicos. A escolha da estrutura leva em consideração o tamanho, a inclinação e o local da instalação.
- Cabos: extremamente importantes para o fluxo de energia entre os equipamentos. Precisa-se dimensionar a capacidade de corrente e a distância entre componentes, além disso os cabos devem ser de cobre com isolamento termoplástico.

2.2.2 Bloco condicionador de potência

- Inversores: têm como principal função transformar a corrente contínua (CC) gerada pelos painéis em corrente alternada (CA) a qual a maioria dos equipamentos eletrônicos utiliza.
- Controladores de carga: controla a carga e descarga de energia nas baterias, assim, prolonga a vida útil das mesmas e promove maior eficiência. Pelos níveis de tensão consegue

administrar a corrente que flui para a bateria e garante segurança no processo.

2.2.3 Bloco de armazenamento

- Baterias: promovem o abastecimento de energia para o sistema quando a geração for interrompida ou baixa. São essenciais em sistemas *Off-Grid* e indicadas também para sistemas *On-Grid* pois supre o fornecimento em dias nublados, por exemplo. Mais a frente, serão aprofundadas as discussões sobre baterias e armazenamento.

2.2.4 Sistema fotovoltaico *On-Grid*

Quando o sistema fotovoltaico está conectado a rede é chamado de *On-Grid*. Esse sistema entrega, geralmente, a energia produzida pelos módulos diretamente ao consumidor no mesmo instante da sua geração que acontece enquanto há luz solar e/ou armazena uma parte em baterias (SOLARBRASIL, 2020). Sendo a produção de eletricidade maior que a demanda, o sistema injeta o excedente na rede podendo ser consumido por outros usuários e um crédito é cedido pela concessionária para o proprietário. Na situação da demanda ser superior à geração, a rede elétrica fornece o restante necessário.

2.2.5 Sistema fotovoltaico *Off-Grid*

Esses são os sistemas que são isolados da rede elétrica. Se tratando de residências, comumente esse sistema está associado a um banco de baterias, visto que não há produção de energia a noite porém existe consumo. Em sistemas de pequeno porte, podem aparecer, ainda, sem baterias e a energia gerada utilizada imediatamente.

2.2.6 Sistema Híbrido

O sistema solar híbrido se caracteriza pela capacidade de armazenamento de energia e a conexão com a rede, sendo assim um misto entre os sistemas *On* e *Off-Grid*. Possibilitam, assim, maior confiabilidade e economia (SCHMIDT, 2019).

2.3 SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA SOLAR

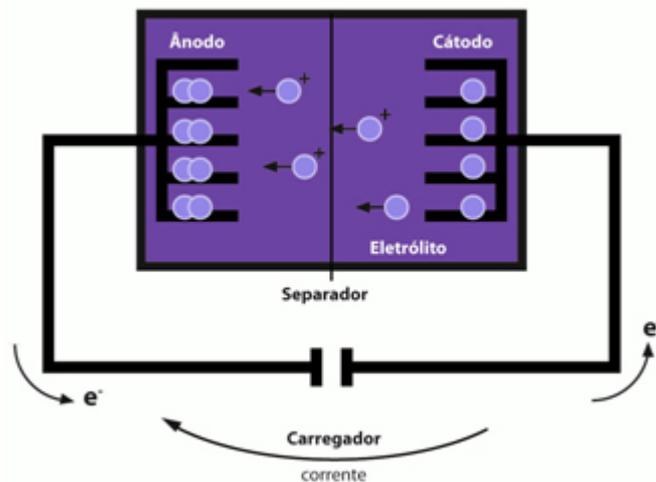
O armazenamento de energia no sistema solar representa grande importância para a independência na geração de energia. São as baterias que garantem o fornecimento de eletricidade

durante baixa ou nenhuma produção. O sistema deve funcionar em regime contínuo de carga e descarga de acordo com a inconstância da geração e do consumo (COPETTI; MACAGNAN, 2007).

2.3.1 Baterias

São dispositivos que produzem corrente elétrica por meio da reação de oxidorredução reversíveis e por isso podem ser recarregáveis (DIAS, 2020). A Figura 11 informa o funcionamento básico de uma célula eletroquímica, a qual forma a bateria.

Figura 11 – Esquemático de uma célula eletroquímica.



Fonte: Brasil Escola, 2020.

Uma bateria possui os elementos a seguir (FERREIRA, 2018):

- Eletrodo negativo (ânodo), composto por um metal redutor.
- Eletrodo positivo (cátodo), composto por um material oxidante.
- Eletrólito que promove a movimentação de cargas na célula.

Para dimensionamento da bateria é importante considerar a capacidade e potência, assim como a profundidade de descarga e a eficiência (INSTITUTO-SOLAR, 2020).

- Capacidade: quantidade de eletricidade que a bateria consegue estocar, em quilowatts-hora (kWh). Com sistema de empilhamento é possível aumentar a capacidade adicionando outra bateria.

- Potência: o quanto de eletricidade a bateria pode fornecer em dado momento, medida em quilowatts (kW).
- Profundidade de descarga: valor da capacidade da bateria que já foi utilizado, pois algumas baterias precisam reter alguma carga devido sua composição química.
- Eficiência: representa a porcentagem de energia necessária pela bateria para armazená-la. Quanto maior a eficiência maior benefício econômico.

As baterias mais comuns utilizadas na armazenagem de energia solar são as compostas por chumbo-ácido, níquel-cádmio e íons-lítio (EMAPSOLAR, 2019).

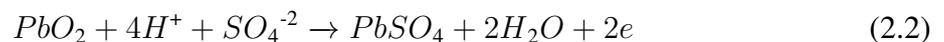
2.3.1.1 Bateria de Chumbo-ácido

A bateria de chumbo-ácido contém na sua composição o metal chumbo (Pb) no ânodo e dióxido de chumbo (PbO₂) no cátodo os quais ficam imersos em solução aquosa com ácido sulfúrico (H₂SO₄).

Ocorre a oxidação do chumbo, perdendo elétrons, no ânodo e então interage com ânions sulfato (SO₄⁻²) providos do ácido, assim formando o sulfato de chumbo II (DIAS, 2020):



No cátodo, o dióxido de chumbo sofre redução que, com os íons do ácido sulfúrico formam a água e o sulfato de chumbo II:



As baterias de chumbo-ácido apresentam como vantagens (STA-ELETRÔNICA, 2020) a simplicidade e baixo custo de fabricação, tecnologia confiável, autodescarga baixa, pouca manutenção e alta taxa de descarga. Em contra partida, não podem ser armazenadas descarregadas, possuem baixa densidade de energia e podem ser nocivas ao meio ambiente.

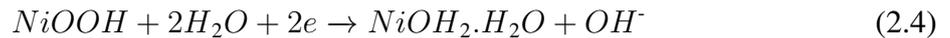
2.3.1.2 Bateria de Níquel-cádmio

A bateria de níquel-cádmio tem como característica no seu ânodo a presença de uma liga metálica de ferro e cádmio e no seu cátodo, hidróxido de níquel III (NiO(OH)₂). Ambas as partes ficam imersas em solução composta por água e hidróxido de potássio (DIAS, 2020).

No ânodo, o cádmio sofre oxidação e interage com os cátions hidróxido (OH^-):



Enquanto que no cátodo, o hidróxido de níquel III sofre redução quando em contato com os elétrons perdidos pelo cádmio, assim, forma o hidróxido de níquel II e libera ânions hidróxido:



No momento que todo o cádmio sofrer oxidação, a bateria deixa de gerar corrente elétrica, porém, as equações ocorrem de forma inversa quando fornecida energia externa.

Dentre as vantagens da bateria de níquel-cádmio estão (STA-ELETRÔNICA, 2020): alto número de ciclos de carga e descarga, longa vida para armazenamento, valor de mercado acessível e carga rápida. Por outro lado, apresenta algumas limitações: baixa densidade de energia, presença de metais tóxicos e efeito memória.

2.3.1.3 Bateria de Íons-lítio

A bateria de íons-lítio é composta por uma associação de lítio com grafite (carbono) no ânodo, enquanto o cátodo é formado por um óxido de lítio com cobalto (DIAS, 2020).

O carbono sofre oxidação liberando íons de lítio e elétrons, no ânodo:



Os íons de lítio juntamente com os elétrons agregam-se ao óxido de lítio com cobalto e com isso a quantidade de lítio no óxido cresce:



No momento que todo o carbono for oxidado a geração de corrente elétrica cessa pela bateria, mas, ao adicionar energia elétrica do meio externo as reações ocorrem de forma inversa, reestabelecendo os eletrodos.

Essas baterias apresentam alta densidade de energia, eficiência próxima de 100%, autodescarga baixa, causam menos dano ao ambiente que as baterias anteriormente citadas. As baterias de íons-lítio, porém, precisam de um maior cuidado, como circuito de proteção, além de apresentarem custo mais elevado de fabricação e o eletrólito ser muito inflamável (STA-ELETRÔNICA, 2020).

As baterias de íon-lítio representam a nova tecnologia vastamente utilizada nos equipamentos eletrônicos e nos veículos elétricos e híbridos.

2.4 ESTAÇÃO DE CARREGAMENTO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

A estação de carga de um veículo elétrico é um ponto de abastecimento de energia elétrica localizado em residências ou em vias públicas, em estabelecimentos públicos ou privados. A rapidez da recarga depende do quanto de potência o eletroposto fornece e, no mercado, há inúmeros modelos que variam desde recargas lentas a ultrarrápidas. A Figura 12 apresenta um exemplo de ponto de carga.

Figura 12 – Estação de carregamento para veículo elétrico 2x22kVA.



Fonte: WEG, 2019.

Habitualmente os pontos de abastecimento existentes em residências são de recarga lenta, o usuário recarrega durante a noite para uso durante o dia seguinte. Ainda, em ambientes públicos, como shoppings, os eletropostos são destinados para cargas semi-rápidas, enquanto o proprietário do VE realiza compras, por exemplo. E ao longo de vias que ligam cidades, distâncias relativamente grandes, as estações permitem uma carga ultrarrápida para que o usuário possa seguir viagem.

A maior eletrovia do Brasil, localizada no Paraná e construída pela COPEL, está em operação há dois anos e já consumiu ao menos 2,5 megawatt (MW) de potência no seu primeiro ano de uso. Esse dado reafirma o crescimento da frota de veículos elétricos e a necessidade de ampliação de pontos de abastecimento pelo país (ABB, 2019).

2.5 MÉTODO DE MONTE CARLO

O método Monte Carlo é caracterizado como um método da probabilidade que busca a solução por meio de eventos aleatórios nos quais calculam-se variáveis desconhecidas para definir os parâmetros de determinado sistema (CARVALHO, 2017). Esse método permite grande quantidade de testes com variáveis com intuito de medir chances de tal resultado acontecer.

Para utilização desse mecanismo, segue-se alguns passos:

- Definição do problema;
- Geração dos valores aleatórios de acordo com as necessidades do problema;
- Aproximar os dados incertos para valores precisos de cálculo;
- Estimar a solução do problema.

No presente trabalho, o método de Monte Carlo será empregado para aferir a probabilidade da chegada de veículos para abastecimento na estação de recarga pela hora do dia. Esse evento é considerado aleatório e os percentuais por hora baseados em medições históricas em postos de combustíveis comuns.

2.6 *SOFTWARES*

2.6.1 **HOMER Grid**

O *software* HOMER Grid desenvolvido por HOMER Energy LLC é um programa que visa otimizar as microrredes nos aspectos econômico, energético e de engenharia, capacitando pessoas com ferramentas adequadas para incentivar a adoção de fontes de energia renováveis no mundo (HOMER, 2020).

No *software* é possível adicionar os elementos para composição da microrrede e simular a geração, consumo, armazenamento e impacto na rede de distribuição, aprimorando os resul-

tados. O ambiente também fornece a opção de obter dados solares procurando pela localidade desejada.

Essas funcionalidades serão exploradas ao longo dessa monografia e alguns filtros selecionados no programa visto que seu viés é em grande parte econômico, o que não é o foco desse trabalho.

2.6.2 Excel

O Excel é um aplicativo desenvolvido pela Microsoft o qual tem como característica um ambiente de planilha onde é possível organizar dados, utilizar fórmulas, obter gráficos para realizar cálculos de forma rápida e moderna (MICROSOFT, 2020).

Manter os dados atualizados e coordenados facilita o desenvolvimento do projeto e na obtenção dos resultados.

3 MODELAGEM DO SISTEMA

A estação de carregamento de veículos elétricos juntamente com o sistema fotovoltaico e o banco de baterias formam o objeto de estudo desse trabalho. Essa microrrede está conectada a rede de distribuição da concessionária de energia e seu impacto na mesma será dimensionado. Os veículos elétricos e iluminação básica representam a carga considerada. A Figura 13 apresenta um exemplo de implementação da microrrede que pode estar anexada com outros postos de combustíveis ou comércios da cidade e os painéis fotovoltaicos não necessariamente todos no mesmo local.

Figura 13 – A microrrede.



Fonte: Autoria própria (2020).

O sistema fotovoltaico que integra a rede é composto por módulos de silício policristalino de 72 células, cada um com 330 W de potência nominal (NEOSOLAR, 2020).

A estação de carregamento de veículos elétricos será composto por dois carregadores de 22 kVA cada.

3.1 MODELAGEM DA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

Para o dimensionamento da geração de energia elétrica por meio do sistema fotovoltaico faz-se o uso da Equação 3.1 demonstrada a seguir e da incidência solar média diária na cidade de Santa Maria, no estado do Rio Grande do Sul, por hora do dia em cada mês do ano.

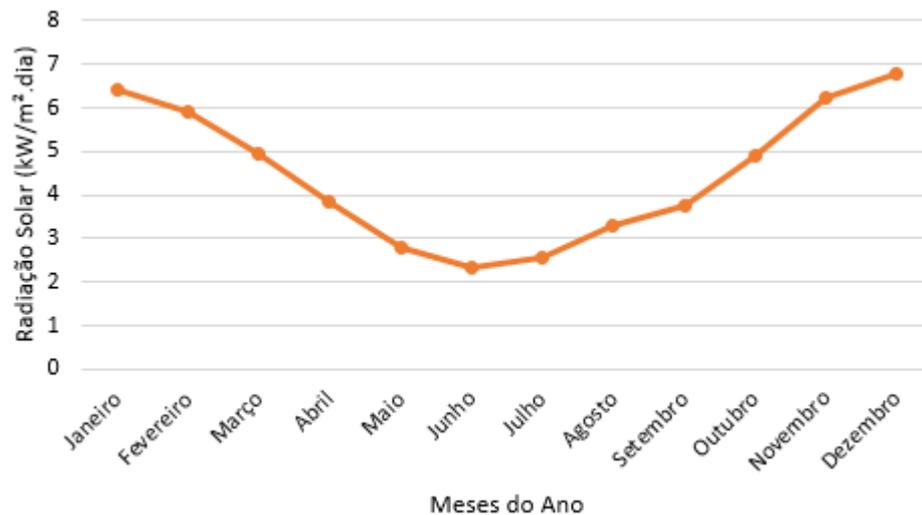
A potência produzida pelos módulos solares pode ser obtida pela Equação 3.1 de acordo com (CHAUHAN; SAINI, 2014):

$$P_{\text{painel}} = G \times A \times \eta \quad (3.1)$$

Onde G é a radiação solar em kW/m^2 , A é a área ocupada pelo painel em m^2 e η o rendimento do painel fotovoltaico.

A radiação solar média (G) incidente na cidade de Santa Maria para um ângulo de 0° pode ser obtida pelo aplicativo *SunData* desenvolvido pelo CRESESB e apresentada no gráfico da Figura 14.

Figura 14 – Radiação solar média por mês do ano em Santa Maria.



Fonte: CRESESB, 2020 (adaptado).

A média anual de incidência solar para a cidade é de $4,48 \text{ kW/m}^2$.

Os parâmetros do painel escolhido, Canadian CSI CS6U-330P, encontram-se na Tabela 1.

A incidência solar média durante o dia para a cidade de Santa Maria foi obtida com o auxílio do *software* HOMER, onde, setando a localidade, uma curva de radiação do sol pode

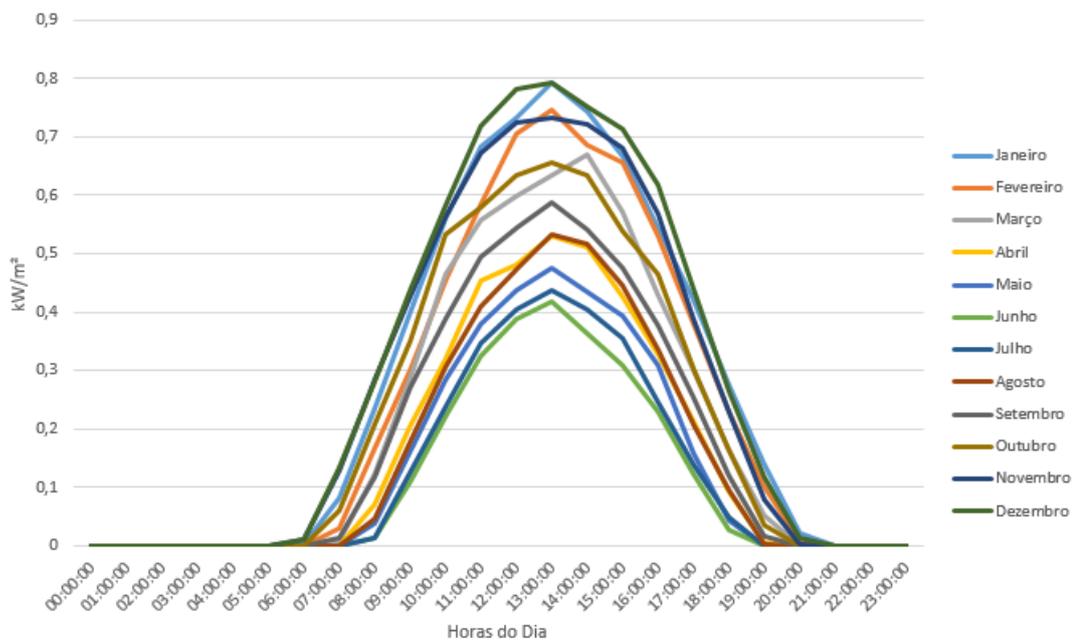
Tabela 1 – Parâmetros do painel.

Parâmetro	Valor
Máxima potência	330W _p
Rendimento (η)	16,97%
Dimensões	(1960 x 992 x 40) mm
Peso	22,2 kg
Área (A)	1,94432 m ²

Fonte: (NEOSOLAR, 2020).

ser gerada e está exposta na Figura 15.

Figura 15 – Incidência da radiação solar média por hora do dia em cada mês do ano.



Fonte: (HOMER, 2020) adaptado.

Os dados e gráficos de incidência de radiação solar para cada mês do ano aplicado no gráfico da Figura 15 encontram-se no Apêndice A.

3.2 MODELAGEM DAS BATERIAS DO SISTEMA

Para suprir a demanda do eletroposto, no cenário de baixa incidência solar e no período da noite, a bateria quando carregada tem como função fornecer a energia precisa às cargas.

A energia gerada pelos painéis fotovoltaicos precisa ser gerenciada e para isso faz-se

uso de um controlador de carga e descarga. O controlador visa realizar o manejo do fluxo de energia com o comando de armazenar a energia excedente ou solicitar a energia estocada nas baterias. Ainda, o controlador deve ser responsável por desconectar as fontes de energia quando as baterias estiverem em sua máxima capacidade de armazenamento (CRESESB, 2013).

Com o objetivo de prolongar a vida útil da bateria, o estado de carga (SOC - State Of Charge), razão entre a capacidade restante sobre a total, fornece informação de disponibilidade de carga atual. Este deve seguir um limite de operação (IDEATEK, 2020) como demonstrado na Equação 3.2.

$$SOC_{\min} \leq SOC \leq SOC_{\max} \quad (3.2)$$

Os dados da bateria de íons-lítio escolhida devido a sua tecnologia avançada e composição para o sistema de armazenamento são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros do banco de baterias.

Parâmetro	Valor
Capacidade	13,5 kWh (cada)
Eficiência	90%
Taxa de carga e descarga	7 kW (pico) / 5kW (contínua) (cada)

Fonte: (TESLA, 2020).

3.3 MODELAGEM DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS

No mercado brasileiro, há modelos de veículos totalmente elétricos disponíveis. A Tabela 3 contém alguns desses modelos e informações importantes sobre os mesmos.

Tabela 3 – Veículos Elétricos e suas características.

Marca e Modelo	Cap. da Bateria (kWh)	Autonomia (km)	Consumo (kWh/km)
Renault - ZOE	41	300	0,1367
Chevrolet - BOLT	66	460	0,1435
JAC Motors - iEV20	41	400	0,1025
Nissan - LEAF	40	240	0,1667

Fonte: Autoria Própria (2020).

A capacidade da bateria em watt-hora (Wh) é o produto da quantidade de corrente que pode ser drenada com a bateria carregada pela tensão da mesma (PINTO, 2016). Tendo em vista

os modelos disponíveis no mercado, neste trabalho será definido uma média de capacidade de bateria de 40 kWh para um veículo elétrico que será abastecido pelo eletroposto.

Ainda, de acordo com (PINTO, 2016) o consumo médio de energia de um veículo é de 160 Wh/km quando realizada a proporção entre consumo na cidade e em estradas de alta e baixa velocidades.

O carregamento do veículo elétrico pode ser realizado de formas diferentes de acordo com o objetivo (HESS et al., 2012):

- *Carga lenta*: o veículo possui carregador que se conecta à tomada residencial (120 V/ 16 A/ 1920 W) e o tempo de carga se dá em torno de 10 horas.
- *Carga padrão*: usa o carregador conectado à tomada residencial (108-240 V/ 12-80 A/ 2500-19200 W) com tempo de recarga, aproximadamente, de 6 a 8 horas. Também disponíveis comumente em locais públicos onde o proprietário irá passar uma quantidade considerável de tempo como no trabalho, compras no comércio e outros.
- *Carga rápida*: necessita de um equipamento para suprimento de carga para o VE com alimentação DC (300-600 V) com limite máximo de 400 A e 240 kW. O tempo de carga fica em torno de 30 minutos.

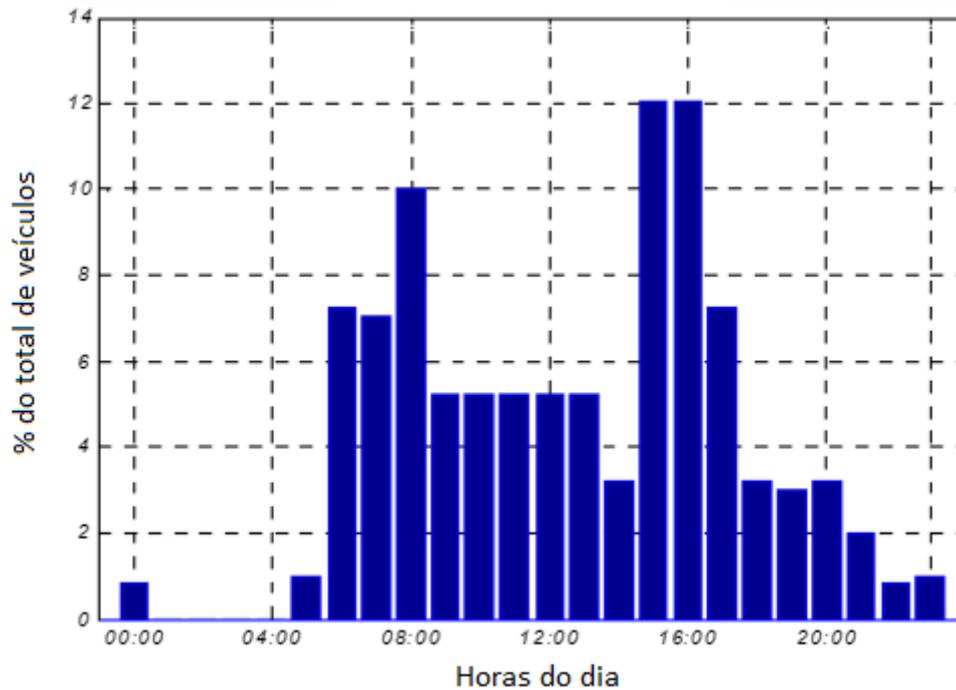
3.4 MODELAGEM DA UTILIZAÇÃO DA ESTAÇÃO DE RECARGA

O eletroposto será disponibilizado em via pública, portanto, durante todas as horas do dia, estará sujeito a utilização por meio de veículos elétricos.

A demanda de veículos elétricos que podem utilizar o carregador ao longo do dia pode ser observada no trabalho de Yunus, de la Parra e Reza (2011). Nesse, foi analisada a demanda típica aferida em postos de veículos movidos a combustíveis fósseis e então utilizada a mesma distribuição aleatória para a modelagem dos movidos a eletricidade. Foram observadas, em um certo dia, a quantidade de automóveis que surgiram em cada uma das 24 horas do dia e, então, os resultados foram apresentados no gráfico da Figura 16.

Com esses dados consegue-se estimar a probabilidade de aparecimento de pelo menos um veículo por cada período, nesse caso, hora do dia. Para cada período define-se um valor a uma variável X de 0 a 1 levando em consideração a frequência de abastecimento medida. Os valores são expostos na Tabela 4.

Figura 16 – Periodicidade de abastecimento em posto por veículos.



Fonte: (YUNUS; ZELAYA DE LA PARRA; REZA, 2011).

No programa Excel, a função aleatório gera, por definição, um número entre 0 e 1 seguindo uma distribuição uniforme, assim, empregando o método de Monte Carlo.

Tabela 4 – Valor da variável X para cada hora.

Hora do dia	Valor de X	Hora do dia	Valor de X
00:00	0,1	12:00	0,6
01:00	0	13:00	0,6
02:00	0	14:00	0,35
03:00	0	15:00	1
04:00	0	16:00	1
05:00	0,1	17:00	0,8
06:00	0,8	18:00	0,35
07:00	0,8	19:00	0,35
08:00	0,84	20:00	0,35
09:00	0,6	21:00	0,22
10:00	0,6	22:00	0,1
11:00	0,6	23:00	0,1

Fonte: Autoria Própria (2020).

Usando dos valores para inserção na função de probabilidade da Equação 3.3 e testando-

a no mínimo cem vezes para cada hora pode-se obter a média da aparição de um automóvel elétrico ao carregador do posto.

Variável aleatória $\leq X$, '1' ocorre abastecimento.

(3.3)

Variável aleatória $> X$, '0' não ocorre abastecimento.

Onde a variável aleatória é a gerada pela função aleatória, dentro de uma função de teste lógico 'Se'.

Com os parâmetros e a utilização da Equação 3.3 é possível estimar a porcentagem de probabilidade de aparecimento e carregamento de um veículo na estação de recarga em certo horário do dia para estabelecer a curva de demanda aproximada. A Figura 17 exibe a curva probabilidade de abastecimento por hora.

Figura 17 – Probabilidade de abastecimento por hora do dia.



Fonte: Autoria Própria (2020).

Sendo a função definida por parâmetro aleatório, o gráfico altera a cada iteração, porém, como a variação mostra-se pequena, pode-se assumir valores aproximados para fins de cálculos.

O número de veículos prováveis de recorrer à estação de carga é estabelecido baseado em dados da frota de automóveis elétricos e híbridos do país que representam 0,1% da frota total (SINDIPEÇAS, 2020) e ainda, da frota de Santa Maria, considerando todos os tipos de combustíveis, de 164 mil veículos (DETRAN-RS, 2020).

Pela curva da Figura 17 observa-se similaridade de valores entre algumas horas do dia e

devido a isso resolve-se agrupá-las para fins de cálculo de acordo com a sua faixa de porcentagem.

Portanto, nesse trabalho fica definido que de acordo com as probabilidades de aparecimento de veículos por hora, a quantidade dos mesmos segue a Tabela 5.

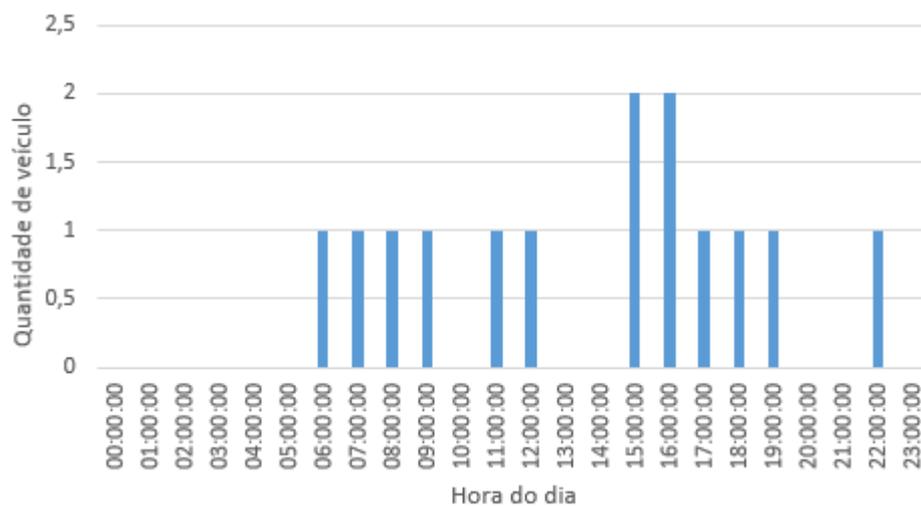
Tabela 5 – Número de veículo abastecido por hora no eletroposto.

Faixa de porcentagem	Hora do dia	Número de veículos
100%	15 e 16	2 (em cada hora)
75% - 99%	6, 7, 8 e 17	1 (em cada hora)
50% - 74%	9, 10, 11, 12 e 13	3 (em 3 dessas horas)
25% - 49%	14, 18, 19, 20 e 21	2 (em 2 dessas horas)
1% - 24%	0, 5, 22 e 23	1 (em 1 dessas horas)
0%	1, 2, 3 e 4	0 (total)

Fonte: Autoria Própria (2020).

Na Figura 18 está evidenciada a escolha da utilização em cada hora por partes dos veículos elétricos.

Figura 18 – Utilização por hora dos carregadores.



Fonte: Autoria Própria (2020).

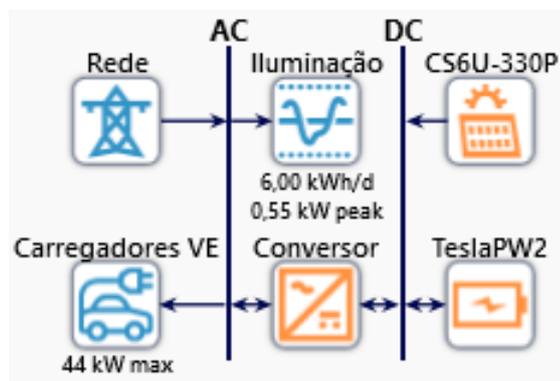
No capítulo seguinte, essas informações serão importantes para definição do consumo de eletricidade por parte dos veículos.

4 OTIMIZAÇÃO E CONSUMO DE ENERGIA

Desde 2012, a ANEEL regulamenta que o consumidor brasileiro pode gerar sua própria energia de forma limpa podendo inclusive fornecer para a rede de distribuição quando há excesso de produção. A microgeração distribuída se caracteriza por sistemas com potência instalada de até 75 kW, enquanto a minigeração é aquela que permanece entre 75 kW e 5MW de potência. Com o excesso de energia injetado na rede, o consumidor recebe créditos para abater na sua unidade nos meses seguintes (ANEEL, 2018).

Os parâmetros modelados no Capítulo 3 definem a curva de consumo de energia no eletroposto levando em consideração as adequações necessárias para o propósito do trabalho. Com o auxílio do *software* HOMER Grid é possível aplicar esses dados nas entradas específicas e formar a microrrede, que pode ser considerada um sistema híbrido, com os componentes desejados bem como avaliar a melhor opção de arranjo. A Figura 19 exibe o arranjo das barras que formam a microrrede.

Figura 19 – Arranjo dos componentes da microrrede.



Fonte: Autoria própria (2020).

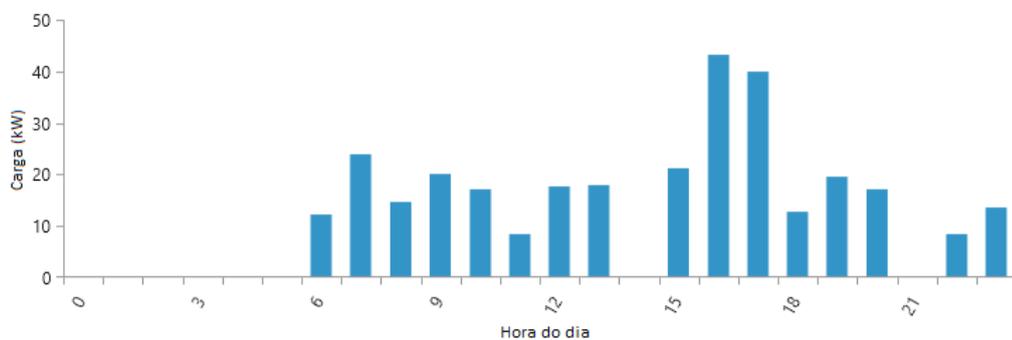
O fornecimento de energia provém da geração fotovoltaica e da rede de distribuição da concessionária local. Uma parte da energia é armazenada no sistema de baterias enquanto o restante é consumida pelas cargas de iluminação e, principalmente, do carregamento dos automóveis. O sistema conta também com conversor de corrente contínua gerada pelos painéis fotovoltaicos em corrente alternada para o uso dos aparelhos.

4.1 CONSUMO

O consumo estimado leva em consideração uma estação com dois carregadores de 22 kVA cada e uma média de visitas para abastecimento baseado na Tabela 5.

Para uma população de 160 carros (0,1% da frota total da cidade) e uma potência máxima de carga estabelecida em 40 kW por veículo, o perfil diário de carga é exposto na Figura 20 de acordo com os cálculos do *software*.

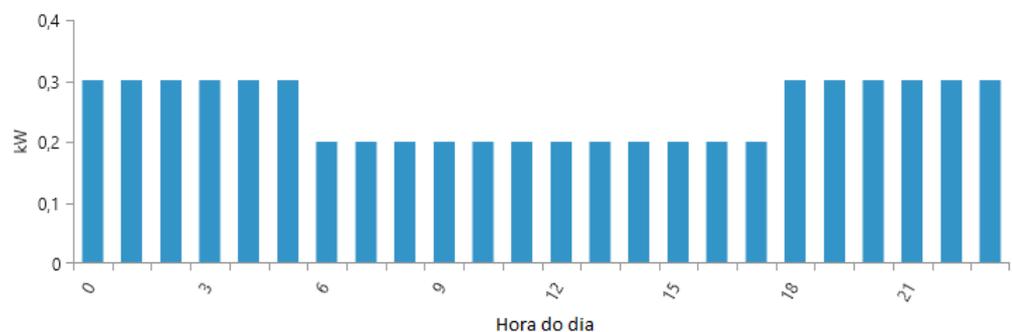
Figura 20 – Curva de carga dos carregadores.



Fonte: HOMER Grid (2020, adaptado).

A carga da iluminação pode ser vista no gráfico da Figura 21 onde, durante a noite, adiciona-se uma iluminação externa ao eletroposto.

Figura 21 – Curva de carga da iluminação.



Fonte: Autoria própria (2020).

Na posse dessas curvas de carga consegue-se obter os dados de geração de energia necessária que serão mostrados no próximo capítulo.

5 RESULTADOS

Nesse capítulo serão exibidas as resoluções promovidas pelo programa HOMER Grid para as especificações que foram propostas e justificadas anteriormente. Também, esses resultados serão comparados com casos em que algumas entradas são modificadas para uma análise mais profunda.

O perfil traçado de carregamento dos veículos elétricos é baseado na Tabela 5. Com essa distribuição e a escolha dos modelos de painel fotovoltaico e da bateria, assim como a utilização de dados solares e de temperatura providos pelo *software*, os resultados puderam ser obtidos.

O cenário objeto de estudo desse trabalho com 2 carregadores de 22 kVA cada e uma simulação utilizando o HOMER Optimizer (algoritmo de otimização do programa) apresenta na Tabela 6 os dados da estrutura da microrrede.

Tabela 6 – Potência instalada para cenário principal.

Componente	Valor
Sistema fotovoltaico	51 kW
Conversor	34,8 kW
Baterias	7 × 13,5 kWh

Fonte: Autoria Própria (2020).

Pode-se observar que a carga instalada sugerida para os painéis demandaria de uma área considerável, porém a geração pode ocorrer de forma remota.

A produção de energia para esse cenário está descrita na Tabela 7 e comparada na Figura 22.

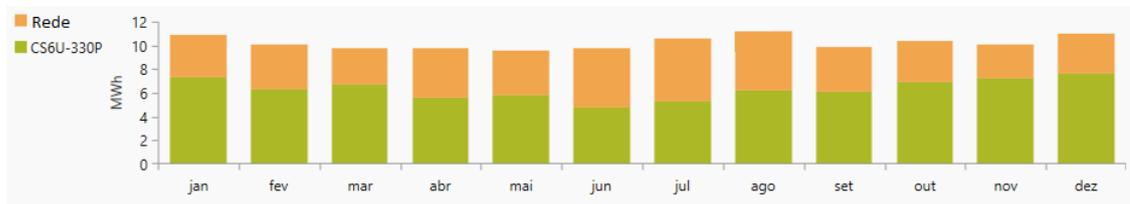
Tabela 7 – Produção de energia para cenário principal.

Fonte	kWh/Ano	%
Sistema fotovoltaico	75721	61,7
Rede de distribuição	47025	38,3
Total	122746	100

Fonte: Autoria Própria (2020).

Percebe-se que, como esperado pela revisão teórica, nos meses do ano em que a cidade se encontra no inverno, a produção de energia pelas placas solares diminui em relação aos meses do verão onde a incidência de raios solares é maior.

Figura 22 – Comparativo mensal de produção de energia solar e fornecimento da rede para cenário principal.



Fonte: Autoria Própria (2020).

O consumo anual por carga está descrito na Tabela 8.

Tabela 8 – Consumo de energia para cenário principal.

Carga	kWh/Ano	%
Iluminação	2190	1,89
Injetado na rede	14330	12,4
Carregadores dos VEs	99455	85,8
Total	115974	100

Fonte: Autoria Própria (2020).

Esse sistema leva em conta o uso do sistema de baterias, então a quantidade de energia armazenada e consumida nesse sistema e o estado da carga ao longo do ano são demonstrados na Tabela 9 e Figura 23, respectivamente.

Tabela 9 – Energia de entrada e saída do banco de baterias.

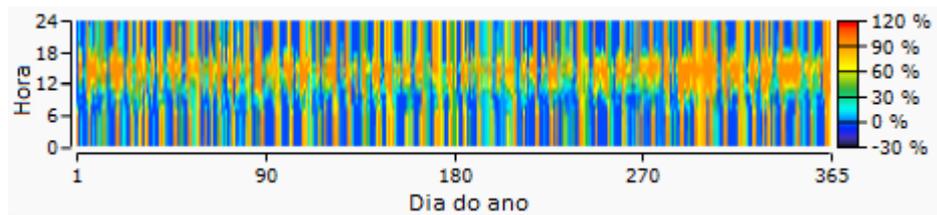
Energia	kWh/Ano
Armazenada	22680
Consumida	20185

Fonte: Autoria Própria (2020).

Analisando o estado de carga nota-se que durante as horas do dia com maior incidência solar as baterias são menos utilizadas e no período da noite participam mais efetivamente no suprimento de energia para as cargas.

Nesse arranjo, a energia renovável têm maior participação na geração, ficando dentro da proposta do trabalho de promover esse tipo de energia e diminuir o uso de combustíveis poluentes.

Figura 23 – Estado da carga para cenário principal.



Fonte: Autoria Própria (2020).

Agora, num segundo arranjo onde os carregadores passam a ser de 50 kVA cada e utilizando, ainda, o otimizador do programa, os novos valores dos componentes estão na Tabela 10.

Tabela 10 – Potência instalada para cenário 2.

Componente	Valor
Sistema fotovoltaico	51 kW
Conversor	40,2 kW
Baterias	6 × 13,5 kWh

Fonte: Autoria Própria (2020).

Observa-se que como a quantidade de potência instalada para geração solar não foi alterada pelo algoritmo, a energia proveniente da rede será muito maior do que a necessária no cenário principal. Os atuais valores para a geração de energia estão na Tabela 11 e o gráfico comparativo na Figura 24.

Tabela 11 – Produção de energia para cenário 2.

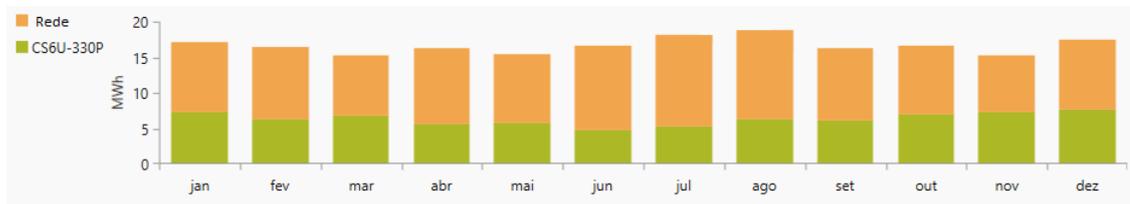
Fonte	kWh/Ano	%
Sistema fotovoltaico	75721	37,9
Rede de distribuição	125888	62,1
Total	199610	100

Fonte: Autoria Própria (2020).

O consumo também modifica-se tendo em vista o aumento de carga fornecida para os veículos em cada hora como exposto na Tabela 12.

O sistema de armazenamento tem um semelhante comportamento de estado de carga ao longo dia com o cenário principal.

Figura 24 – Comparativo mensal de produção de energia solar e fornecimento da rede para cenário 2.



Fonte: Autoria Própria (2020).

Tabela 12 – Consumo de energia para cenário 2.

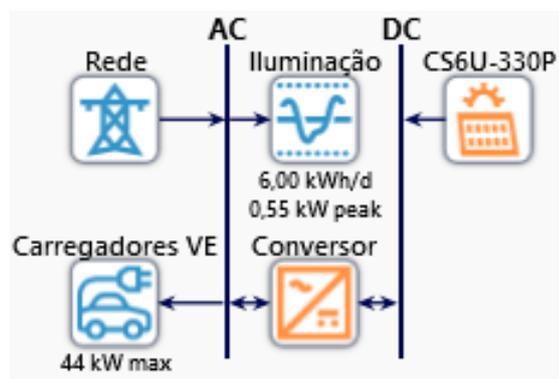
Carga	kWh/Ano	%
Iluminação	2190	1,13
Injetado na rede	10613	5,48
Carregadores dos VEs	180827	93,4
Total	193630	100

Fonte: Autoria Própria (2020).

Esse modelo mostra que a parcela da rede da concessionária de energia precisou ser mais requisitada visto que a carga aumentou consideravelmente, porém a quantia de energia solar ainda mostra-se significativa sustentável e economicamente.

Para um terceiro cenário, dessa vez similar ao principal, com 2 carregadores de 22 kVA cada e utilizando o aprimoramento do programa, foi retirado o banco de baterias e os novos resultados apresentados. O novo arranjo é demonstrado na Figura 25.

Figura 25 – Arranjo da microrrede sem sistema de armazenamento.



Fonte: Autoria Própria (2020).

A Tabela 13 exibe a potência instalada necessária e a Tabela 14 a produção de energia

para esse cenário.

Tabela 13 – Potência instalada para cenário 3.

Componente	Valor
Sistema fotovoltaico	51 kW
Conversor	33,5 kW

Fonte: Autoria Própria (2020).

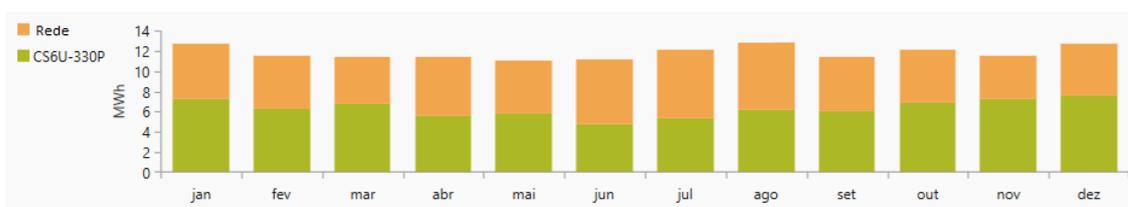
Tabela 14 – Produção de energia para cenário 3.

Fonte	kWh/Ano	%
Sistema fotovoltaico	75721	53,3
Rede de distribuição	66259	46,7
Total	141981	100

Fonte: Autoria Própria (2020).

Relacionando com o cenário principal nota-se que, com a mesma composição de painéis solares, a porção de produção da rede de distribuição aumentou com a remoção das baterias. A Figura 26 evidencia esse fato.

Figura 26 – Comparativo mensal de produção de energia solar e fornecimento da rede para cenário 3.



Fonte: Autoria Própria (2020).

Constata-se que com um sistema de armazenamento, como o do cenário principal, uma parte da energia excedente é utilizada para abastecer as baterias que durante o dia fornecendo suporte aos carregadores. Sem esse armazenamento, o sistema tende a depender mais da rede da concessionária de energia.

Por fim, um último cenário foi analisado com a mesma disposição do principal, porém, agora, setando uma potência instalada obrigatória para os painéis fotovoltaicos como informado na Tabela 15.

Tabela 15 – Potência instalada para cenário 4.

Componente	Valor
Sistema fotovoltaico	13,2 kW
Conversor	10,2 kW
Baterias	2 × 13,5 kWh

Fonte: Autoria Própria (2020).

Levando em consideração o novo porte do sistema fotovoltaico, a produção de energia se divide como exposto na Tabela 16.

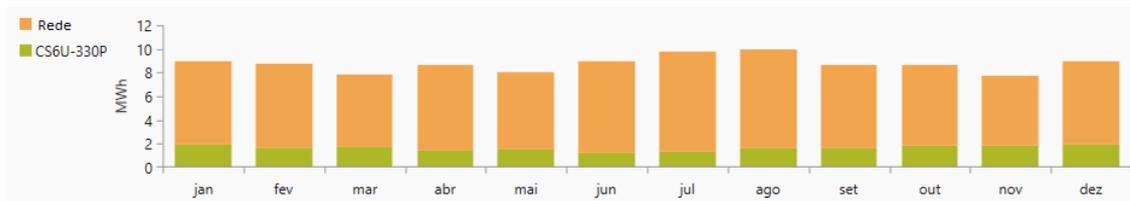
Tabela 16 – Produção de energia para cenário 4.

Fonte	kWh/Ano	%
Sistema fotovoltaico	19599	18,7
Rede de distribuição	85126	81,3
Total	104724	100

Fonte: Autoria Própria (2020).

Como era esperado, a rede deve prover a maior parcela de energia pois para esse sistema a produção solar mostra-se consideravelmente abaixo do necessitado pelas cargas, salientado na Figura 27.

Figura 27 – Comparativo mensal de produção de energia solar e fornecimento da rede para cenário 4.

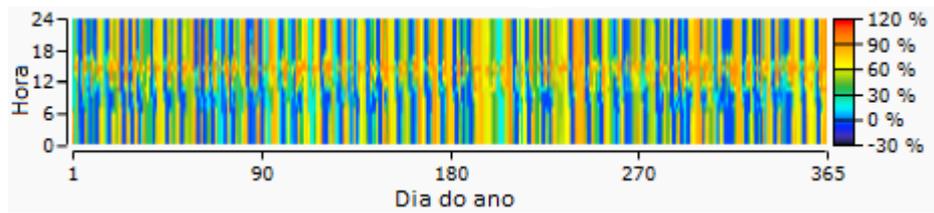


Fonte: Autoria Própria (2020).

Para esse contexto, o estado da carga das baterias sofre maior variação ao longo das horas em comparação ao cenário principal e é exibido na Figura 28.

Analisando o modelo principal desse trabalho com os outros casos simulados, verifica-se que a otimização do *software* buscou aliar, principalmente, uma fração maior de energia solar com um sistema de armazenamento para abastecer a carga do eletroposto de forma segura e completa. Ainda, promove uma compensação com a rede de distribuição com o excedente

Figura 28 – Estado da carga para cenário 4.



Fonte: Autoria Própria (2020).

de energia. Porém, o *software* tem um viés mais econômico então algumas de suas escolhas podem ter sido baseadas nesse princípio. Os resultados, contudo, foram dentro do esperado na produção de energia limpa e na quantidade de energia injetada na rede e demonstra como é um arranjo de microrrede conectada à rede.

6 CONCLUSÃO

Fazendo uso de métodos probabilísticos para definir os dados de incidência de radiação solar, adequados aos valores obtidos por aferição durante um período disponível para a localidade, e para obtenção da média de utilização da estação de recarga pelos veículos elétricos, foi obtida uma curva de carga estimada para o eletroposto. Com o conhecimento da carga foi possível aferir a produção de energia essencial para alimentação do sistema, tanto provinda dos painéis fotovoltaicos quanto da rede de distribuição.

O modelo principal proposto promoveu resultado esperado por meio da simulação e otimização do programa HOMER Grid. A energia solar foi empregada de forma a minimizar os impactos da rede convencional como fonte de energia diminuindo, assim, o uso de prováveis combustíveis fósseis e poluentes.

Conclui-se, portanto, que o uso de sistema de energia solar com armazenamento de energia em baterias e conectado à rede demonstra-se uma opção válida para o abastecimento de veículos elétricos de forma eficiente e sustentável.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Nessa monografia foram levados em consideração os aspectos energéticos para definição de geração distribuída para abastecimento do eletroposto. Mostra-se pertinente no futuro a realização de um estudo financeiro visto que é um fator determinante no incentivo ao uso das energias renováveis.

REFERÊNCIAS

- ABB. Maior eletrovia do Brasil completa um ano com potência total consumida de 2,5 MW. **Nossas histórias ABB**, [S.l.], 2019. <https://new.abb.com/news/pt-br/detail/22899/maior-eletrovia-do-brasil-completa-um-ano-com-potencia-total-consumida-de-25-mw>.
- ANEEL. Energia Solar. **Aneel**, [S.l.], 2012. [http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar\(3\).pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar(3).pdf).
- ANEEL. Geração Distribuída. **Aneel**, [S.l.], 2018.
- BARROS, R. Fontes de energia renováveis representam 83% da matriz elétrica brasileira. **Governo do Brasil**, [S.l.], 2020. <https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2020/01/fontes-de-energia-renovaveis-representam-83-da-matriz-eletrica-brasileira>.
- BLUESOL. Onde a Energia Solar Cresce Mais Forte: os 5 países com maior capacidade instalada. **BlueSol Energia Solar**, [S.l.], 2019. <https://blog.bluesol.com.br/os-5-paises-com-mais-energia-solar/>.
- BP. Electricity Generation by Source. **Our World in Data**, [S.l.], 2019. <https://ourworldindata.org/grapher/electricity-generation-by-source>.
- CARVALHO, A. R. D. Método Monte Carlo e Suas Aplicações. **PROFMAT**, [S.l.], 2017. https://sca.profmtat-sbm.org.br/sca_v2/get_tcc3.php?id=150070513.
- CEMIG. Alternativas Energéticas: uma visão cemig. **Companhia Energética de Minas Gerais**, [S.l.], 2012.
- CHAUHAN, A.; SAINI, R. A review on integrated Renewable energy System based power generation for stand-alone applications: configurations, storage options, sizing methodologies and control. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.l.], 2014.
- COPEL. COPEL inaugura maior eletrovia do país. , [S.l.], 2019.
- COPETTI, J. B.; MACAGNAN, M. H. Baterias em Sistemas Solares Fotovoltaicos. **I Congresso Brasileiro de Energia Solar**, [S.l.], 2007. <http://professor.unisinos.br/jcopetti/artigos/cbens2007.PDF>.

CPFL. CPFL Energia prevê 80 mil eletropostos em 2030 para acompanhar expansão de veículos elétricos no Brasil. **CPFL Energia**, [S.l.], 2018. <https://www.cpfl.com.br/releases/Paginas/cpfl-energia-preve-oitenta-mil-eletropostos-em-vinte-trinta-para-acompanhar-expansao-de-veiculos-eletricos-no-brasil.aspx>.

CRESESB. Tutorial de Energia Solar Fotovoltaica. **Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S.Brito**, [S.l.], 2008. http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_contentlang=ptcatid=4.

CRESESB. Banco de Baterias. **Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S.Brito**, [S.l.], 2013. http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_contentcid=cse_banco_baterias.

DETRAN-RS. Frota em Circulação no RS. , [S.l.], 2020. <https://detrans-admin.rs.gov.br/upload/arquivos/202008/20135057-01-frota-do-rs.pdf>.

DIAS, D. L. Baterias. **Manual da Química**, [S.l.], 2020. <https://www.manualdaquimica.com/fisico-quimica/baterias.htm>.

ECODEBATE. Crescimento do mercado de energia solar no Brasil favorece empreendedores. **EcoDebate**, [S.l.], 2020. <https://www.ecodebate.com.br/2020/01/01/crescimento-do-mercado-de-energia-solar-no-brasil-favorece-empresarios/>.

ECYCLE. Kit energia solar: conheça todos os componentes do sistema solar fotovoltaico. **eCycle**, [S.l.], 2020.

EMAPSOLAR. Como fazer o armazenamento de energia solar fotovoltaica? **Blog Emap Solar**, [S.l.], 2019. <https://emapsolar.com.br/como-fazer-o-armazenamento-de-energia-solar-fotovoltaica>.

FERREIRA, R. T. Planejamento do Carregamento de Veículos Elétricos Atendidos por um Eletroposto Isolado. **Dpto de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Espírito Santo**, [S.l.], 2018. <http://portais4.ufes.br/posgrad/teses>.

GEPEA. Energia Solar Fotovoltaica: fundamentos, conversão e viabilidade técnico-econômica. **Grupo de Energia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**, [S.l.], 2020. https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4649643/mod_resource/content/1/Apostila_solar.pdf.

HESS, A. et al. Optimal Deployment of Charging Stations for Electric Vehicular Networks. **First workshop on Urban networking-Urbane'12**, [S.l.], 2012. <https://conferences.sigcomm.org/co-next/2012/e-proceedings/urbane/p1.pdf>.

HOMER. , [S.l.], 2020. <https://www.homerenergy.com/company/index.html>.

IDEATEK. Estado de Carga (State of Charge ou SoC) das baterias. **IDEATEK Blog**, [S.l.], 2020. <https://www.ideatek.com.br/estado-de-carga-das-baterias/>.

IMHOFF, J. Desenvolvimento de Conversores Estáticos para Sistemas Fotovoltaicos Autônomos. **Dissertação de Mestrado apresentada à Escola de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria**, [S.l.], 2007.

INSTITUTO-SOLAR. Como escolher a melhor bateria para um sistema de energia solar. **Artigos**, [S.l.], 2020. <https://institutosolar.com/bateria-solar-para-um-sistema-de-energia-solar/>.

MICROSOFT. Excel. , [S.l.], 2020. <https://www.microsoft.com/pt-br/microsoft-365/excel>.

MMA. Brasil perto de cumprir meta de redução de CO2 em 2020. **Ministério do Meio Ambiente**, [S.l.], 2019. <https://www.mma.gov.br/informma/item/15650-brasil-perto-de-cumprir-meta-de-redu%C3%A7%C3%A3o-de-co2-em-2020.html>.

NEOSOLAR. Painel Solar Fotovoltaico Canadian CSI CS6U-330P (330Wp). , [S.l.], 2020. <https://www.neosolar.com.br/loja/painel-solar/placa-solar-acima-de-300w/painel-solar-fotovoltaico-330wp-canadian-csi-cs6u-330wp.html>.

PINTO, F. A. V. Um Modelo Para Dimensionamento De Postos De Recarga Rápida Para Veículos Elétricos Baseado No Perfil De Carga Das Baterias De Íons De Lítio. **Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro**, [S.l.], 2016. <https://www.gta.ufrj.br/ftp/gta/TechReports/Fabio16.pdf>.

PORTALSOLAR. História e origem da Energia Solar. **Portal Solar**, [S.l.], 2016. <https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/energia-solar/historia-origem-da-energia-solar.html>.

PORTALSOLAR. Como Armazenar Energia Solar. **Portal Solar**, [S.l.], 2020. <https://www.portalsolar.com.br/como-armazenar-energia-solar>.

SCHMIDT, H. Entenda o que é Sistema Solar Híbrido. **Soliens**, [S.l.], 2019. <https://www.soliens.com.br/blog/energia-fotovoltaica/entenda-o-que-e-sistema-solar-hibrido/>.

SINDIPEÇAS. Relatório da Frota Circulante. , [S.l.], 2020.
https://www.sindipecas.org.br/sindinews/Economia/2020/RelatorioFrotaCirculante_Abril_2020.pdf.

SOLARBRASIL. O que é a energia solar fotovoltaica. **Solar Brasil Energia Solar**, [S.l.], 2020.
<https://www.solarbrasil.com.br/energia-solar/>.

STA-ELETRÔNICA. Vantagens e Limitações das Baterias Seladas de Chumbo-Ácido. **STA Eletrônica**, [S.l.], 2020. <http://www.sta-eletronica.com.br>.

TESLA. Conheça a powerwall, a bateria da sua casa. **TESLA**, [S.l.], 2020.
https://www.tesla.com/pt_PT/powerwall.

YUNUS, K.; ZELAYA DE LA PARRA, H.; REZA, M. Distribution grid impact of Plug-In Electric Vehicles charging at fast charging stations using stochastic charging model. , [S.l.], 2011.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Radiação solar média medida para cada mês do ano por faixa de horário.

Tabela 17 – Valores da incidência de radiação solar (G) média por hora em Santa Maria para o mês de JANEIRO.

Hora do dia	G (kW/m ²)	Hora do dia	G (kW/m ²)
00:00	0	12:00	0,73178
01:00	0	13:00	0,791355161
02:00	0	14:00	0,743948065
03:00	0	15:00	0,66563129
04:00	0	16:00	0,542756452
05:00	0	17:00	0,421382903
06:00	0,001391613	18:00	0,274601613
07:00	0,082737097	19:00	0,138510323
08:00	0,235406129	20:00	0,022599032
09:00	0,399540968	21:00	0
10:00	0,560608387	22:00	0
11:00	0,684167419	23:00	0

Fonte: Homer, 2020 (adaptado).

Tabela 18 – Valores da incidência de radiação solar (G) média por hora em Santa Maria para o mês de FEVEREIRO.

Hora do dia	G (kW/m ²)	Hora do dia	G (kW/m ²)
00:00	0	12:00	0,703973929
01:00	0	13:00	0,7448275
02:00	0	14:00	0,686269643
03:00	0	15:00	0,656335357
04:00	0	16:00	0,528848571
05:00	0	17:00	0,379180357
06:00	0	18:00	0,230592857
07:00	0,030891071	19:00	0,100708214
08:00	0,1654625	20:00	0,009146786
09:00	0,300362143	21:00	0
10:00	0,454716071	22:00	0
11:00	0,585513214	23:00	0

Fonte: Homer, 2020 (adaptado).

Tabela 19 – Valores da incidência de radiação solar (G) média por hora em Santa Maria para o mês de MARÇO.

Hora do dia	G (kW/m²)	Hora do dia	G (kW/m²)
00:00	0	12:00	0,599295806
01:00	0	13:00	0,634619355
02:00	0	14:00	0,668487742
03:00	0	15:00	0,570970645
04:00	0	16:00	0,428499355
05:00	0	17:00	0,300279032
06:00	0	18:00	0,163447097
07:00	0,008512903	19:00	0,052818065
08:00	0,121857419	20:00	0,000128065
09:00	0,286429677	21:00	0
10:00	0,463602258	22:00	0
11:00	0,558294516	23:00	0

Fonte: Homer, 2020 (adaptado).

Tabela 20 – Valores da incidência de radiação solar (G) média por hora em Santa Maria para o mês de ABRIL.

Hora do dia	G (kW/m²)	Hora do dia	G (kW/m²)
00:00	0	12:00	0,480939667
01:00	0	13:00	0,529462667
02:00	0	14:00	0,510548
03:00	0	15:00	0,426492
04:00	0	16:00	0,328100667
05:00	0	17:00	0,214072667
06:00	0	18:00	0,092609667
07:00	0,000443667	19:00	0,006316
08:00	0,071794333	20:00	0
09:00	0,205801667	21:00	0
10:00	0,318983333	22:00	0
11:00	0,452368	23:00	0

Fonte: Homer, 2020 (adaptado).

Tabela 21 – Valores da incidência de radiação solar (G) média por hora em Santa Maria para o mês de MAIO.

Hora do dia	G (kW/m²)	Hora do dia	G (kW/m²)
00:00	0	12:00	0,436264516
01:00	0	13:00	0,474002581
02:00	0	14:00	0,433097742
03:00	0	15:00	0,394385806
04:00	0	16:00	0,308422903
05:00	0	17:00	0,157403871
06:00	0	18:00	0,042280645
07:00	0	19:00	0
08:00	0,038010968	20:00	0
09:00	0,160561613	21:00	0
10:00	0,282824839	22:00	0
11:00	0,380977419	23:00	0

Fonte: Homer, 2020 (adaptado).

Tabela 22 – Valores da incidência de radiação solar (G) média por hora em Santa Maria para o mês de JUNHO.

Hora do dia	G (kW/m²)	Hora do dia	G (kW/m²)
00:00	0	12:00	0,388209
01:00	0	13:00	0,418299
02:00	0	14:00	0,364318667
03:00	0	15:00	0,308016667
04:00	0	16:00	0,229224667
05:00	0	17:00	0,123963333
06:00	0	18:00	0,028365
07:00	0	19:00	0
08:00	0,013687333	20:00	0
09:00	0,109112333	21:00	0
10:00	0,2214	22:00	0
11:00	0,323969333	23:00	0

Fonte: Homer, 2020 (adaptado).

Tabela 23 – Valores da incidência de radiação solar (G) média por hora em Santa Maria para o mês de JULHO.

Hora do dia	G (kW/m²)	Hora do dia	G (kW/m²)
00:00	0	12:00	0,405624839
01:00	0	13:00	0,436139032
02:00	0	14:00	0,405274194
03:00	0	15:00	0,353973548
04:00	0	16:00	0,246642258
05:00	0	17:00	0,13912129
06:00	0	18:00	0,049705484
07:00	0	19:00	0
08:00	0,013833871	20:00	0
09:00	0,125668387	21:00	0
10:00	0,236174839	22:00	0
11:00	0,346277097	23:00	0

Fonte: Homer, 2020 (adaptado).

Tabela 24 – Valores da incidência de radiação solar (G) média por hora em Santa Maria para o mês de AGOSTO.

Hora do dia	G (kW/m²)	Hora do dia	G (kW/m²)
00:00	0	12:00	0,472409355
01:00	0	13:00	0,531393226
02:00	0	14:00	0,516768065
03:00	0	15:00	0,445323548
04:00	0	16:00	0,336089677
05:00	0	17:00	0,208652903
06:00	0	18:00	0,09657871
07:00	2,90323E-05	19:00	0,002177097
08:00	0,047384194	20:00	0
09:00	0,176034194	21:00	0
10:00	0,304647419	22:00	0
11:00	0,410493548	23:00	0

Fonte: Homer, 2020 (adaptado).

Tabela 25 – Valores da incidência de radiação solar (G) média por hora em Santa Maria para o mês de SETEMBRO.

Hora do dia	G (kW/m²)	Hora do dia	G (kW/m²)
00:00	0	12:00	0,542592
01:00	0	13:00	0,58789
02:00	0	14:00	0,542095333
03:00	0	15:00	0,475121333
04:00	0	16:00	0,375916667
05:00	0	17:00	0,253611
06:00	0	18:00	0,119246333
07:00	0,013179	19:00	0,015895333
08:00	0,117555667	20:00	0
09:00	0,270284	21:00	0
10:00	0,389116333	22:00	0
11:00	0,49511	23:00	0

Fonte: Homer, 2020 (adaptado).

Tabela 26 – Valores da incidência de radiação solar (G) média por hora em Santa Maria para o mês de OUTUBRO.

Hora do dia	G (kW/m²)	Hora do dia	G (kW/m²)
00:00	0	12:00	0,632620968
01:00	0	13:00	0,656713871
02:00	0	14:00	0,632646452
03:00	0	15:00	0,537143871
04:00	0	16:00	0,465552258
05:00	0	17:00	0,301974194
06:00	0,000701935	18:00	0,162584839
07:00	0,060127419	19:00	0,035474516
08:00	0,208358387	20:00	0
09:00	0,348996774	21:00	0
10:00	0,533955806	22:00	0
11:00	0,580210968	23:00	0

Fonte: Homer, 2020 (adaptado).

Tabela 27 – Valores da incidência de radiação solar (G) média por hora em Santa Maria para o mês de NOVEMBRO.

Hora do dia	G (kW/m²)	Hora do dia	G (kW/m²)
00:00	0	12:00	0,724072
01:00	0	13:00	0,73174
02:00	0	14:00	0,720707667
03:00	0	15:00	0,679253
04:00	0	16:00	0,569254667
05:00	0	17:00	0,387885333
06:00	0,011451667	18:00	0,228905
07:00	0,129314333	19:00	0,077869
08:00	0,282954	20:00	0,001515333
09:00	0,427277	21:00	0
10:00	0,563307667	22:00	0
11:00	0,670963	23:00	0

Fonte: Homer, 2020 (adaptado).

Tabela 28 – Valores da incidência de radiação solar (G) média por hora em Santa Maria para o mês de DEZEMBRO.

Hora do dia	G (kW/m²)	Hora do dia	G (kW/m²)
00:00	0	12:00	0,782212258
01:00	0	13:00	0,792164839
02:00	0	14:00	0,751886774
03:00	0	15:00	0,712492903
04:00	0	16:00	0,61627871
05:00	0	17:00	0,43886
06:00	0,011685161	18:00	0,2656061
07:00	0,134266129	19:00	0,1160787
08:00	0,282611935	20:00	0,01388161
09:00	0,437644194	21:00	0
10:00	0,582022581	22:00	0
11:00	0,718522581	23:00	0

Fonte: Homer, 2020 (adaptado).