



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Vinícius Zago Cantú

**Dimensionamento e avaliação de viabilidade técnica de um sistema de
refrigeração doméstico fora da rede alimentado por energia solar fotovoltaica e
baterias de íons de lítio de segunda vida**

Florianópolis
2023

Vinícius Zago Cantú

Dimensionamento e avaliação de viabilidade técnica de um sistema de refrigeração doméstico fora da rede alimentado por energia solar fotovoltaica e baterias de íons de lítio de segunda vida

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Ricardo Rüther, Ph.D.

Florianópolis

2023

Cantú, Vinícius Zago

Dimensionamento e avaliação de viabilidade técnica de um sistema de refrigeração doméstico fora da rede alimentado por energia solar fotovoltaica e baterias de íons de lítio de segunda vida / Vinícius Zago Cantú ; orientador, Ricardo Rütger, 2023.

87 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Acesso à energia elétrica. 3. Sistemas fotovoltaicos off-grid. 4. Baterias de íons de lítio de segunda vida. I. Rütger, Ricardo. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Vinícius Zago Cantú

Dimensionamento e avaliação de viabilidade técnica de um sistema de refrigeração doméstico fora da rede alimentado por energia solar fotovoltaica e baterias de íons de lítio de segunda vida

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 24 de novembro de 2023, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Ricardo Rüter, Ph.D.

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Samuel Luna de Abreu, Dr.

Instituto Federal de Santa Catarina

Profa. Ana Paula Melo, Dra.

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Deivis Luis Marinoski, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Insira neste espaço a
assinatura digital

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Insira neste espaço a
assinatura digital

Prof.(a) Ricardo Rüter, Ph.D.

Orientador

Florianópolis, 2023.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Ricardo R  ther, pela oportunidade em participar desse projeto e do laborat rio Fotovoltaica UFSC, pelas suas orienta es, ensinamentos e apoio durante todo meu mestrado.

Ao professor Christian Hermes e equipe do laborat rio Polo-UFSC pelo apoio com rela o   instala o, ensaios do refrigerador e material did tico cedido.

Ao Adriano Ronzoni e equipe da empresa Embraco/Nidec pela cess o do refrigerador para realiza o do experimento e apoio com informa es para o desenvolvimento do projeto.

Ao Andriago Antonioli pelo convite em participar do projeto, apoio e orienta es durante todo o per odo do meu mestrado.

Ao Sylvio Mantelli, pela sua dedica o, apoio e orienta o com rela o   toda a parte de instrumenta o do experimento.

Aos colegas Aline Kirsten, Matheus Hohmann, Sabrina Ebert e Gustavo Xavier pelo apoio na instala o do experimento, avalia o das baterias de segunda vida e coleta de dados.

Aos professores e equipe t cnica do PPGEC, os quais foram fundamentais para meu desenvolvimento e realiza o de todas as etapas do mestrado.

  toda incr vel equipe do Laborat rio Fotovoltaica UFSC, pelo companheirismo, apoio, conversas e aprendizados.

  minha fam lia, meus pais, minha irm , meu cunhado Jo o e meu sobrinho Joaquim por serem presentes e essenciais em minha vida.

  minha esposa Adriana que me apoiou em todas as etapas e tornou poss vel a conclus o desse trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordena o de Aperfei amento de Pessoal de N vel Superior – Brasil (CAPES) – C digo de Financiamento 001.

RESUMO

Os sistemas fotovoltaicos autônomos e fora da rede elétrica pública (*off-grid*) são uma alternativa tradicional para atender às demandas básicas de energia de comunidades sem acesso à rede elétrica, realidade enfrentada por cerca de um bilhão de pessoas em todo o mundo. Neste estudo, foi desenvolvido um sistema composto por um refrigerador de 100 litros alimentado por um gerador solar fotovoltaico *off-grid* e armazenamento de energia usando baterias de íons de lítio de segunda vida reaproveitadas de veículos elétricos. O objetivo deste trabalho é apresentar um método de dimensionamento e analisar a viabilidade técnica através do projeto, construção e teste do sistema de refrigeração *off-grid*. O experimento foi instrumentado com sensores de corrente, tensão e temperatura, e os dados medidos no experimento prático foram analisados para comparar com resultados simulados de dimensionamento e desempenho de componentes e baterias. Os resultados mostram que a bateria de segunda vida foi capaz de suportar o sistema sem interrupções durante 12 meses. Este método demonstrou ser adequado para o desenvolvimento de sistemas *off-grid* por meio de tecnologias mais eficientes e sustentáveis para atender às necessidades de comunidades isoladas e, ao mesmo tempo, abordar questões de sustentabilidade relacionadas ao reaproveitamento de baterias de veículos elétricos em aplicações de segunda vida, antes do descarte final destas baterias para um processo de reciclagem dos elementos químicos componentes, no contexto da economia circular.

Palavras-chave: Sistemas fotovoltaicos *off-grid*, acesso à energia elétrica, baterias de íons de lítio, baterias de íons de lítio de segunda vida.

ABSTRACT

Off-grid, stand-alone photovoltaic systems are a traditional alternative to meet the basic energy demands of communities without access to the electricity grid, a reality faced by close to one billion people around the world. In this study a system composed of a 100 liters refrigerator powered by an off-grid solar photovoltaic generator and battery energy storage using second-life Li-ion batteries repurposed from electric vehicles was developed. The aim of this thesis is to present a sizing method and analyze the technical feasibility by designing, building, and testing the off-grid refrigeration system. The experiment was instrumented with current, voltage and temperature sensors, and the data measured in the practical experiment were analyzed to compare with sizing results and performance of components and batteries. The results show that the second life battery was able to support the system without interruptions year-round. This method demonstrated to be adequate for the development of off-grid systems through more efficient and sustainable technologies to fulfill the needs of isolated communities, and at the same time addressed sustainability issues related to electric vehicle battery repurposing in second-life applications, before the final disposal of these batteries for a recycling process of the chemical components, in the context of a circular economy.

Keywords: Off-grid PV systems, energy access, Li-ion batteries, second-life Li ion batteries.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Proporção da população com acesso à energia elétrica.....	21
Figura 2 – Tipos de acesso à rede.....	22
Figura 3 - Níveis de sistemas Solar Home Systems (SHS) de acordo com a capacidade de alimentar diferentes equipamentos domésticos.	23
Figura 4 - a) acima, componentes principais de um sistema isolado (<i>off-grid</i>); b) abaixo, componentes principais de um sistema conectado à rede.....	26
Figura 5 - Principais métodos de dimensionamento de sistemas fotovoltaicos <i>off-grid</i>	35
Figura 6 - Esquema simplificado de sistema fora da rede, incluindo módulo solar fotovoltaico, regulador de carga, bateria de íons de lítio de segunda vida e carga (refrigerador Youmma® de 100 litros).....	38
Figura 7 – Da esquerda para direita, apresentação geral do Nissan Leaf, o conjunto de baterias e um dos módulos que compõem o conjunto.	39
Figura 8 - Vista dos conectores positivo (+), negativo (-) e central (C) do módulo de bateria do Nissan Leaf	40
Figura 9 - A: Célula individual tipo bolsa ou <i>pouch</i> ; B: módulo de bateria com abertura na caixa metálica para mostrar as quatro células internas.....	40
Figura 10 - Resultado dos ensaios de caracterização do refrigerador, realizados em laboratório	43
Figura 11 - Resultado de um ensaio à temperatura de 32°C, onde é traçada a curva de consumo de potência elétrica e temperatura interna do refrigerador.	44
Figura 12 - Modelagem no PVsyst para simulação do sombreamento sobre o módulo.	48
Figura 13 - Parametrização da bateria de segunda vida no software PVsyst (continua na página seguinte).....	50
Figura 14 – Módulo fotovoltaico P-Si 255Wp.	52
Figura 15 – Controlador de carga MPPT.....	52
Figura 16 – Refrigerador Youmma Nilo 100.....	53
Figura 17 - Visão geral do experimento. Ao fundo (área externa), o módulo solar fotovoltaico e a caixa fixada ao poste, onde se encontram o controlador de carga, as baterias, o BMS e o conversor elevador de tensão CC-CC. Na frente (área interna), o refrigerador de 100 L.....	53

Figura 18 - Visão ampliada da caixa fixada ao poste, com o controlador eletrônico, as baterias, o BMS e o conversor elevador de tensão CC-CC.	54
Figura 19 - Posicionamento dos sensores da instrumentação no experimento. Sensores de sinal elétrico em verde, sensores de temperatura em vermelho.	57
Figura 20 - Instrumentação para aquisição de dados: A – <i>Datalogger</i> , B – Multiplexador de termopares, C – Fonte 12V com bateria.	59
Figura 21 - Características de capacidade de tensão da célula para diferentes correntes de descarga (25°C)	60
Figura 22 - Resultados da simulação para geração total de energia, consumo e temperatura do ar ambiente média.	66
Figura 23 - Potencial de energia a cada mês do ano com principais componentes de perda de energia.	67
Figura 24 - Estado de carga (SOC) da bateria durante todo o período de simulação.	67
Figura 25 - Perfil do fluxo de energia elétrica do sistema experimental: geração de energia solar (vermelho), carga e descarga da bateria (azul) e consumo do refrigerador (verde).	68
Figura 26 - Comparação de geração e consumo de energia e temperatura do ar no ambiente interno pelo período de 12 meses (janeiro/22 – dezembro/22)	70
Figura 27 - Nível mínimo de tensão atingido pelas células da bateria para cada dia.	72

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Comparativo entre tecnologia de bateria de íon de lítio e chumbo ácido.	29
Quadro 2 - Características técnicas do refrigerador.....	41
Quadro 3 - Parâmetros utilizados para simulação.....	47
Quadro 4 – Lista de equipamentos do experimento.....	55
Quadro 5 - Medidas coletadas no experimento.....	57
Quadro 6 - Lista e detalhes dos equipamentos e sensores utilizados na instrumentação do experimento	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultado dos ensaios de caracterização do refrigerador, realizados em laboratório	42
Tabela 2 - Consumo diário estimado da carga para sistema localizado em Florianópolis.....	49
Tabela 3 - Dimensionamento do módulo fotovoltaico de acordo com a irradiação global diária média no plano do módulo e da temperatura do ar ambiente.	63
Tabela 4 – Demonstrativo de resultado de energia utilizada no sistema, identificadas na simulação no PVsyst, com apresentação de ganhos e perdas. A tabela apresenta, de cima para baixo, as perdas e ganhos em cada elemento considerado no processo, desde a irradiação solar disponível no plano horizontal, até a efetiva energia utilizada no sistema.....	65
Tabela 5 - Valores médios mensais de temperatura do refrigerador, temperatura da sala e consumo diário médio do refrigerador.	69
Tabela 6 - Valores mensais de energia medidos no experimento, considerando 12 meses.....	71
Tabela 7 - Resultados anuais do experimento	71
Tabela 8 - Eficiência da bateria a cada mês e média anual.	72
Tabela 9 - PR mensal e anual do experimento.	73
Tabela 10 - Comparativo de resultados de simulação e do experimento para consumo mensal do refrigerador.	74
Tabela 11 - Comparativo de resultados de simulação e do experimento para PR....	75

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BESS	<i>Battery Energy Storage System</i>
BMS	<i>Battery Management System</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
DOD	<i>Depth of Discharge</i>
FV	Fotovoltaico(a)
IAM	<i>Incidence Angle Modifier</i>
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia
LIB	<i>Lithium-ion Battery</i>
LID	<i>Light Induced Degradation</i>
LMO	<i>Lithium Manganese Oxide</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracker</i>
POA	<i>Plan of Array</i>
P-Si	Silício Policristalino
PWM	<i>Pulse-Width Modulation</i>
SOC	<i>State of Charge</i>
SOH	<i>State of Health</i>
STC	<i>Standard Test Conditions</i>

LISTA DE UNIDADES DE MEDIDA

A	Ampere
Ah	Ampere-hora
°C	Graus Celsius
L	Litro
m	Metro
m ²	Metro quadrado
V	Volt
W	Watt
Wh	Watt-hora
Wp	Watt-pico

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	JUSTIFICATIVA.....	17
1.2	OBJETIVOS.....	19
1.2.1	Objetivo geral	19
1.2.2	Objetivos específicos	19
2	REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1	COMUNIDADES ISOLADAS E ACESSO À ENERGIA ELÉTRICA.....	20
2.2	ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	23
2.2.1	Recurso solar	24
2.2.2	Aplicação de energia solar fotovoltaica em sistemas isolados	25
2.3	SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO.....	27
2.4	ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM BATERIAS.....	28
2.4.1	Comparativo entre baterias de íons de lítio e chumbo ácido	29
2.4.2	Baterias de íons de lítio	30
2.4.3	Propriedades de carga de uma bateria	31
2.4.3.1	<i>Capacidade</i>	31
2.4.3.2	<i>Estado de carga (SOC)</i>	31
2.4.3.3	<i>Profundidade de Descarga (DOD)</i>	32
2.4.3.4	<i>Estado de Saúde (SOH)</i>	32
2.4.3.5	<i>Taxa C</i>	32
2.4.4	Sistema de gerenciamento de bateria (BMS)	33
2.5	BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO DE SEGUNDA VIDA.....	33
2.6	DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS ISOLADOS.....	35
2.7	RESUMO DO CAPÍTULO.....	36
3	MÉTODO	38
3.1	OBJETO DE ESTUDO.....	38
3.1.1	Baterias	39
3.1.2	Refrigerador	41
3.1.2.1	<i>Ensaio de caracterização do refrigerador</i>	42
3.1.2.2	<i>Estimativa do consumo de acordo com a temperatura ambiente</i>	44
3.2	PRÉ-DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA.....	45
3.3	SIMULAÇÃO.....	47

3.3.1	Análise de sombreamento	48
3.3.2	Parametrização do consumo da carga.....	48
3.3.3	Parametrização da bateria de segunda vida.....	49
3.4	EXPERIMENTO	51
3.4.1	Equipamentos utilizados no experimento	51
3.4.2	Instrumentação	55
3.4.2.1	<i>Medição de energia elétrica</i>	<i>56</i>
3.4.2.2	<i>Medição de temperatura e irradiância</i>	<i>58</i>
3.4.2.3	<i>Monitoramento</i>	<i>59</i>
3.4.3	Processamento dos dados	59
3.5	ANÁLISE DOS RESULTADOS	61
4	RESULTADOS	62
4.1	RESULTADOS DO DIMENSIONAMENTO	62
4.2	RESULTADOS DA SIMULAÇÃO	64
4.3	RESULTADOS DO EXPERIMENTO	68
5	DISCUSSÃO	74
5.1	COMPARATIVO ENTRE RESULTADOS DA SIMULAÇÃO E EXPERIMENTO	74
5.2	DESEMPENHO GERAL DO SISTEMA	76
5.3	AUMENTO DA CARGA E OUTRAS FUNCIONALIDADES PARA O SISTEMA.....	77
5.4	DESAFIOS NA APLICAÇÃO DE SEGUNDA VIDA DE BATERIAS DE VEÍCULOS ELÉTRICOS	78
5.4.1	Sistemas auxiliares compatíveis	78
5.4.2	Baterias com diferentes históricos	79
5.4.3	Desmontagem, triagem e testes	79
6	CONCLUSÃO	80
	REFERÊNCIAS	82
	APÊNCIDE A – DIAGRAMA DO SISTEMA DE INSTRUMENTAÇÃO	87

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica é uma forma importante de gerar qualidade de vida, considerando o acesso a serviços e utilidades fundamentais, tais como iluminação, refrigeração de alimentos, comunicação e acesso à informações. O acesso à eletricidade em todo o mundo aumentou de 74% para 86% entre 2010 e 2018 (REN21, 2020), no entanto, com a pandemia e a crise energética mundial desde 2020, esse avanço perdeu força e, em 2022, estima-se que esse número volte aos níveis de 2019, com cerca de 774 milhões de pessoas vivendo sem acesso à rede elétrica (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2022a), principalmente na África, Sul da Ásia e nos países que integram a região da floresta Amazônica.

Os sistemas solares desconectados da rede, conhecidos pelos termos em inglês *off-grid* ou *standalone* são formas eficazes e estabelecidas de gerar e distribuir energia para comunidades não conectadas à rede principal de distribuição de energia elétrica (REN21, 2020). Estima-se que 493 milhões de pessoas usam tecnologias solares fora da rede como fonte primária de eletricidade, para conexões de *backup* e para uso produtivo (LIGHTING GLOBAL; 2022).

Os sistemas fotovoltaicos fora da rede também substituíram ou reduziram o uso, por meio de configurações híbridas, de geradores a diesel, tecnologia mais estabelecida de fornecimento de energia a comunidades isoladas. O aumento do custo do diesel e as metas de redução das emissões de gases do efeito estufa são fatores importantes nesse movimento. No entanto, diferentemente dos sistemas a diesel, a geração fotovoltaica sem armazenamento não é capaz de fornecer serviços de energia o tempo todo e, portanto, deve ser associada a sistemas de armazenamento de energia, tal como as baterias, para fornecer eletricidade 24 horas por dia, 7 dias por semana.

O uso de baterias também está sendo visto como um aliado na transição energética no setor de mobilidade elétrica (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2022b), que vem crescendo muito nos últimos anos. Por outro lado, a expectativa de adoção em larga escala de veículos elétricos resultará no descarte de grandes quantidades de baterias de íons de lítio ao final de sua vida útil em carros, caminhões e ônibus elétricos, uma vez que esses tipos de bateria são as mais utilizadas para essas aplicações, devido à alta potência disponível, capacidade energética e durabilidade (MIRZAEI OMRANI; JANNESARI, 2019). Estudos recentes apontam

que, depois de descartadas dos veículos elétricos, essas baterias ainda podem ser adequadas para uso em aplicações estacionárias (AHMADI et al., 2017). A utilização de baterias de segunda vida é vista na literatura como uma oportunidade de aumentar a competitividade dos veículos elétricos, reduzindo os preços de venda e popularizando a tecnologia (CUSENZA et al., 2019; ENGEL; HERTZKE; SICCARDO, 2019; HARPER et al., 2019; HOSSAIN et al., 2019).

Neste cenário, este estudo apresenta um método para analisar a viabilidade do uso de baterias de segunda vida, combinado com pequenos geradores fotovoltaicos (na faixa de centenas de Wp a alguns kWp), para aplicações *off-grid* de pequena escala para atender locais remotos e populações sem acesso à rede elétrica. Para tanto, o método foi aplicado ao dimensionamento de um refrigerador de alimentos, que normalmente é um dos aparelhos mais importantes e um dos principais consumidores de energia em um sistema *off-grid*. O dimensionamento do sistema foi realizado com o objetivo de comparar os resultados e hipóteses consideradas no cálculo teórico com os resultados encontrados em um protótipo do sistema. Uma avaliação dos fatores relevantes para a aplicação e operação do sistema, desafios e barreiras foi realizada. O estudo oferece uma contribuição relevante para o desenvolvimento e expansão de sistemas autônomos de baterias fotovoltaicas usando baterias de segunda vida.

1.1 JUSTIFICATIVA

A presente dissertação concentra-se na análise e avaliação da aplicação conjunta de baterias de segunda vida de veículos elétricos, especificamente a bateria do veículo Nissan Leaf, e de um refrigerador de alta eficiência, especificamente o modelo Youmma Nilo 100 (“Nilo”), em um sistema *off-grid*. Esse sistema, que opera independentemente da rede elétrica convencional, é uma proposta para solucionar a indisponibilidade de energia em locais remotos, áreas sem acesso à eletricidade ou como backup em situações de falha do fornecimento elétrico.

A bateria do Nissan Leaf, originalmente desenvolvida para veículos elétricos, possui tecnologia avançada de íon-lítio LMO (*Lithium Manganese Oxide*), o que lhe confere capacidade de armazenamento de energia de alta densidade. Ao incorporar essa bateria no sistema *off-grid*, podemos aproveitar sua capacidade de acumular energia solar durante períodos de alta produção e liberá-la quando a geração de

energia é insuficiente, mantendo um fornecimento constante de energia para alimentar os diversos componentes do sistema, incluindo, neste caso, o refrigerador.

O refrigerador Nilo 100 é reconhecido por sua eficiência energética. Esse equipamento foi vencedor do prêmio Global Leap Awards 2019, competição internacional que busca identificar e promover os melhores aparelhos para aplicação em sistemas isolados (*off-grid*) do mundo, de forma a acelerar o desenvolvimento e inovação do mercado para atender comunidades carentes sem acesso à energia elétrica ou que contam com combustíveis fósseis como principal opção para atender as necessidades energéticas diárias (GLOBAL LEAP, 2019).

Ao combinar a bateria do Nissan Leaf e o refrigerador Nilo, pretende-se criar um sistema *off-grid* capaz de operar de maneira autônoma e sustentável, garantindo um suprimento confiável de energia para alimentar o refrigerador e, assim, preservar os medicamentos e alimentos perecíveis armazenados. Este trabalho aborda aspectos técnicos e o desempenho dessa configuração específica, bem como sua viabilidade em diferentes contextos e potenciais benefícios para comunidades sem acesso à rede elétrica tradicional.

Dessa forma, esse trabalho possui justificativas de caráter social, no contexto de propor uma solução técnica para levar energia elétrica limpa e melhorar qualidade de vida de populações sem acesso à rede de energia; de caráter ambiental, ao propor uma solução para prolongar a vida útil de baterias de veículos elétricos; e de caráter técnico, visto que o dimensionamento e aplicação de baterias de segunda vida nesse tipo de aplicação é recente e carece de trabalhos na área.

Esse trabalho está inserido no escopo de projeto de pesquisa e desenvolvimento firmado entre os laboratórios Fotovoltaica/UFSC e Polo/UFSC, com apoio da empresa Embraco/Nidec. Os estudos são dedicados ao desenvolvimento de sistemas de refrigeração mais eficientes e de menor impacto ambiental. Dentro desse contexto, foram avaliados novos sistemas de refrigeração *off-grid*, alimentados por energia solar fotovoltaica e sistema de armazenamento em bancos de bateria de íons de lítio de primeira e de segunda vida.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Analisar a viabilidade técnica do uso de baterias de segunda vida para aplicações com refrigerador de pequeno porte em sistemas isolados alimentados apenas por energia solar fotovoltaica.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Identificar o consumo característico de um refrigerador de pequeno porte voltado para sistemas isolados;
- b) Propor uma forma de estimar o consumo elétrico diário do refrigerador a partir do valor da temperatura do ar ambiente;
- c) Realizar o dimensionamento de um sistema isolado utilizando baterias de segunda vida;
- d) Identificar valores de geração, consumo e performance do sistema através de simulação numérica em *software*;
- e) Identificar valores de geração, consumo e desempenho do sistema através de experimento montado e instrumentado em laboratório.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 COMUNIDADES ISOLADAS E ACESSO À ENERGIA ELÉTRICA

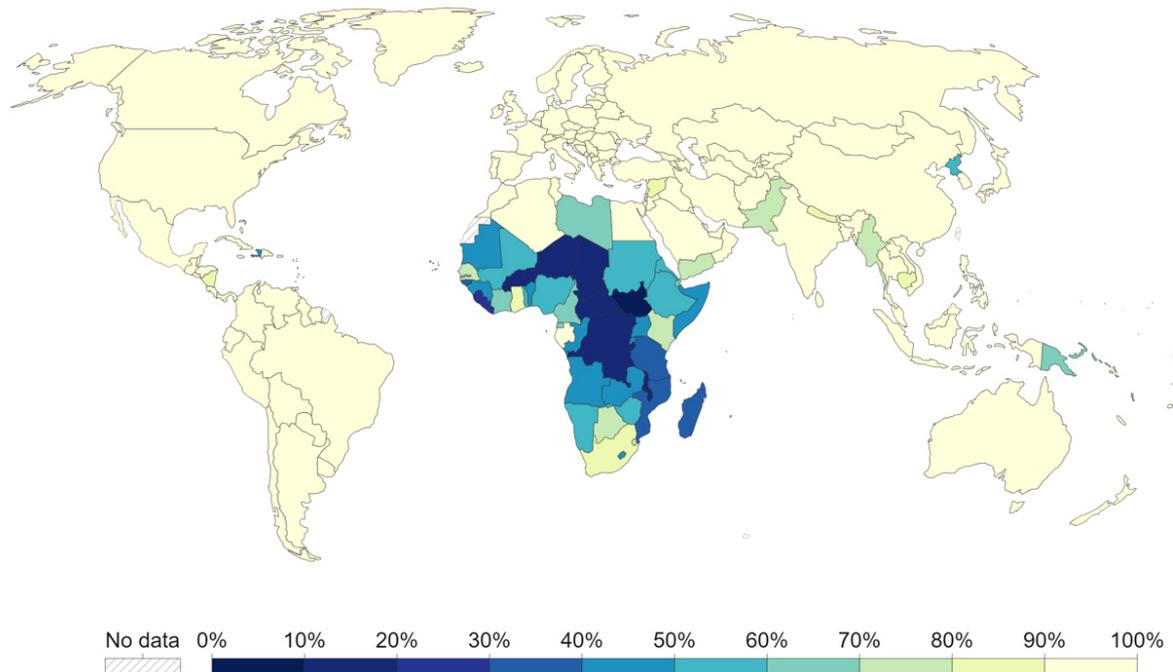
O acesso à eletricidade desempenha um papel crucial no desenvolvimento socioeconômico e na melhoria da qualidade de vida das pessoas. No entanto, ainda existem cerca de 774 milhões de pessoas em todo o mundo que não têm acesso à rede elétrica (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2022c). O acesso à eletricidade tem um impacto significativo na qualidade de vida das pessoas, permite o funcionamento de dispositivos essenciais como iluminação, refrigeração, comunicação e acesso à informação. Além disso, a eletricidade é essencial para o funcionamento de serviços básicos como saúde, educação e segurança.

As populações sem acesso à energia elétrica são distribuídas principalmente na África subsaariana, em países da Ásia em desenvolvimento (como Paquistão, Mianmar e Iêmen) e na América Latina (países da América Central e região Amazônica), conforme é apresentado na Figura 1.

Para comunidades sem acesso à rede elétrica, os sistemas fora da rede podem ser uma solução eficaz. Esses sistemas podem utilizar fontes de energia renováveis, como energia solar ou eólica, ou não renováveis, como geradores a diesel, para gerar eletricidade. Eles podem ser implementados em áreas remotas ou rurais onde a extensão da rede elétrica convencional é impraticável ou cara (REN21, 2020).

O acesso à energia elétrica pode ser realizado através de conexão à rede (*grid*) ou fora da rede (*off-grid*). O acesso fora da rede ainda pode ser dividido entre mini-redes e sistemas isolados (*standalone*), como mostra a Figura 2. Também existem casos em que mini-redes e sistemas isolados podem estar conectados à rede, funcionando como um tipo de *backup* em locais em que a rede é fraca ou pouco confiável (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2023a). Enquanto as mini-redes possuem geralmente potência entre 10 kW e 1 MW, os sistemas isolados tipicamente são caracterizados por sistemas que atendem uma única residência, unidade familiar ou comércio. O foco desse trabalho está em sistemas fora da rede tipo isolados (*standalone e off-grid*). Dessa forma, referências a sistemas fora da rede, isolados ou *off-grid*, quando mencionadas no texto, devem ser interpretadas como sistemas fora da rede isolados.

Figura 1 – Proporção da população com acesso à energia elétrica.



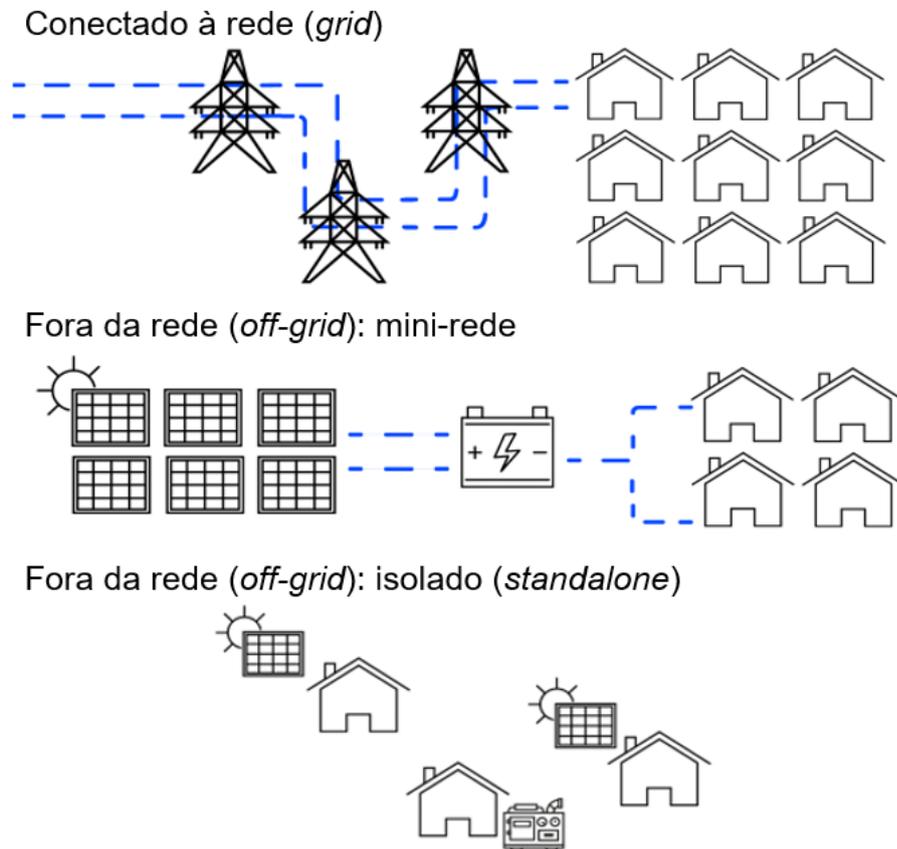
Fonte: (RITCHIE; ROSER; ROSADO, 2022).

Sistemas isolados de pequena escala, alimentados por energia solar e com armazenamento de energia em baterias também são conhecidos como *Solar Home Systems* (SHS). Esses sistemas possuem potência acima de 10 Wp e são considerados como forma de acesso à energia elétrica pelo Banco Mundial e International Energy Agency (IEA) (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2023a). No entanto, esses sistemas possuem características específicas. Eletrodomésticos para uso em sistemas *off-grid* tem requisitos específicos, tais como alta eficiência energética, baixo custo e flexibilidade frente a flutuações na alimentação de energia (EFFICIENCY FOR ACCESS, 2019).

Nesse cenário, novos eletrodomésticos estão sendo desenvolvidos especialmente para uso em sistemas *off-grid*. Em 2019, aproximadamente 1,2 milhões de eletrodomésticos *off-grid* foram vendidos, em sua maioria ventiladores e televisões (REN21, 2020) e a demanda por novos produtos para esse mercado é crescente. Novos produtos que atendam esses requisitos têm potencial de impactar positivamente a vida dessas populações, como é o caso de refrigeradores, bombas de água e painéis de pressão elétrica (EFFICIENCY FOR ACCESS, 2018; REN21, 2020). De forma mais específica, o acesso à refrigeração pode facilitar a geração de renda em pequenos comércios locais, prolongar a validade de alimentos frescos,

enriquecer dietas e reduzir o desperdício de alimentos (EFFICIENCY FOR ACCESS, 2018).

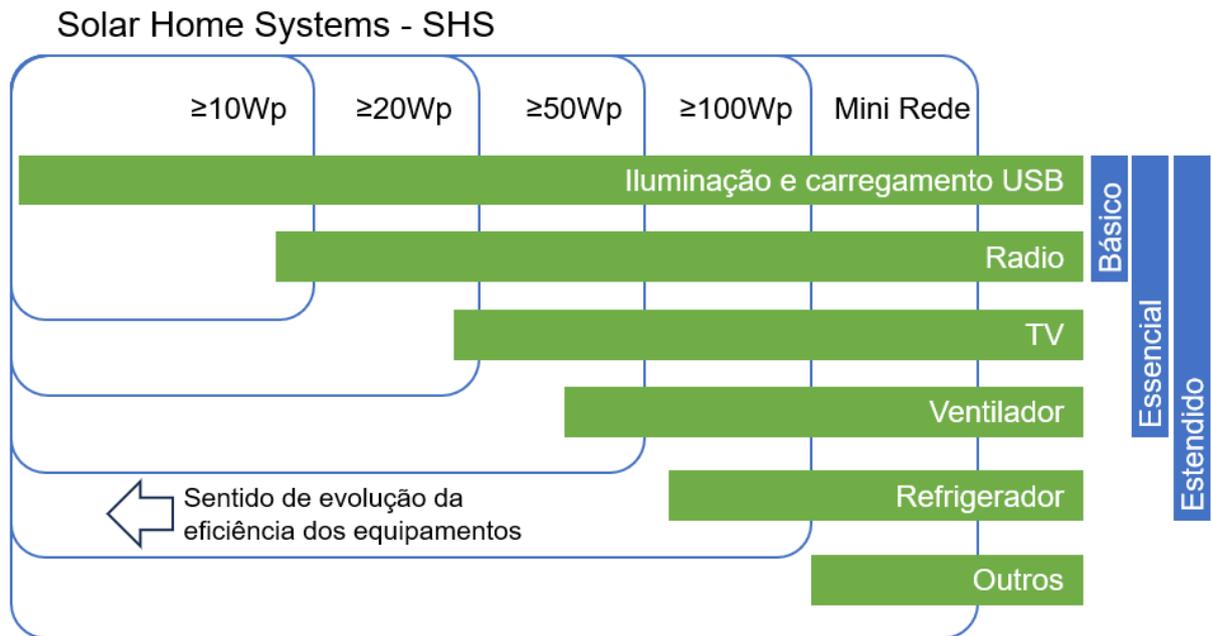
Figura 2 – Tipos de acesso à rede.



Fonte: adaptado de INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2023

A IEA (2023a) divide sistemas SHS em níveis, de acordo com os tipos de equipamentos que podem ser atendidos pelo sistema, conforme é apresentado na Figura 3. Observa-se que o uso de refrigerador está entre os níveis mais altos de sistemas isolados domésticos. Isso se deve ao refrigerador ser considerado um dos maiores consumidores de energia nas residências, devido ao uso de motor elétrico e operação ininterrupta (MEIER, 1995). Por outro lado, os refrigeradores têm uma função importante no progresso econômico e social da população sem eletricidade em todo o mundo, tal como a melhoria da saúde humana e da produtividade até a redução da carga de atividade doméstica de mulheres e crianças (GLOBAL LEAP, 2019).

Figura 3 - Níveis de sistemas Solar Home Systems (SHS) de acordo com a capacidade de alimentar diferentes equipamentos domésticos.



Fonte: Adaptado de (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2023a).

Outra aplicação relevante desse tipo de equipamento é na saúde pública. Sistemas autônomos de refrigeração para uso em áreas isoladas são elementos essenciais em programas de vacinação. Conforme relatório da Organização Mundial de Saúde, o uso de tecnologia fotovoltaica para esse fim iniciou nos anos 80, no entanto, o banco de baterias representa um desafio para o uso dessa solução, tendo em vista as falhas inesperadas, vida útil curta e alto custo de reposição das baterias (WHO, 2015).

2.2 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A energia solar fotovoltaica é uma forma de energia renovável que utiliza a luz do sol para gerar eletricidade. Ela é obtida através da conversão direta da luz solar em eletricidade por meio de células fotovoltaicas. Essas células são compostas por materiais semicondutores, como o silício, que absorvem a luz solar e excitam elétrons, gerando uma corrente elétrica (GTES, 2004).

A geração de energia elétrica através da fonte solar fotovoltaica apresentou grande crescimento nos últimos anos e, em 2022, foi a fonte energética que mais cresceu mundialmente, ultrapassando a energia eólica pela primeira vez

(INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2023b). Em 2022, representou 4,4% da matriz energética brasileira (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2023) e 4,5% da matriz energética mundial (OUR WORLD IN DATA, 2023).

Existem diversas variáveis relacionadas à geração de energia fotovoltaica que devem ser consideradas. Uma delas é a irradiação solar, que representa a quantidade de energia solar disponível em determinada região. Outra variável importante é a inclinação e orientação dos painéis solares, que afetam diretamente a eficiência da captação da luz solar. Além disso, fatores como temperatura, sombreamento e sujeira nos painéis também podem influenciar na geração de energia (GTES, 2004).

2.2.1 Recurso solar

A quantidade de energia solar que atinge a superfície terrestre é variável ao longo do ano e determinada por efeitos astronômicos, principalmente relacionados à órbita da Terra ao redor do Sol, e pela interação da radiação eletromagnética com os elementos que compõem o sistema da atmosfera terrestre. O processo de transmissão da radiação solar através da atmosfera é bastante complexo devido à ampla gama de propriedades físicas da atmosfera que exercem influência sobre ela, como a concentração de vapor de água, a presença de gotículas de água, a existência de cristais de gelo, entre outros (MARTINS; PEREIRA; ECHER, 2004).

A densidade de fluxo de energia solar que chega ao topo da atmosfera terrestre é conhecida como irradiância solar e é expressa nas unidades de W/m^2 (MARTINS; PEREIRA; ECHER, 2004). A integral da irradiância no tempo é definida como irradiação solar (Wh/m^2)¹ ou energia radiante incidente acumulada em um intervalo de tempo (PEREIRA et al., 2017).

A análise da estimativa da quantidade de irradiação incidente em um local é fundamental para o cálculo de um sistema fotovoltaico, visto que a quantidade de energia produzida depende diretamente da irradiação solar incidente. Um dos métodos utilizados é a análise de séries temporais. Esse método consiste em estimar a irradiação solar em um determinado local com base em medições de irradiação realizadas ao longo de um período, através de estações de medição em solo ou de

¹ Observa-se que, embora a unidade no Sistema Internacional seja J/m^2 , nesse trabalho será utilizada a unidade Wh/m^2 , de forma a simplificar a comparação com as informações do setor de energia solar fotovoltaica.

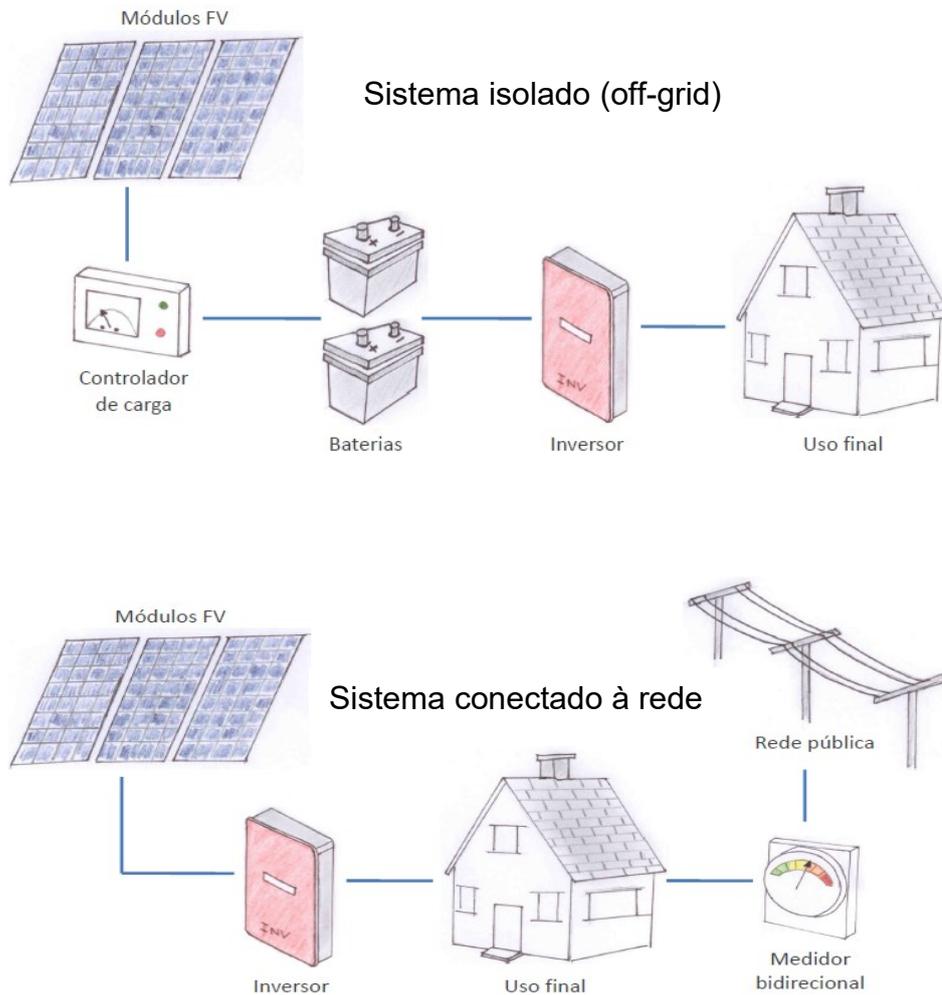
dados obtidos em satélites. Modelos matemáticos podem ser aplicados para estimativa em locais diferentes dos pontos medidos (PEREIRA et al., 2017).

Para todo o território brasileiro, a segunda edição do Atlas Brasileiro de Energia Solar disponibiliza uma base de dados pública com informações cientificamente embasadas sobre o potencial e a variabilidade espacial e temporal do recurso energético solar. Os dados disponibilizados abrangem valores de média anual e média mensal para irradiação global horizontal, direta normal e irradiação no plano inclinado (na inclinação da latitude local), em uma resolução espacial de 10 x 10 km (PEREIRA et al., 2017).

2.2.2 Aplicação de energia solar fotovoltaica em sistemas isolados

As aplicações da energia solar fotovoltaica podem ser classificadas entre sistemas conectados à rede ou autônomos (*off-grid*), conforme é mostrado na Figura 4. Nas aplicações conectadas à rede, o gerador fotovoltaico é conectado à rede elétrica convencional. Nesse caso, a energia gerada pelo sistema é utilizada para suprir as necessidades de consumo da edificação, e o excedente é enviado para a rede elétrica. Já as aplicações *off-grid*, também conhecidas como sistemas isolados, normalmente são utilizadas em locais onde não há acesso à rede elétrica convencional. Nesse caso, a energia produzida pelo gerador fotovoltaico é utilizada instantaneamente pelas cargas do sistema e o excedente pode ser armazenado em baterias para ser utilizado posteriormente (RÜTHER, 2004).

Figura 4 - a) acima, componentes principais de um sistema isolado (*off-grid*); b) abaixo, componentes principais de um sistema conectado à rede.



Fonte: (ANTONIOLLI, 2015)

Os principais componentes de uma aplicação fotovoltaica *off-grid* incluem os módulos fotovoltaicos, que são responsáveis por captar a luz solar e gerar eletricidade; as baterias, que armazenam a energia gerada para uso posterior; o controlador de carga, que regula o fluxo de energia entre os painéis solares; e as baterias. Dependendo do tipo de aplicação, o sistema também pode contar com um inversor. Esse equipamento é utilizado para fornecer energia elétrica à carga no formato de corrente alternada (CA), geralmente em tensões de 110 ou 220 V (GTES, 2004). No entanto, diversas aplicações de sistemas *off-grid* utilizam alimentação de energia diretamente em corrente contínua (CC), geralmente na tensão de 12 V, visto que é o padrão das baterias de chumbo-ácido; porém pode ser realizado em outras

tensões, tal como 24 ou 48 V, ao colocar as baterias em série, ou com o uso de equipamentos eletrônicos para elevação ou diminuição da tensão.

2.3 SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO

Um sistema de refrigeração tradicional funciona com base no ciclo de compressão de vapor. Esse ciclo envolve quatro etapas principais: compressão, condensação, expansão e evaporação. Na etapa de compressão, um compressor é responsável por aumentar a pressão do refrigerante, que é um fluido de trabalho utilizado no sistema. Isso faz com que a temperatura do refrigerante também aumente. Em seguida, no condensador, o refrigerante de alta pressão e alta temperatura é condensado através da transferência de calor para o ambiente externo. Durante esse processo, o refrigerante libera calor para o ambiente.

Após a condensação, o refrigerante líquido de alta pressão passa por uma válvula de expansão, que reduz sua pressão e temperatura e o direciona para a próxima etapa do ciclo. Na etapa de evaporação, o refrigerante de baixa pressão e baixa temperatura entra no evaporador, onde absorve calor do ambiente interno do refrigerador e com isso evapora e volta ao estado gasoso. Esse processo de evaporação retira o calor do ambiente interno do refrigerador, mantendo-o frio. Após a evaporação, o refrigerante gasoso de baixa pressão retorna ao compressor, reiniciando o ciclo (STOECKER; JONES, 1985).

O compressor é o elemento que consome energia elétrica para realizar trabalho no ciclo de refrigeração, e sua eficiência é um importante fator no consumo de energia elétrica do equipamento. Em um refrigerador equipado com compressor tradicional de velocidade fixa, o compressor é ligado quando a temperatura interna sobe acima da temperatura definida (*setpoint*) e desliga quando essa temperatura é atingida. Esse ciclo liga-desliga é desempenhado pelo compressor de forma a manter a temperatura dentro de uma faixa máxima ao redor do valor definido. Nesse caso, quando ligado, o consumo de energia elétrica é constante, o que pode resultar em um consumo de energia desnecessariamente alto quando a demanda de refrigeração é baixa.

Em um refrigerador equipado com compressor tipo *inverter* o consumo de energia elétrica é variável e se ajusta de acordo com a demanda de refrigeração. Esse

tipo de sistema utiliza um compressor de velocidade variável, que pode ajustar sua velocidade de acordo com a carga térmica (MENDES et al., 2020).

Em relação aos refrigeradores domésticos, a eficiência energética é um aspecto importante a ser considerado. A eficiência energética em refrigeradores é consequência de diversas características do equipamento, tal como materiais construtivos, isolamento térmico e tecnologia dos seus componentes. O valor do consumo de energia elétrica é utilizado como medida comparativa entre equipamentos. Os equipamentos são ensaiados sob as mesmas condições ambientes e tempo de ensaio. No Brasil, O Instituto Nacional de Metrologia (INMETRO) gerencia e publica os resultados desses ensaios para os equipamentos disponíveis no mercado, os quais foram utilizados como referência comparativa para o equipamento em estudo. (FERREIRA; VINENTE; PINHEIRO, 2022).

2.4 ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM BATERIAS

Baterias são dispositivos amplamente utilizados como método de armazenamento de energia (AUSFELDER et al., 2017). Desempenham um papel crucial em várias aplicações, desde eletrônicos portáteis, veículos elétricos e até sistemas de armazenamento de energia em rede. Uma bateria consiste em uma ou mais células, que é a unidade eletroquímica básica da bateria, conectadas em série, em paralelo ou em arranjos em série e paralelo, conforme tensão e capacidade de carga que se deseja obter (MICHELINI, 2017).

Na célula, energia potencial química é convertida em energia elétrica por meio de uma reação eletroquímica, em que elétrons são transferidos de um material que se oxida (ânodo ou eletrodo negativo), para um material que se reduz (cátodo ou eletrodo positivo), através de um eletrólito, que é o meio para transferência da carga. Esse processo gera tensão elétrica, que pode ser utilizada para alimentar um sistema elétrico. Em células recarregáveis, a recarga da célula ocorre com a inversão do fluxo de corrente, induzida por uma corrente elétrica, de forma que a oxidação ocorre no eletrodo positivo e a redução no eletrodo negativo (MICHELINI, 2017).

O armazenamento de energia em baterias é uma tecnologia amplamente utilizada na indústria automotiva e em sistemas isolados. No contexto de sistemas *off-grid*, o armazenamento de energia em baterias é essencial para fornecer energia durante períodos sem sol ou durante a noite. Diferentes tipos de baterias são

empregados para esse fim, como as baterias de chumbo-ácido, níquel-hidreto metálico e íon-lítio (DOS SANTOS; ROCHA, 2017). Embora este trabalho seja focado no uso de baterias de íons de lítio, as baterias de chumbo-ácido também são referenciadas, visto que este é o tipo mais utilizado nas aplicações de sistemas isolados (GTES, 2004).

2.4.1 Comparativo entre baterias de íons de lítio e chumbo ácido

A bateria de chumbo ácido é uma das tecnologias mais antigas e mais utilizadas, especialmente em automóveis à combustão, empilhadeiras e grandes sistemas de fornecimento de energia elétrica ininterrupta (*nobreaks*) (AUSFELDER et al., 2017). A bateria de íon de lítio é uma tecnologia mais recente e que apresenta grande ascensão no uso, especialmente devido à sua alta densidade de energia, longa vida útil e baixa taxa de autodescarga (MICHELINI, 2017), conforme é apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 – Comparativo entre tecnologia de bateria de íon de lítio e chumbo ácido.

	Íons de Lítio	Chumbo ácido
Quantidade de Ciclos	5.000 - 15.000	300 – 2.000
Eficiência [%]	90 – 95	75 – 90
Custo inicial [USD/kWh] ¹	340 – 575	100
Densidade de energia [Wh/kg] ²	150 – 200	40
DOD (<i>Depth of Discharge</i>)	80%	50%

Fonte: (AUSFELDER et al., 2017; PIKULTONG; THONGSAN; JIAJITSAWAT, 2022)

As baterias de íon de lítio têm uma densidade de energia significativamente maior em comparação com as baterias de chumbo-ácido. Isso significa que podem armazenar mais energia em um tamanho menor, o que é especialmente importante em aplicações onde o espaço é limitado, como veículos elétricos. De forma geral, as baterias de íon de lítio também são mais eficientes e têm uma taxa de autodescarga mais baixa do que as baterias de chumbo-ácido, o que significa que podem converter uma maior porcentagem de energia armazenada em energia utilizável e reter a energia armazenada por mais tempo, resultando em um melhor desempenho e maior autonomia. Ainda, as baterias de íon de lítio têm uma vida útil mais longa e aceitam

maiores taxas de carga e descarga de forma geral (PIKULTONG; THONGSAN; JIAJITSAWAT, 2022). Por outro lado, as baterias de chumbo-ácido são geralmente mais baratas e amplamente utilizadas em aplicações estacionárias, o que as torna mais acessíveis não apenas financeiramente, mas também em relação à compatibilidade com equipamentos de mercado e conhecimento dos profissionais da área para sua instalação e operação.

2.4.2 Baterias de íons de lítio

As baterias de íons de lítio, ou *Lithium-ion batteries*, são baterias recarregáveis que se tornaram amplamente utilizadas em dispositivos eletrônicos portáteis devido à sua alta densidade de energia, baixo efeito de memória e alta capacidade de carga e descarga (SULLIVAN; GAINES, 2010). As baterias de íons de lítio oferecem a maior densidade de energia volumétrica e gravimétrica entre as tecnologias de bateria recarregáveis (MA, 2018). Assim como os demais tipos de bateria, o princípio básico de funcionamento das baterias de íons de lítio envolve o movimento de íons de lítio entre os eletrodos positivo (cátodo) e negativo (ânodo). Durante a descarga da bateria, os íons de lítio se difundem no eletrólito do ânodo para o cátodo, enquanto os elétrons se movem pelo circuito externo, gerando uma corrente elétrica (MA, 2018).

Os materiais do cátodo em baterias de íons de lítio desempenham um papel crucial na determinação do desempenho da bateria. As principais tecnologias e tipos de bateria utilizadas para aplicação em veículos elétricos são (LI et al., 2018):

- a) Óxido de cobalto de lítio (LiCoO_2 ou LCO)
- b) Fosfato de Ferro de Lítio (LiFePO_4 ou LFP)
- c) Óxido de manganês de lítio (LiMn_2O_4 ou LMO)
- d) Óxido de alumínio, níquel e cobalto de lítio (LiNiCoAlO_2 ou NCA)
- e) Lítio Níquel Cobalto Óxido de Manganês (LiNiCoMnO_2 ou NCM)

A tecnologia utilizada na aplicação estudada nesse trabalho é a LMO.

2.4.3 Propriedades de carga de uma bateria

Algumas propriedades técnicas importantes utilizadas neste trabalho e que influenciam o desempenho das baterias são: capacidade, estado de carga (*State of Charge* - SOC), profundidade de descarga (*Depth of Discharge* - DOD), estado de saúde (*State of Health* - SOH) e taxa de descarga (*C-rate*).

2.4.3.1 Capacidade

A capacidade ou *Capacity* representa a quantidade total de carga que uma bateria pode armazenar, geralmente medida em ampères-hora (Ah) ou em Watt-hora (Wh). É uma propriedade fundamental de uma bateria e influencia diretamente seu tempo de execução do serviço de disponibilizar energia a uma carga e o desempenho de todo o sistema. A capacidade pode ser afetada pelas condições de operação (especialmente temperatura), idade e taxa de carga e descarga (UL HASSAN et al., 2022).

2.4.3.2 Estado de carga (SOC)

O estado de carga ou *State of Charge* (SOC) representa a quantidade de energia armazenada em uma bateria em um determinado momento, expressa em porcentagem de sua capacidade máxima. O monitoramento do SOC é essencial para o gerenciamento eficiente da bateria, evitando sobrecargas e descargas profundas, que podem danificar a bateria e reduzir sua vida útil (UL HASSAN et al., 2022).

Várias técnicas são usadas para estimar o SOC, incluindo métodos diretos, baseados em propriedades da bateria como tensão de circuito aberto, resistência interna e temperatura das células, e métodos indiretos, como modelos matemáticos de circuito elétrico equivalente, eletroquímico e empírico, e modelos baseados em inteligência artificial. A determinação precisa do SOC é crítica para maximizar a utilização da bateria e a eficiência geral do sistema de acordo com cada aplicação (UL HASSAN et al., 2022).

2.4.3.3 Profundidade de Descarga (DOD)

A profundidade de descarga ou *Depth of Discharge* (DOD) refere-se à porcentagem da capacidade de uma bateria que foi utilizada durante um ciclo de descarga. Descargas rasas (baixa DOD) contribuem para uma maior vida útil da bateria e melhoram o SOH, pois reduzem o estresse nos eletrodos. Por outro lado, descargas profundas (alta DOD) podem acelerar a degradação e diminuir o número de ciclos que uma bateria pode sofrer antes de perder capacidade significativa (NARAYAN et al., 2018).

O gerenciamento do DOD é essencial para otimizar o desempenho da bateria, especialmente em aplicações como EVs, onde o equilíbrio entre as necessidades de energia e a longevidade da bateria é crucial. O SOC e o DOD são expressos em percentual e seus valores são complementares (NARAYAN et al., 2018).

2.4.3.4 Estado de Saúde (SOH)

Estado de saúde ou *State of Health* (SOH) refere-se à condição geral de uma bateria em relação à sua capacidade original. À medida que as baterias de íons de lítio passam por ciclos de carga e descarga, sua capacidade diminui gradualmente devido a vários fatores, incluindo degradação do eletrodo, decomposição do eletrólito e formação de uma camada de interface sólido-eletrólito (SEI). Muito altas ou muito baixas temperaturas de operação, descargas profundas e carregamento rápido podem acelerar a degradação do SOH (NARAYAN et al., 2018).

Para determinar o SOH de uma bateria de íons de lítio, vários métodos de diagnóstico são empregados, como contagem de coulomb, espectroscopia de impedância e perfil de tensão. Compreender o SOH é crucial para avaliar a vida útil restante de uma bateria e garantir o desempenho ideal.

2.4.3.5 Taxa C

A taxa C ou *C-Rate* representa a taxa na qual uma bateria é carregada ou descarregada em relação à sua capacidade máxima. Essa taxa é normalmente expressa como um múltiplo da capacidade nominal da bateria, com 1C indicando uma

corrente de carga ou descarga que carregaria ou descarregaria totalmente a bateria em uma hora. Por exemplo, uma taxa de 2C carregaria ou descarregaria a bateria em meia hora, enquanto uma taxa de 0,5C levaria duas horas.

2.4.4 Sistema de gerenciamento de bateria (BMS)

O Sistema de gerenciamento da bateria ou *Battery Management System* (BMS) é um componente essencial para operar a bateria de íon de lítio de forma segura e prolongar sua vida útil (AUSFELDER et al., 2017). O principal objetivo do BMS é monitorar e controlar os parâmetros da bateria, como tensão, corrente e temperatura, tanto das células individuais quanto do pacote de bateria completo. Além disso, o BMS também desempenha funções importantes, como o balanceamento de células, estimativa do estado de carga (SOC) e estado de saúde (SOH) da bateria (ALI et al., 2019).

2.5 BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO DE SEGUNDA VIDA

A segunda vida das baterias de veículos elétricos é comumente definida como o uso de baterias para uma segunda aplicação, normalmente estacionária, a partir do momento em que a capacidade de carga atinge entre 70% e 80% da capacidade original (AHMADI et al., 2017; HOSSAIN et al., 2019; MIRZAEI OMRANI; JANNESARI, 2019). O desempenho elétrico da bateria de segunda vida é semelhante ao de uma bateria de íon-lítio nova, porém com a degradação do estado de saúde (SOH), a capacidade de carga é reduzida em relação à original. Essa redução representa uma limitação muito grande para os veículos elétricos pois impacta na sua autonomia, motivo pelo qual são descartadas (ASSUNÇÃO; MOURA; DE ALMEIDA, 2016; CUSENZA et al., 2019; ENGEL; HERTZKE; SICCARDI, 2019; HARPER et al., 2019; HOSSAIN et al., 2019). Como a capacidade é reduzida, para se obter uma capacidade total equivalente à original, um conjunto de baterias de segunda vida precisará de mais módulos, e conseqüentemente terá volume e peso maiores. Essa diferença de volume e peso é crítica para o caso de veículos, porém não representa um problema para aplicações estacionárias. Assim, as baterias de segunda vida apresentam boa relação entre custo e benefício para sistemas estacionários de energia, principalmente quando acopladas a geradores solares fotovoltaicos e cargas

em que os ciclos diários são muito menos intensos do que em aplicações de mobilidade elétrica.

Vários estudos de pesquisa estão sendo realizados para aplicações de baterias de segunda vida (AHMADI et al., 2017; ASSUNÇÃO; MOURA; DE ALMEIDA, 2016; CUSENZA et al., 2019; HARAM et al., 2021; HOSSAIN et al., 2019; SONG et al., 2022; ZAGO CANTÚ et al., 2022). Esses estudos podem ser divididos em aplicações de grande, médio e pequeno porte. As principais aplicações de grande e médio porte são em sistemas de armazenamento de energia por bateria, conhecidos como *Battery Energy Storage Systems* (BESS), utilizados como suporte a fontes de energia solar e eólica, transmissão de energia e como substituição a geradores para aplicações comerciais e industriais. As aplicações de pequeno porte são tipicamente residenciais, comerciais de pequeno porte e sistemas isolados.

O uso de baterias de segunda vida para aplicações fora da rede para atender populações isoladas tem sido menos explorado. Alguns autores (BHATT; ONGSAKUL; MADHU M., 2022; NEDJALKOV et al., 2019) têm trabalhado em aplicações de microrredes com uso de baterias de segunda vida. Tong et al. (2013) propuseram e analisaram uma bateria de segunda vida em um sistema de carregamento de veículos fotovoltaicos fora da rede. Nguyen et al., (2020) propuseram o projeto e a implementação de uma estação autônoma de carregamento de bicicletas elétricas fornecida por painéis fotovoltaicos e pequenas turbinas eólicas, combinadas com um BESS composto por baterias de segunda vida.

É importante ressaltar que, após a primeira vida de uso dessas baterias em veículos elétricos, algumas etapas de avaliação e qualificação são essenciais para que possam ser utilizadas de forma segura em outra aplicação para a segunda vida: desmontagem, testes, estimativa da capacidade restante e remontagem das baterias em um novo produto projetado para a nova aplicação (ASSUNÇÃO; MOURA; DE ALMEIDA, 2016; CUSENZA et al., 2019; ENGEL; HERTZKE; SICCARDO, 2019; HARAM et al., 2021; HARPER et al., 2019; HOSSAIN et al., 2019). Essas etapas envolvem vários desafios, dentre eles, a dificuldade e os riscos (químicos e elétricos) relacionados ao processo de reaproveitamento, a grande variedade de modelos e químicas de baterias de veículos, e a dificuldade em estimar corretamente a capacidade restante (HARAM et al., 2021; SONG et al., 2022). Quando comparados com baterias novas, os níveis de estado de saúde (SOH) de células de baterias de segunda vida são significativamente heterogêneos e difíceis de caracterizar, o que é

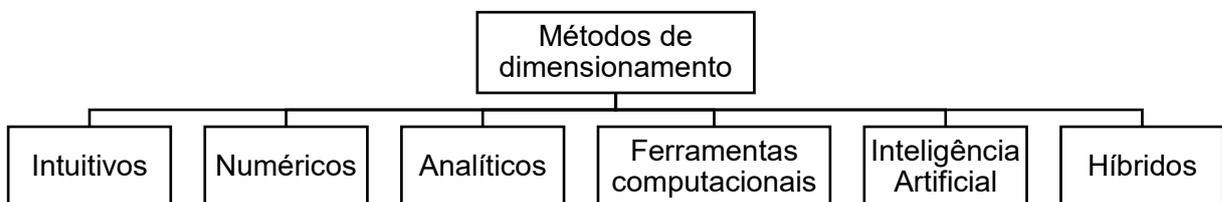
um aspecto desafiador para sistemas de bateria de grande porte (SONG et al., 2022). Considerando os desafios e custos de gerenciamento e montagem de baterias de segunda vida para BESS de grande porte, aplicações de pequena escala podem ser uma boa alternativa de aplicação para baterias de segunda vida (SONG et al., 2022).

2.6 DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS ISOLADOS

O dimensionamento de sistemas fotovoltaicos *off-grid* envolve a avaliação de diversos fatores para garantir que o sistema seja adequado para suprir a demanda energética da aplicação. Dentre esses fatores estão a carga elétrica a ser alimentada, a disponibilidade de radiação solar na região e as características dos equipamentos utilizados, tais como os módulos fotovoltaicos, as baterias e os conversores de energia (DOS SANTOS; DE LIMA, 2022).

Para realizar o dimensionamento, é comum utilizar softwares especializados, como o PVsyst, que auxilia no cálculo da irradiância solar em função do tempo, localização, posicionamento e arranjo dos módulos fotovoltaicos, e na associação em função do acoplamento com o inversor. Essas ferramentas permitem uma visão geral da eficiência do sistema proposto e suas possibilidades práticas, auxiliando o projetista a ter uma visão completa do projeto a ser realizado (DOS SANTOS; DE LIMA, 2022).

Figura 5 - Principais métodos de dimensionamento de sistemas fotovoltaicos *off-grid*.



Fonte: (KHATIB; IBRAHIM; MOHAMED, 2016)

No entanto, existem diversos métodos de dimensionamento, com diferentes níveis de complexidade e aplicações. Os autores (KHATIB; IBRAHIM; MOHAMED, 2016) identificaram e categorizaram os principais métodos para dimensionamento de sistemas *off-grid*, conforme é apresentado na Figura 5.

Segundo os autores, o método intuitivo utiliza cálculos simples, baseados em propriedades médias, tal como potência e eficiência dos componentes e média da irradiação diária. As principais vantagens desse método são a facilidade no entendimento e aplicação para diferentes casos. São muito úteis para prover um dimensionamento estimado ou pré-dimensionamento para ser usado como caso base em simulações. Como desvantagens, podem levar a valores sub ou superdimensionados, ocasionando custos extras ou não atendimento da necessidade final.

No método numérico, são realizadas simulações do sistema com um intervalo de tempo definido, geralmente um período de uma hora ou um dia, e é realizado o balanço de energia a cada intervalo. Em métodos analíticos, os componentes de um sistema fotovoltaico isolado são caracterizados por modelos matemáticos para determinar a viabilidade do sistema. A melhor configuração é avaliada comparando indicadores de desempenho de diferentes configurações. A vantagem do método analítico é que os cálculos de dimensionamento são simples, enquanto a desvantagem é a dificuldade em estimar os coeficientes das equações matemáticas. Métodos analíticos também são usados conjuntamente com métodos numéricos.

Softwares comerciais também são alternativas muito usadas em projetos. Alguns dos principais softwares usados para sistemas off-grid são: PVsyst, HOMER-Pro, IHOGA, TRNSYS, RETscreen e PV.MY. Métodos de inteligência artificial (IA) são usados para superar a indisponibilidade de dados meteorológicos. Tais métodos são capazes de lidar com a flutuação não linear da fonte de energia solar. Por fim, métodos híbridos são formas de superar desvantagens dos métodos anteriores, realizando uma combinação eficaz de dois ou mais métodos diferentes, de forma a obter o resultado ideal para um sistema específico.

2.7 RESUMO DO CAPÍTULO

O levantamento da literatura realizado aponta diversas oportunidades para novos trabalhos e estudos no campo de sistemas de energia off-grid, energia solar fotovoltaica e baterias de íons de lítio de segunda vida. O reaproveitamento de baterias de veículos elétricos para aplicações estacionárias, como sistemas de armazenamento de energia por bateria (BESS), apresenta oportunidades para pesquisas sobre a avaliação, qualificação e gerenciamento de baterias de segunda

vida, incluindo estudos sobre a capacidade restante, estado de saúde (SOH) e aplicação em sistemas de pequena escala, como micro redes e sistemas isolados.

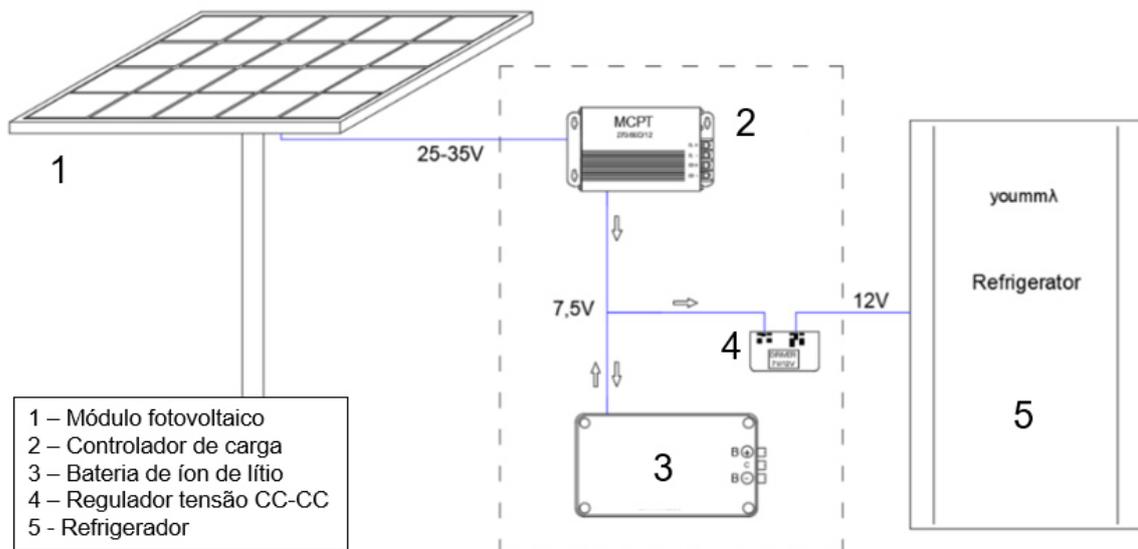
Nesse contexto foram identificados poucos estudos com aplicação para sistemas isolados residenciais, e não foram identificados estudos com aplicação específica para sistema de refrigeração.

3 MÉTODO

3.1 OBJETO DE ESTUDO

Esse trabalho analisou a aplicação de um sistema *off-grid* a partir de dois elementos principais, a bateria de segunda vida de veículo elétrico e um refrigerador de alta eficiência. O sistema *off-grid* estudado é um conjunto formado por um gerador solar fotovoltaico, um controlador de carga eletrônico, módulos de bateria de íons de lítio de segunda vida, um regulador de tensão e um refrigerador para sistemas fora da rede. Um esquema simplificado do sistema em estudo é mostrado na Figura 6.

Figura 6 - Esquema simplificado de sistema fora da rede, incluindo módulo solar fotovoltaico, regulador de carga, bateria de íons de lítio de segunda vida e carga (refrigerador Youmma® de 100 litros)



O módulo solar fotovoltaico converte a irradiação solar e fornece corrente elétrica em Corrente Contínua (CC) em um nível de tensão tipicamente entre 25 e 45 Volts. Um dispositivo eletrônico rastreador de ponto de potência máxima - *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) estabiliza a corrente elétrica e fornece energia em um nível de tensão adequado para operar a carga e carregar as baterias. As baterias de íons de lítio de segunda vida armazenam a energia recebida do controlador CC e alimentam o refrigerador quando não há luz solar. Um regulador elevador de tensão CC-CC aumenta a tensão do nível da bateria (7,5 V) para o nível operacional do refrigerador (12 V).

3.1.1 Baterias

As baterias de íons de lítio usadas foram retiradas de um veículo elétrico Nissan LEAF 2012 (Figura 7). As baterias, fornecidas pela Nissan Automóveis do Brasil Ltda, pertenciam a um dos 25 veículos de um projeto de estudo para uso de veículos elétricos como táxi, no Rio de Janeiro e em São Paulo (LALLI, 2019). Os veículos percorreram um total de 2,2 milhões de quilômetros (média de 88.000 quilômetros por veículo) ao longo dos cinco anos do projeto.

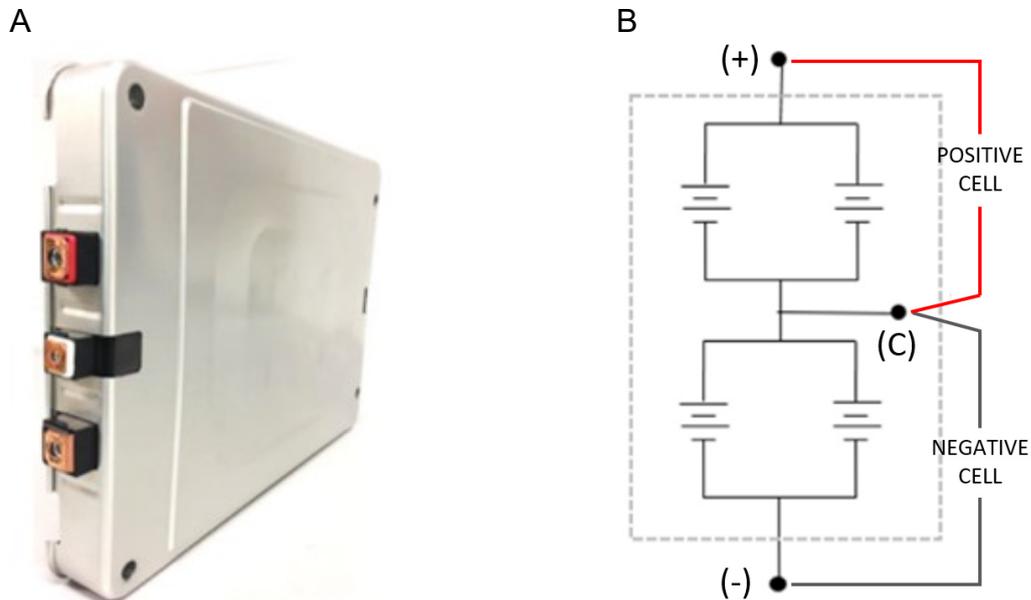
Figura 7 – Da esquerda para direita, apresentação geral do Nissan Leaf, o conjunto de baterias e um dos módulos que compõem o conjunto.



Fonte: Adaptado de AESC, 2018.

O Nissan LEAF 2012 possui um banco de baterias de 24,5 kWh, que resulta em uma autonomia de 160 km no primeiro ano de uso. O conjunto de baterias é composto por 48 módulos ligados em série fornecendo uma tensão de aproximadamente 360 V quando totalmente carregado. Cada um dos 48 módulos de bateria possui uma tensão nominal de 7,4 V e 66 Ah de capacidade. Esses módulos, da fabricante AESC, são constituídos por quatro células de íons de lítio montadas na configuração 2s2p (Figura 8), e que são construídas em formato de bolsa (*pouch*, como mostra a Figura 9) e usam a tecnologia LMO-LNO/GR (cátodo LiMn_2O_4 com LiNiO_2 e ânodo de grafite) (WHITE; THOMPSON; SWAN, 2021).

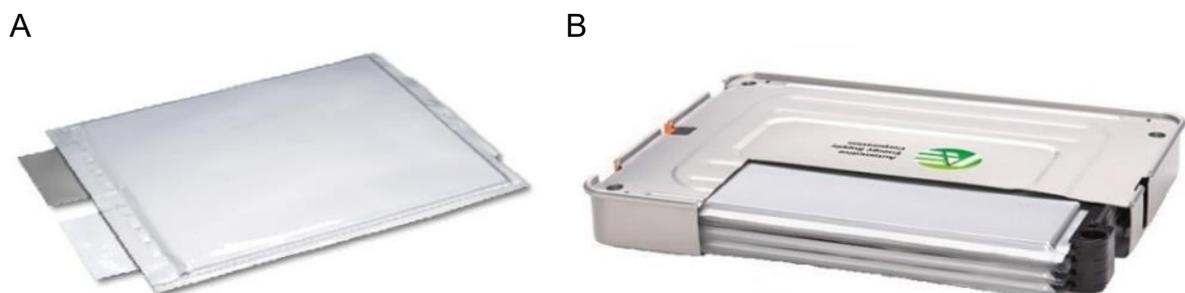
Figura 8 - Vista dos conectores positivo (+), negativo (-) e central (C) do módulo de bateria do Nissan Leaf



Fonte: (BRACO et al., 2020)

Os conjuntos de bateria desses veículos foram recebidos, desmontados e analisados, com medições de resistência interna e *State of Health* (SOH) em laboratório com carga eletrônica (modelo NHR 9430-12). Este procedimento foi realizado pela equipe do laboratório Fotovoltaica/UFSC (HOHMANN; KIRSTEN VIDAL DE OLIVEIRA; RÜTHER, 2022). Este procedimento foi feito em vários módulos dos conjuntos de baterias dos 12 veículos recebidos para teste.

Figura 9 - A: Célula individual tipo bolsa ou *pouch*; B: módulo de bateria com abertura na caixa metálica para mostrar as quatro células internas



Fonte: Adaptado de AESC, 2018

Os resultados mostraram que a capacidade encontrada é bastante heterogênea, com valores de capacidade restante entre os diferentes carros variando

de 52% a 89%. Para o estudo apresentado neste trabalho, foram selecionados três módulos de um mesmo carro, com SOH medido semelhantes, com média de 70,6%, ou seja, perda de capacidade de aproximadamente 30% (29,4%). Dependendo da posição original do módulo de bateria específico no compartimento do piso do carro, diferentes estados de saúde foram medidos, o que pode ser uma consequência direta dos diferentes perfis de temperatura experimentados em diferentes posições dentro do conjunto de baterias do piso do carro. Considerando módulos do mesmo carro, a diferença média de SOH encontrada foi de 11%.

3.1.2 Refrigerador

O refrigerador utilizado é o modelo Nilo 100, da fabricante Youmma, e foi desenvolvido especialmente para aplicações em sistemas *off-grid*. O refrigerador tem um volume interno de 96 L, é alimentado por energia elétrica à tensão de 12 V em corrente contínua (CC), a potência nominal é de 17,8 W e o consumo nominal a uma temperatura ambiente de 32 °C é de 200 Wh/dia, conforme informações da fabricante apresentadas no Quadro 2.

Quadro 2 - Características técnicas do refrigerador.

Característica	Valor
Modelo	Youmma Nilo 100 - DC Solar Fridge 96L
Alimentação	12VCC, amplitude de tensão 9-16VCC Classe III IEC-60445-1.71
Potência nominal	17,8 W
Consumo de energia à temp. ambiente 32°C	< 200 Wh/dia
Temperatura interna nominal	6°C
Tempo de <i>pull down</i> ²	60 minutos
Refrigerante	R600a
Peso	25 kg
Volume interno líquido	96 L
Dimensões (A x L x P)	840 x 474 x 525 mm

Fonte: (YOUMMA, 2019)

Este refrigerador está equipado com um compressor de deslocamento linear, tecnologia com baixo consumo de energia. O compressor linear não possui

² Tempo de *pull down* – tempo para temperatura do ar dentro do refrigerador atingir a temperatura interna nominal, partindo da temperatura do ar ambiente.

mecanismo de manivela como encontrado em um compressor alternativo convencional. Isso permite maior eficiência energética, operação sem uso de óleo e menor tamanho para aplicações em refrigeração por compressão de vapor. Tipicamente um compressor linear consiste em um motor linear (conectado a um pistão) e molas de suspensão, operadas em frequência ressonante (LIANG, 2017). Esse compressor também funciona em conjunto com um inversor de frequência e dessa forma também pode ser considerado do tipo *inverter*.

3.1.2.1 *Ensaio de caracterização do refrigerador*

Para melhor caracterizar o refrigerador, foram utilizados resultados de testes realizados no laboratório POLO/UFSC. A unidade do equipamento usada no experimento foi testada à temperatura ambiente de 16, 25, 32, 38 e 42°C. Os ensaios foram realizados conforme IEC-62552 e em todas as provas o refrigerador foi mantido fechado e sem nenhum material ou líquido na sua parte interna. Os resultados desse ensaio foram disponibilizados para a elaboração desse trabalho.

Tabela 1 - Resultado dos ensaios de caracterização do refrigerador, realizados em laboratório

Temperatura do ar ambiente	16°C	25°C	32°C	38°C	43°C
Consumo de energia [Wh/dia]	53,8	116,9	203,4	309,1	417,6
RTR ³ %	10,9	26,8	47,8	74,1	100,0
Tempo de ensaio [h:min]	07:10	06:17	06:32	06:38	05:49

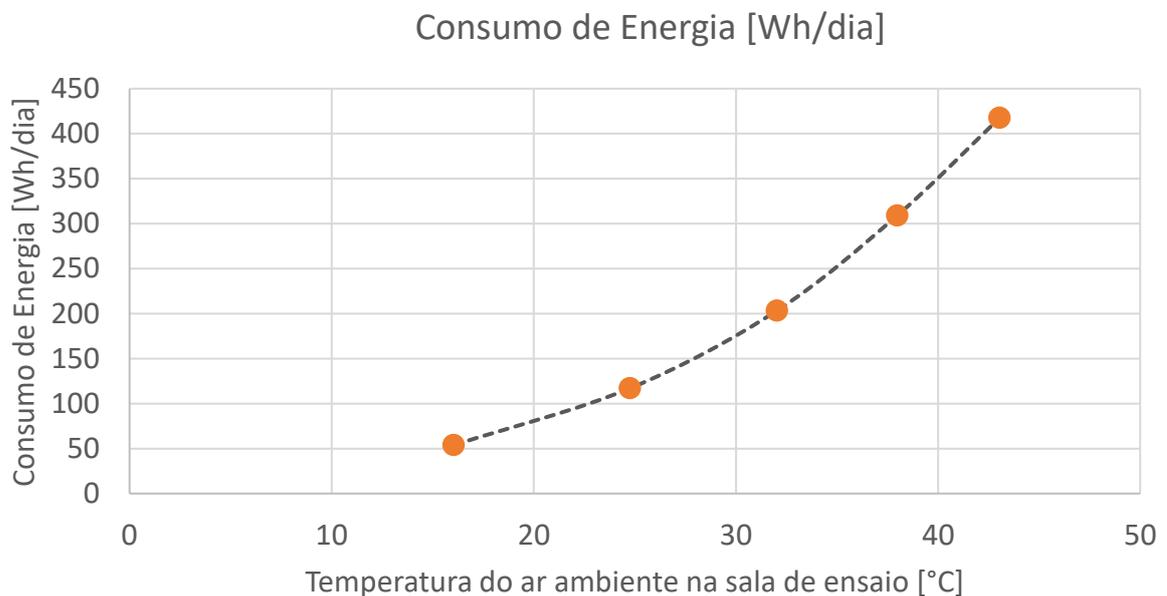
Fonte de dados: Laboratório Polo/UFSC.

Na Tabela 1 e na Figura 10 são apresentados alguns resultados desse ensaio. Observa-se que o consumo aumenta significativamente com o aumento da temperatura do ambiente onde o refrigerador se encontra. Esse consumo pode ser mais facilmente compreendido através do indicador *Run Time Ratio* (RTR), Tabela 1, que representa a razão entre o tempo em que o compressor esteve ligado em relação ao tempo total do ensaio. Observa-se que quanto maior a temperatura externa, mais tempo o compressor fica ligado de forma a manter a temperatura desejada.

³ RTR – *Run Time Ratio*

Também se observa que o resultado à temperatura de 32°C (203,4 Wh/dia) foi um pouco maior que o valor informado pelo fabricante, 200 Wh/dia (Quadro 2). Essa diferença pode ser em decorrência de que a unidade do refrigerador disponibilizada para esse ensaio e para o experimento é uma unidade de testes e que foi utilizada para diversos testes de parametrização, o que pode ter alterado ligeiramente o seu comportamento.

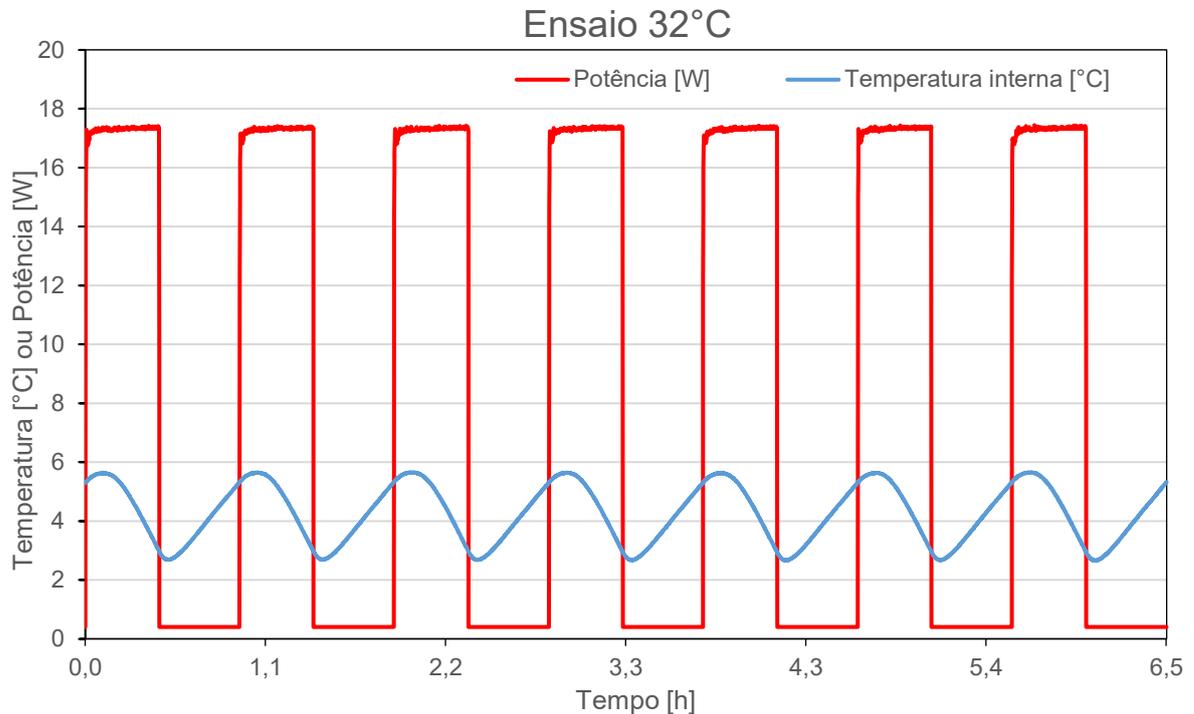
Figura 10 - Resultado dos ensaios de caracterização do refrigerador, realizados em laboratório



Fonte de dados: Laboratório Polo/UFSC.

Refrigeradores equipados com compressores tipo *inverter* são programados para reduzir a frequência, e conseqüentemente o consumo, conforme a temperatura se aproxima da temperatura alvo configurada. Embora o refrigerador em estudo seja equipado com compressor com essa tecnologia, conforme esclarecimento do fabricante, trata-se de um compressor de alta capacidade em um equipamento de pequeno volume e, portanto, a temperatura alvo é atingida mesmo com o compressor na velocidade mais baixa. Dessa forma o compressor se desliga em diversos momentos, e com isso a curva de consumo de energia se assemelha à de um compressor tradicional, conforme pode ser observado na Figura 11.

Figura 11 - Resultado de um ensaio à temperatura de 32°C, onde é traçada a curva de consumo de potência elétrica e temperatura interna do refrigerador.



Fonte de dados: Laboratório Polo/UFSC.

3.1.2.2 Estimativa do consumo de acordo com a temperatura ambiente

Na maioria das abordagens de dimensionamento, um refrigerador doméstico é considerado uma carga constante. O refrigerador funciona por meio de ciclos onde o compressor é ligado e desligado, e o consumo horário é calculado pela média diária. O consumo da geladeira, porém, é uma carga que varia de acordo com a temperatura ambiente e o uso. Dessa forma, a partir dos resultados dos ensaios realizados em laboratório apresentados aqui, foi desenvolvida uma função (Equação) para estimar o consumo diário aproximado de energia elétrica a partir da temperatura do ar ambiente (T_{ar}). Observa-se que essa estimativa só pode ser considerada para valores dentro dos valores mínimo (16°C) e máximo (43°C) ensaiados, conforme é apresentado na Tabela 1. Para temperaturas fora desses limites o consumo pode apresentar outro comportamento.

$$\text{Consumo diário [Wh/dia]} = 0,123 T_{ar}^2 + 2,777 T_{ar} - 10,95 \quad (1)$$

As principais variáveis que influenciam no consumo de energia de aparelhos de refrigeração são a temperatura do ar ambiente (75% a 85%), as interações do usuário (13% a 17%) e o degelo automático ou *frost free* (10% a 11%) (HARRINGTON; AYE; FULLER, 2018). Dentre as variáveis apresentadas, a única que não é simulada em testes de laboratório é a interação com o usuário. Desta forma, conforme estimativas sugeridas na literatura, um fator de aumento de 15% foi considerado como referência para estimá-lo. A temperatura de teste de referência padrão foi de 32°C, conforme IEC62552-3 2015 (IEC, 2015), que é uma temperatura alta para a maioria dos casos; no entanto, pode compensar adequadamente variáveis não testadas, tal como aberturas de portas, carregamento de alimentos, fabricação de gelo e outros recursos não testados contabilizados como interações do usuário (MEIER, 1995). Estas duas referências de estimativa foram consideradas e comparadas.

Para o cálculo teórico do consumo de carga elétrica, foi considerado como carga o conjunto do refrigerador e do regulador de tensão CC-CC (Corrente Contínua). A eficiência do regulador de tensão foi calculada a partir da medição. Para este teste, dez amostras da potência de entrada e saída do regulador foram medidas em intervalos de quatro minutos; a eficiência para cada amostra foi calculada como a razão entre a potência de saída e entrada, e a eficiência média foi considerada para este trabalho.

3.2 PRÉ-DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA

Ao contrário dos sistemas conectados à rede, os sistemas fotovoltaicos isolados não possuem conexão com a rede elétrica. Normalmente, esses sistemas consistem em um gerador fotovoltaico, controlador de carga solar (PWM ou MPPT), armazenamento em bateria e um conversor de energia CC/CC ou inversor CC/CA. O dimensionamento da potência do módulo fotovoltaico e da capacidade da bateria de um sistema autônomo deve considerar vários aspectos, incluindo a disponibilidade de irradiação solar no local, a eficiência elétrica dos componentes, o consumo estimado da carga e a autonomia desejada.

A potência do módulo fotovoltaico P_{PV} em Watt-pico (Wp) pode ser estimada (KHATIB; IBRAHIM; MOHAMED, 2016) conforme apresentado nas Equações (2) e (3), onde são considerados o consumo médio de energia $E_{média,diário}$ (Wh), a eficiência

do sistema η_{System} , a irradiação global diária local no plano do módulo – *Plan of Array* (POA) G_{POA} (Wh/m².day) e a irradiação nas condições padrão de teste - *Standard Test Conditions* (STC) Irr_{STC} (1.000 W/m²). Para endereçar a eficiência do sistema η_{System} neste trabalho, esta é dividida em eficiência da bateria η_{bat} , eficiência do controlador η_{cont} , perdas no módulo FV devido à temperatura f_{temp} , perdas por sujeira sobre o módulo f_{dirt} , perdas por resistência em cabos e componentes elétricos f_{elet} ; e perdas em relação à potência nominal do módulo fotovoltaico f_{PV} tais como perdas por degradação (LID - *Light Induced Degradation*) e perdas por reflexo no vidro (IAM - *Incidence Angle Modifier*) (DAFFALLAH, 2019).

$$P_{PV} = \frac{E_{média,diário} \cdot Irr_{STC}}{\eta_{System} \cdot G_{POA}} \quad (2)$$

$$\eta_{System} = \eta_{bat} \cdot \eta_{cont} \cdot f_{temp} \cdot f_{dirt} \cdot f_{PV} \cdot f_{elet} \quad (3)$$

A capacidade da bateria C_{bat} (Wh) pode ser estimada (KHATIB; IBRAHIM; MOHAMED, 2016) usando a Equação (4), considerando o consumo médio de energia $E_{média,diário}$ (Wh), a autonomia desejada, os Dias de Autonomia – *Days of Autonomy* (DOA), a Profundidade de Descarga (DOD) e a eficiência da bateria η_{bat} .

$$C_{bat} = \frac{E_{média,diário} \cdot DOA}{DOD \cdot \eta_{bat}} \quad (4)$$

Uma estimativa conservadora de dimensionamento deve considerar o pior cenário para toda a operação, levando em conta quaisquer variações sazonais tanto na disponibilidade quanto nas cargas de radiação solar. Para a irradiação diária, deve-se considerar a irradiação do período menos ensolarado do ano (inverno). Porém, como o consumo do refrigerador aumenta com a temperatura do ar ambiente, o pior cenário para o consumo de carga é o período de maior temperatura (verão).

Embora a eficiência elétrica de outros componentes eletrônicos também possa variar ao longo do ano, conforme variação da temperatura ou outros fatores, estas foram consideradas constantes para este estudo. O dimensionamento foi realizado para cada mês do ano, considerando a irradiação média e o consumo de carga de acordo com a temperatura ambiente média do local, de acordo com os valores coletados do banco de dados publicado no Atlas Brasileiro de Energia Solar

2ª edição (PEREIRA et al., 2017). O mês mais crítico será usado para dimensionar o sistema.

3.3 SIMULAÇÃO

O sistema foi simulado com o uso do software PVsyst 7.1, que é uma ferramenta de simulação que permite a análise de desempenho de um sistema fotovoltaico. O sistema em análise foi parametrizado conforme componentes utilizados no experimento, selecionados a partir do pré-dimensionamento e levando em consideração os componentes disponíveis para uso. Os parâmetros utilizados na simulação estão apresentados no Quadro 3. O azimute de 60° foi utilizado para priorizar a exposição ao sol até as 13h00, visto que o sistema é sombreado no período da tarde. A fonte de dados de irradiação solar utilizada foram as médias mensais em Wh/m² para o local do experimento (Sapiens Parque, Canasvieiras, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil), extraídas do Atlas Brasileiro de Energia Solar versão 2017.

Quadro 3 - Parâmetros utilizados para simulação.

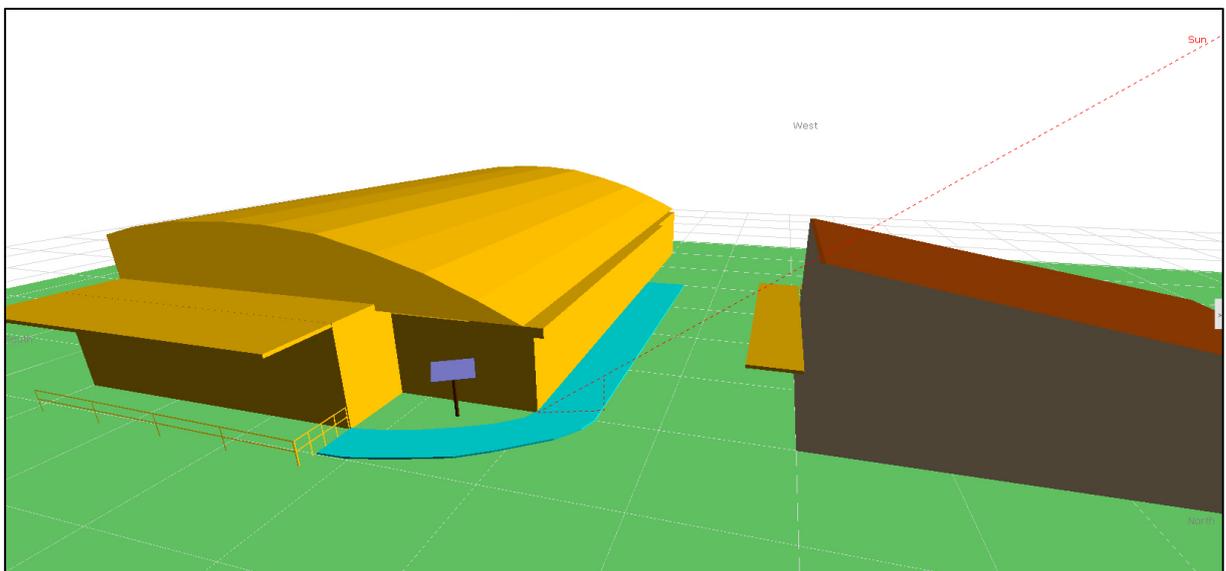
	Parâmetro	Valor
Fonte dados meteorológicos	Meteo File	Florianopolis_Atlas_brasileiro 2017 quadrante 3085
Localização		Florianópolis, SC
Orientação	Inclinação	27.0°
	Azimute	-60.0°
	Tipo fixação	Fixo
Cargas	Valor mensal	Conforme Tabela 2
Módulo FV	Especificação	255Wp 256 V Si-Poli YL255P-29b
	Módulos em série	1
	Módulos em paralelo	1
Controlador	Especificação	MPPT converter universal
Bateria	Especificação	3.7V 32Ah Li-NMC Lithium-ion
	Células em série	2
	Células em paralelo	6
Backup		Nenhum
Sombreamento		Conforme modelagem

3.3.1 Análise de sombreamento

Com o uso do software PVsyst também foi realizado uma análise de sombreamento do sistema, visto que no local disponibilizado para instalação do experimento, o módulo fotovoltaico fica sombreado durante uma parte do dia. A modelagem foi realizada com base nas dimensões dos principais elementos construtivos ao redor do local onde está instalado o módulo fotovoltaico, conforme é apresentado na Figura 12.

Essa simulação analisa sombreamentos produzidos por objetos próximos, que desenham sombras visíveis no módulo fotovoltaico. O tratamento de sombreamentos próximos é complexo e somente pode ser feito com uma descrição detalhada em três dimensões de todo o sistema fotovoltaico e seu ambiente. Esta é uma operação complexa de simulação que o *software* PVsyst viabiliza e o fato de haver sombreamento no sistema traz maior complexidade e incerteza na análise (PVSYST, 2023a).

Figura 12 - Modelagem no PVsyst para simulação do sombreamento sobre o módulo.



3.3.2 Parametrização do consumo da carga

Para essa simulação, optou-se por considerar a carga com valor variável a cada mês, visto que esse é um recurso disponível no *software*. A estimativa do

consumo do refrigerador a cada mês foi realizada com base na Equação , de acordo com a média temperatura do ar ambiente externo para a localidade (CLIMATE ONEBUILDING, 2022), na eficiência do regulador de tensão (73%) e em uma majoração de 15%, referente a interações com o ambiente e consumos do sistema de refrigeração não identificados no ensaio de laboratório (HARRINGTON; AYE; FULLER, 2018). Dessa forma, foi definida uma carga de consumo diário médio para ser utilizada na simulação, apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Consumo diário estimado da carga para sistema localizado em Florianópolis.

Mês	Temperatura ar ambiente externo [°C]	Consumo diário estimado [Wh/dia]
Jan	25.2	216,3
Fev	25.4	219,1
Mar	24.6	207,8
Abr	22.6	180,8
Mai	19.6	143,1
Jun	17.8	122,1
Jul	16.7	109,9
Ago	17.7	121,0
Set	18.7	132,4
Out	20.8	157,7
Nov	22.4	178,1
Dez	24.4	205,0

3.3.3 Parametrização da bateria de segunda vida

Para a parametrização dos módulos de bateria de segunda vida, foi feita a inclusão de um novo modelo personalizado à biblioteca de equipamentos do PVsyst. Para a inclusão de um novo modelo, diversos parâmetros da bateria devem ser incluídos no *software*, os quais foram levantados no *datasheet* do fabricante da célula (GEEPOWER, [s.d.]). A caracterização como segunda vida da bateria foi feita com a redução da capacidade da bateria em 30%, conforme apresentado na seção 3.1.1 - Baterias. Os parâmetros da bateria são apresentados na Figura 13. A bateria foi parametrizada como um elemento contendo apenas uma célula. Na configuração do arranjo da bateria no projeto, foi então considerado a configuração de seis células em paralelo e duas em série, totalizando as 12 células contidas no experimento, sendo

quatro células (duas em série e duas em paralelo), em cada um dos três módulos de bateria.

Figura 13 - Parametrização da bateria de segunda vida no software PVsyst (continua na página seguinte).

Basic data Detailed model parameters Graphs Sizes and Technology Commercial data

Model Nissan_leaf_2nd_life_cell Manufacturer AESC
 File name Nissan_leaf_2nd_life_cell.BTR Data source Manufacturer
 Custom parameters definition

Technology Lithium-ion, LMO Whole battery Per element
 Category Pouch cell

Basic parameters

Nb of cells in Series/in parallel 1 1
 Nominal voltage 3.7 V/cell.
 Capacity at C10 23.00 Ah
 Internal resistance @ ref. temp. 5.00 mΩ
 Reference temperature 20.0 °C
 Coulombic efficiency 90.0 %

Behaviour at limits

Charge Cut-Off Voltage 4.2 V/cell.
 Discharge Cut-Off Voltage 2.7 V/cell.
 Maximum charging current 64.0 A
 Maximum discharging current 192.0 A
 Minimum charging temperature -20.0 °C
 Minimum discharging temperature -30.0 °C

Full battery Indicators

Stored energy at DOD 95 % 82.0 Wh
 Total stored energy (566 cycles) 46 kWh
 Specific energy 146 Wh/kg
 Specific weight 7 kg/kWh

Info : Renormalization to C10

Datasheet Nominal Capacity 32.5 Ah
 Defined for a discharging rate of 3.30 Hours
 =>Corresp. C10 acc. to Peukert model 33.2 Ah

Basic data Detailed model parameters Graphs Sizes and Technology Commercial data

Description AESC, Nissan_leaf_2nd_life_cell Whole battery Per element

Open circuit voltage

Open circuit voltage vs SOC Profile Default
 Voltage at SOC = 50% 3.900 V/cell
 Slope (SOC = 0 to 1) 600.0 mV/cell

Self-discharge

Self-discharge vs temperature Profile
 Self-discharge current at 20°C 2.68 mA
 Self discharge monthly loss 7.1 %/month

Capacity

Capacity vs Discharge rate Profile
 Peukert coefficient 1.020
 Capacity vs Temperature Profile

End of charge: resistance increase

Internal resistance vs SOC Profile
 SOC beg. of the exp. increase 90.0 %

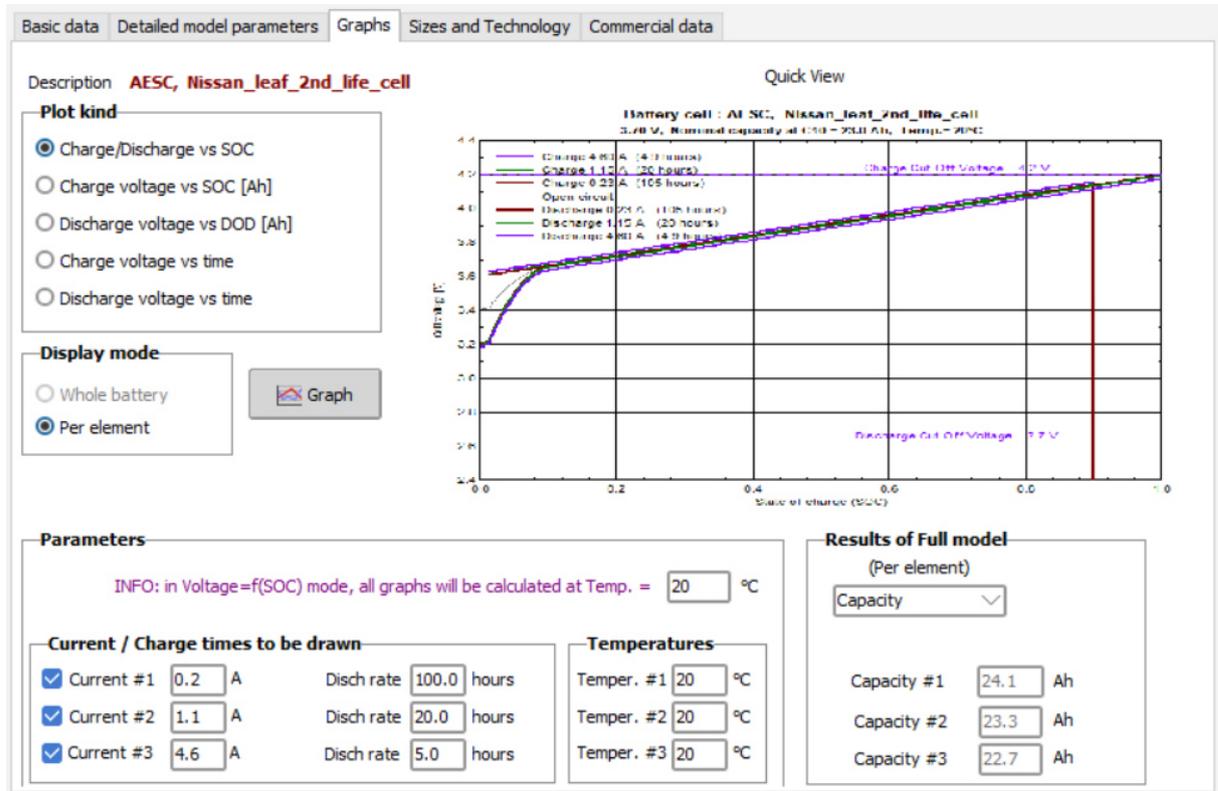
Internal Resistance temperature factor

Internal resistance vs T°C Profile
 Activation energy 45 kJ/Mol

Lifetime

Static lifetime at 20°C 5.0 years
 Lifetime vs depth of discharge Profile

Figura 13 (Continuação).



3.4 EXPERIMENTO

O sistema estudado foi implementado em um experimento real, que consiste em um módulo solar fotovoltaico, um controlador de carga eletrônico, módulos de bateria de íons de lítio de segunda vida, um regulador de tensão e um refrigerador para sistemas fora da rede. Um esquema simplificado do experimento foi apresentado na Figura 6.

3.4.1 Equipamentos utilizados no experimento

O módulo fotovoltaico utilizado é do tipo silício multicristalino, 60 células inteiras, com potência nominal de 255Wp, modelo Yingli YGE_YL255P (Figura 14). O controle da energia gerada pelo módulo fotovoltaico é realizado através de um controlador de carga com MPPT (Figura 15), e de um *Battery Management System* (BMS), que controla o carregamento e a tensão de cada célula, foi implementado através de um controlador eletrônico dedicado para o experimento, do fabricante

Unitron®. O refrigerador é apresentado na Figura 16 e a configuração completa é mostrada na Figura 17.

Figura 14 – Módulo fotovoltaico P-Si 255Wp.



Figura 15 – Controlador de carga MPPT.



Figura 16 – Refrigerador Youmma Nilo 100.



Figura 17 - Visão geral do experimento. Ao fundo (área externa), o módulo solar fotovoltaico e a caixa fixada ao poste, onde se encontram o controlador de carga, as baterias, o BMS e o conversor elevador de tensão CC-CC. Na frente (área interna), o refrigerador de 100 L.



Figura 18 - Visão ampliada da caixa fixada ao poste, com o controlador eletrônico, as baterias, o BMS e o conversor elevador de tensão CC-CC.



O experimento foi instalado no Centro de Pesquisa e Capacitação em Energia Solar da UFSC (laboratório Fotovoltaica/UFSC, www.fotovoltaica.ufsc.br), localizado no Sapiens Parque no município de Florianópolis, Santa Catarina. Os materiais foram financiados pelo projeto de pesquisa (Título: “Estudos sobre novos conceitos de sistemas de refrigeração para aplicações domésticas e comerciais”, FEESC, SIGPEX: 201820529) e a instalação foi realizada pelo autor em conjunto com a equipe de pesquisadores do laboratório.

Para esse experimento, foi instalado um poste metálico, de dois metros de altura, com um suporte para fixação de um módulo fotovoltaico, com regulagem de inclinação e azimute. Fixado ao poste há uma caixa metálica com isolamento para proteger os equipamentos internos da água e poeira. Dentro da caixa ficam instalados os controladores de carga, as baterias, o regulador de tensão e sensores de corrente, tensão e temperatura, conforme é apresentado na Figura 18. Uma instalação subterrânea leva os cabos até a parte interna do edifício. Na parte interna, foi instalado

o refrigerador e o sistema de aquisição de dados. A descrição detalhada de cada componente do sistema é apresentada no Quadro 4.

Quadro 4 – Lista de equipamentos do experimento.

Quantidade	Descrição
1	Refrigerador 100L 12VCC 18W. Modelo: Youmma Nilo 100
1	Módulo fotovoltaico P-Si 255Wp. Modelo Yingli YGE_YL255P
3	Bateria íons de lítio 7.5VCC 500Wh. Modelo Nissan Leaf Gen1
1	Controlador de carga MPPT. Modelo Unitron MCPT 270/60D/12
1	Regulador elevador CC-CC 7.5VCC/12VCC. Fabricante Unitron

Com o objetivo de medir o consumo do refrigerador em situação de uso mais próxima do real, ele foi utilizado para refrigerar água para consumo, sendo aberto cerca de uma a duas vezes por dia para retirar e repor garrafa de água, sendo caracterizado como perfil de consumo leve. Observa-se que não houve uma rotina específica para essas atividades de consumo, o que, embora não tenha um impacto grande, é uma fonte de incerteza ao resultado.

3.4.2 Instrumentação

Um sistema de instrumentação dedicado ao experimento foi desenvolvido e implementado para medir e registrar os dados desejados para a análise experimental. Esses dados são: energia gerada, consumida e armazenada; temperaturas dentro do refrigerador, no ambiente externo (onde está localizado o módulo fotovoltaico) e dentro da edificação (onde está localizado o refrigerador). Não foi instalado sensoriamento de umidade do ar.

A aquisição e o armazenamento dos dados foram realizados por um equipamento *data logger* Campbell Scientific® CR1000X. Todas as medidas foram realizadas com intervalo de um segundo e, a seguir, foram calculadas as médias de um minuto. Os dados foram adquiridos do *data logger* através da rede local do laboratório. O período de medição utilizado para esse trabalho foi de 12 meses.

3.4.2.1 Medição de energia elétrica

Os dados de energia elétrica são a energia gerada pelo gerador solar fotovoltaico, a energia consumida pela carga (refrigerador) e a energia armazenada e fornecida pelas baterias. Para identificar todos os fluxos de energia, o sistema foi dividido em três partes e os fluxos de energia foram medidos em suas interfaces. Assim, o sistema foi dividido em:

- a) PC (Painel-Controlador): módulo solar fotovoltaico e controlador de carga. Esse subsistema representa a energia gerada e flui sempre no sentido de alimentar o sistema. Por convenção possui apenas valores positivos.
- b) BAT (Bateria): três módulos de bateria de íons de lítio em paralelo. Esse subsistema representa a energia armazenada ou consumida pelas baterias; dessa forma pode fluir em dois sentidos. Quando o sentido é em direção às baterias (carregando a bateria), o sinal adotado é negativo. Quando o sentido é em direção à carga (descarregando a bateria), o sinal adotado é positivo.
- c) LOAD (Carga): regulador de tensão 12V e geladeira de 100L. Esse subsistema representa a carga principal e flui sempre no sentido do refrigerador, ou seja, de consumir a energia. O sinal adotado é o negativo.

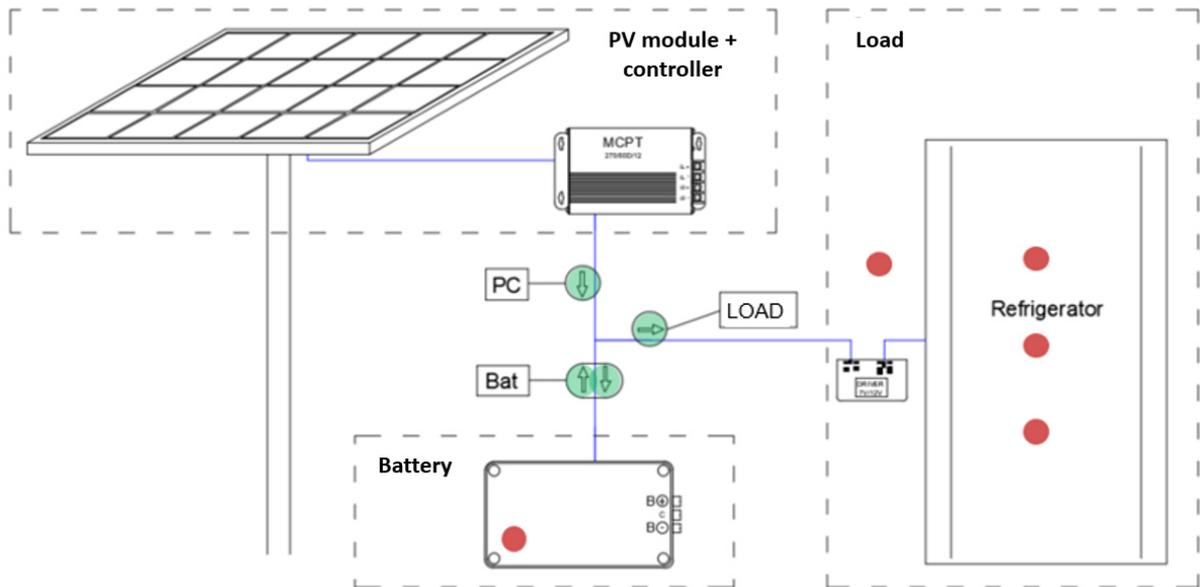
A medição de energia foi realizada na fronteira dos três subsistemas, conforme mostrado na Figura 19. A corrente elétrica (i) é medida em três pontos (PC, BAT e LOAD), utilizando um resistor *shunt* de 0,01 ohm em linha com o circuito. A queda de tensão é medida pelo resistor *shunt*. A tensão elétrica (V) é medida usando um divisor de tensão de proporção 10:1 e é medida em apenas um ponto, visto que os três pontos de medição de corrente estão no mesmo nível de tensão. A energia elétrica (P) é calculada pelo *data logger* de acordo com a Lei de Ohm (Equação 5) e os valores de energia elétrica (Wh) podem ser calculados integrando os valores de energia elétrica (W) medidos ao longo do tempo.

$$P = V * i \tag{5}$$

No Quadro 5 são apresentadas as grandezas medidas pelo experimento. Observa-se que a corrente elétrica é medida nos três pontos onde se deseja obter a potência,

enquanto a tensão elétrica CC é coletada apenas em um ponto, por ser um valor comum entre eles.

Figura 19 - Posicionamento dos sensores da instrumentação no experimento. Sensores de sinal elétrico em verde, sensores de temperatura em vermelho.



Quadro 5 - Medidas coletadas no experimento.

Item	Medida	Unidade
Controlador	Corrente elétrica CC	A
	Potência (calculada)	W
Bateria	Tensão CC	V
	Corrente elétrica CC	A
	Potência (calculada)	W
	Temperatura da bateria	°C
Refrigerador	Corrente elétrica CC	A
	Potência (calculada)	W
	Temperatura prateleira superior	°C
	Temperatura prateleira intermediária	°C
	Temperatura prateleira inferior	°C
Sala	Temperatura da sala	°C
Estação	Irradiância	W/m ²
	Temperatura ambiente externa	°C

3.4.2.2 Medição de temperatura e irradiância

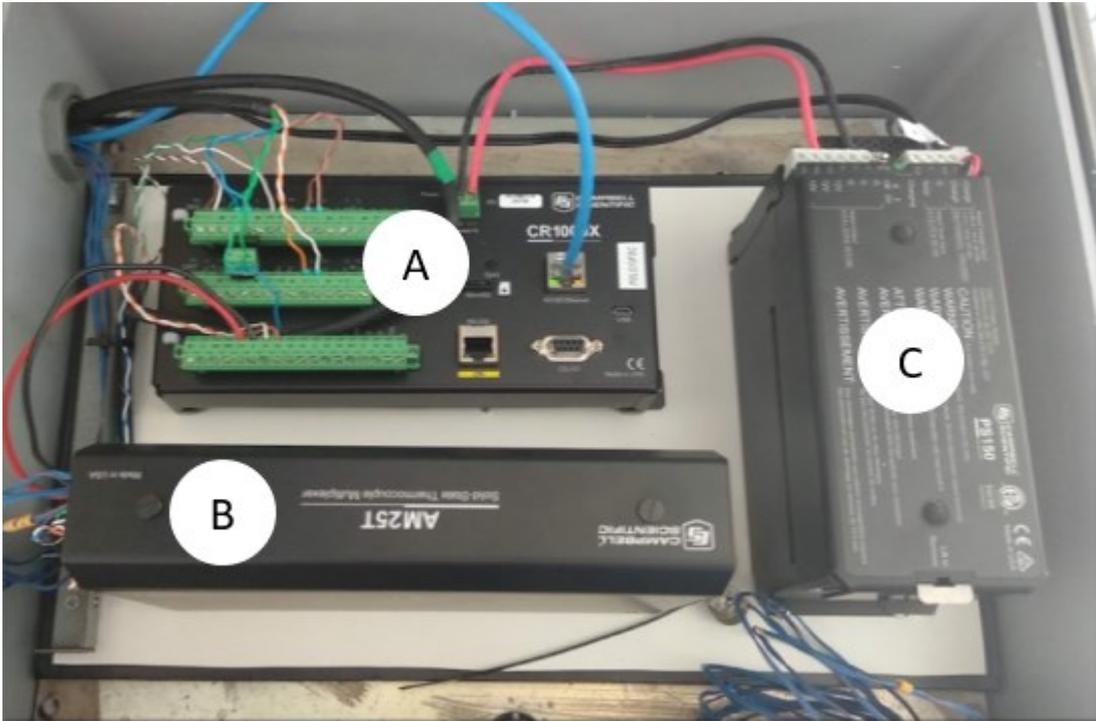
As medições de temperatura foram feitas utilizando sensores termopares tipo T (Cobre-Costantan), conectados ao *datalogger* através de um multiplexador de termopares, de forma a permitir a medição de várias temperaturas usando apenas um canal do *datalogger*. Os termopares foram instalados em cinco pontos diferentes: três dentro do refrigerador (partes superior, intermediária e inferior), um na sala e um conectado à bateria, dentro da caixa de postes na área externa do laboratório, conforme Figura 19.

A irradiância solar e a temperatura externa foram medidas na estação de medição de radiação solar classe BSRN (*Baseline Surface Radiation Network*) instalada no laboratório. A irradiância solar é coletada usando um piranômetro Kipp & Zonnen® SMP22. A temperatura do ar externo foi medida usando um sensor de temperatura e umidade. No Quadro 6 são apresentados os detalhes dos equipamentos e sensores utilizados na instrumentação deste experimento e na Figura 20 é apresentada uma visão geral da instalação do *datalogger*, multiplexador de termopares e fonte.

Quadro 6 - Lista e detalhes dos equipamentos e sensores utilizados na instrumentação do experimento

Equipamento	Fabricante/modelo	Quantidade
Divisor de tensão 10/1	Campbell Scientific® VDIV10.1	1
Resistor <i>shunt</i>	Ohmite 15FR010E 0.01ohm 5W 1%	3
Termopar tipo T	Omega	6
<i>Datalogger</i>	Campbell Scientific®CR1000X	1
Multiplexador de termopar	Campbell Scientific®AM25T	1
Fonte com bateria	Campbell Scientific®CH150	1
Piranômetro	Kipp & Zonen® SMP22	1
Sensor de Temperatura e umidade	PTB110	1

Figura 20 - Instrumentação para aquisição de dados: A – *Datalogger*, B – Multiplexador de termopares, C – Fonte 12V com bateria.



3.4.2.3 Monitoramento

O experimento foi conectado à rede e configurado para monitoramento remoto dos dados coletados, através do *software* LoggerNet® 4.5 da Campbell Scientific. O *software* permite coleta dos dados gravados no *datalogger* e monitoramento em tempo real através de painel personalizável.

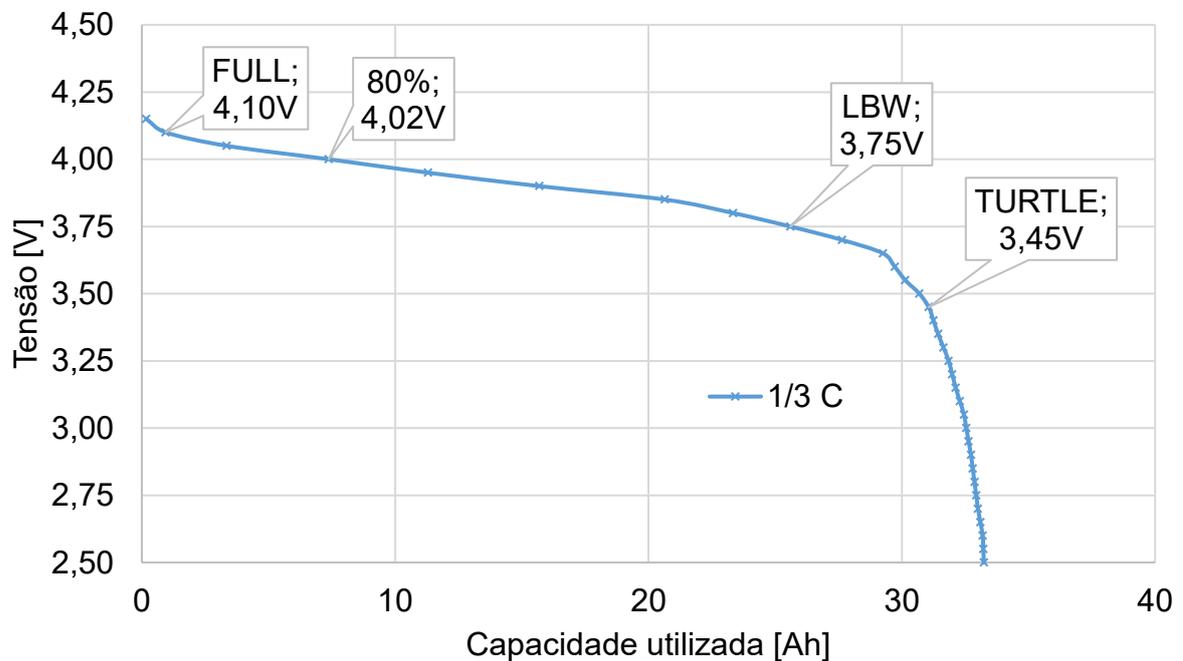
3.4.3 Processamento dos dados

O experimento foi realizado durante um período de 12 meses sem intervenções. Os dados coletados durante esse período foram analisados usando o *software* LoggerNet® 4.5 e ViewPro® 4.2 da Campbell Scientific e o Microsoft Excel®. A partir dos dados coletados, o comportamento do sistema foi analisado por meio de gráficos de linha, com valores das variáveis ao longo do tempo e identificação de valores médios, máximos e mínimos para as variáveis medidas.

O SOC da bateria foi estimado com base nas medições de tensão. Para tanto, deve-se medir a tensão em circuito aberto (UL HASSAN et al., 2022), pois as tensões

de carregamento ou da carga impactam na resistência da bateria e, conseqüentemente, na tensão medida nos terminais da bateria. No entanto, medir frequentemente a tensão de circuito aberto não foi viável neste experimento. Assim, esta análise foi realizada considerando os períodos sem alimentação de carga (período noturno: 21h – 04h) e com o compressor desligado (potência de carga medida do refrigerador menor que 1,5 W), que é o mais próximo do estado de circuito aberto viável para medição.

Figura 21 - Características de capacidade de tensão da célula para diferentes correntes de descarga (25°C)



Fonte: Adaptado de (AESC, 2018)

O perfil de descarga da célula da bateria foi usado para comparar a tensão medida e estimar o SOC. Os dados numéricos foram recuperados do sistema usando o Web Plot Digitizer (ROHATGI, 2023). Foi utilizado a técnica de tabela de consulta (*Lookup table*) para estimar o SoC com base na tensão medida. A curva 1/3C foi utilizada por ser o perfil que melhor representa o perfil de carga deste experimento. Os níveis críticos apontados na Figura 21 são: *Full* (4,10 V), 80% (4,02 V), *LBW Low Battery Warning* (3,75 V) e modo *Turtle* ou economia de bateria (3,45 V).

3.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados da simulação e do experimento foram avaliados com base nos seguintes indicadores:

- a) Energia produzida pelo gerador fotovoltaico, mensal e anual;
- b) Energia consumida pelo refrigerador (carga), mensal e anual;
- c) Média diária do consumo do refrigerador, em Wh;
- d) Coeficiente de Desempenho ou *Performance Ratio* (PR)

Indicador de desempenho que se refere à relação entre a energia efetivamente produzida (usada), em relação à energia que seria produzida se o sistema estivesse funcionando continuamente com sua eficiência nominal STC. Em sistemas isolados, a energia produzida é a energia fotovoltaica efetivamente entregue ao usuário (carga) e pode ser definido conforme a Equação (6) (PVSYST, 2023b).

$$PR = \frac{\text{(Energia fornecida à carga)}}{\text{(Irradiação Global Horizontal) * (Potência nominal do sistema)}} \quad (6)$$

- e) LLP – *Loss of Load Probability*;

A probabilidade de perda de carga (*Loss of Load Probability* - LLP) indica com que frequência um sistema não é capaz de atender a demanda de carga ou, em outras palavras, representa o percentual médio de carga não atendido pelo sistema. É definido como a razão entre o déficit total de energia e a demanda total de carga durante um período específico de tempo (KHATIB; IBRAHIM; MOHAMED, 2016). LLP pode ser expresso conforme a Equação (7), onde $DE(t)$ é o déficit total de energia não atendida e $P_{carga}(t)$ é a demanda de energia total no período.

$$LLP = \frac{\sum_t^T DE(t)}{\sum_t^T P_{carga}(t)\Delta t} \quad (7)$$

4 RESULTADOS

4.1 RESULTADOS DO DIMENSIONAMENTO

Para o dimensionamento do gerador fotovoltaico, foi necessário estimar valores para o consumo de energia $E_{média,diário}$, a eficiência geral do sistema η_{system} e a irradiação global diária local no plano do módulo G_{POA} . Com relação ao consumo de energia do refrigerador, foram consideradas a temperatura do ar ambiente de 32°C e o consumo de energia calculado com base na temperatura do ar ambiente média mensal para fins de comparação. A eficiência do regulador de tensão CC-CC medida foi de 73%.

As eficiências individuais consideradas para o cálculo geral do sistema são: eficiência da bateria 90% (AUSFELDER et al., 2017); eficiência do controlador de carga MPPT 90%; perdas em relação à potência nominal do módulo fotovoltaico (IAM e LID) de 5%; Fator de perda de sujeira (*soiling*) 5%; Perdas por temperatura 8%; Perdas ôhmicas em cabos e componentes elétricos 2% (DAFFALLAH, 2019); Observa-se que o local de instalação do experimento é sombreado pelo telhado da edificação, de forma que o módulo é sombreado a partir das 13h00. Dessa forma foi estimado uma perda por sombreamento de 45%. Uma estimativa mais aproximada foi realizada através da simulação no software PVsyst na seção seguinte e será comparada. A eficiência para o resultado do sistema off-grid é de 28%, altamente impactada pelas perdas de sombreamento do edifício ao lado do experimento. Observa-se que para o cálculo da eficiência não é considerado a eficiência do módulo, ou seja, a referência (eficiência 100%) considera a capacidade nominal de geração do módulo.

As médias mensais para a irradiação global diária no plano do módulo (POA) para o local (Florianópolis, Longitude -48,449; Latitude -27,4005) foram coletadas (PEREIRA et al., 2017) e são apresentadas na Tabela 3, juntamente com o tamanho do módulo FV calculado para cada mês, com uso da Equação 2, para dois cenários, ambos considerando as perdas do regulador de tensão: (a) considerando a temperatura média do ar ambiente de 32°C (consumo diário 279 Wh), com uso da Equação 1, os resultados mostram o maior tamanho de módulo FV (276 Wp) para o mês de julho, devido à menor disponibilidade de irradiação; (b) considerando a temperatura média do ar ambiente mensal com fator de aumento, os resultados

mostram o maior tamanho (142 Wp) para o mês de fevereiro, devido ao maior consumo do refrigerador. Embora a temperatura do ar ambiente de 32°C seja bastante acima da média do mês mais quente (25,4°C em fevereiro), optou-se por considerar o dimensionamento mais conservador para o experimento, sendo assim um módulo fotovoltaico de 255Wp (potência disponível) foi usado.

Tabela 3 - Dimensionamento do módulo fotovoltaico de acordo com a irradiação global diária média no plano do módulo e da temperatura do ar ambiente.

Mês	Irradiação global diária no plano do módulo [Wh/m².day]	Temperatura do ar média mensal [°C]	Potência do gerador fotovoltaico para 32°C [Wp]	Potência do gerador fotovoltaico para temperatura média [Wp]
Jan	5387	25,2	183	142
Fev	5430	25,4	182	142
Mar	5186	24,6	190	141
Abr	4590	22,6	215	139
Mai	4062	19,6	243	124
Jun	3570	17,8	276	121
Jul	3641	16,7	271	107
Ago	4210	17,7	234	101
Set	4003	18,7	246	117
Out	4429	20,8	223	126
Nov	5257	22,4	188	120
Dez	5345	24,4	184	135

Para o dimensionamento da capacidade da bateria, o consumo de energia $E_{médio,diário}$ (Wh) foi considerado o mesmo apresentado anteriormente para o módulo fotovoltaico, a autonomia desejada, *Days of Autonomy* (DOA), é de dois dias, a Profundidade de Descarga (DOD) é de 80% conforme o nível *Low Battery Warning* indicado pelo fabricante (Figura 21) e a eficiência da bateria η_{bat} é de 90%. Considerando esses parâmetros, a capacidade estimada da bateria é de 776Wh. Como o SOH medido das baterias selecionadas é de 70,6%, estima-se que cada módulo tenha capacidade restante de 353Wh (capacidade de segunda vida). Com isso, três módulos de baterias foram instalados em paralelo, proporcionando

autonomia estendida de aproximadamente 2,7 dias (1 kWh), tendo em vista também que uma das possíveis aplicações pensadas para o sistema de refrigeração é o armazenamento de vacinas durante campanhas de vacinação em áreas remotas como a região da Amazônia.

4.2 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

A simulação foi realizada considerando um sistema localizado no município de Florianópolis (Longitude -48,449; Latitude -27,4005), para o período de um ano completo, conforme dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar 2017. Os parâmetros de orientação do arranjo fotovoltaico, consumo da carga, configuração do sistema (módulo fotovoltaico, baterias, controlador de carga), parâmetros de eficiência e perdas, sombreamento e demais detalhes são apresentados na seção 3.3 do Método.

Os resultados da simulação apontam que o sistema é capaz de produzir 240,6 kWh de energia por ano, das quais apenas 60,5 kWh são efetivamente utilizados considerando o consumo da carga. Dessa forma, 172,8 kWh não são utilizados e acabam sendo perdidos, visto que, quando as baterias já se encontram carregadas, não há para onde despachar a energia já que o sistema não é conectado à rede. Esse resultado indica que o sistema possui capacidade ociosa considerável, podendo ser complementado com outras cargas que possam atender as necessidades do usuário.

Os principais fatores de perda identificados na simulação e apresentados na Tabela 4 são as perdas por sombreamento (29,1%), perdas por temperatura da célula fotovoltaica (5,2%), perdas na conversão de energia (11,0%) e perdas na bateria (10,9%). O fator apontado como maior perda (69,4%) é na verdade ocasionado pela falta de carga, ou seja, sobra energia que poderia alimentar outras cargas que possam atender as necessidades do usuário. Esse resultado indica que o sistema possui capacidade ociosa considerável e que poderia atender, além de um refrigerador, outras cargas domésticas úteis tais como uma televisão, carregadores USB e iluminação LED.

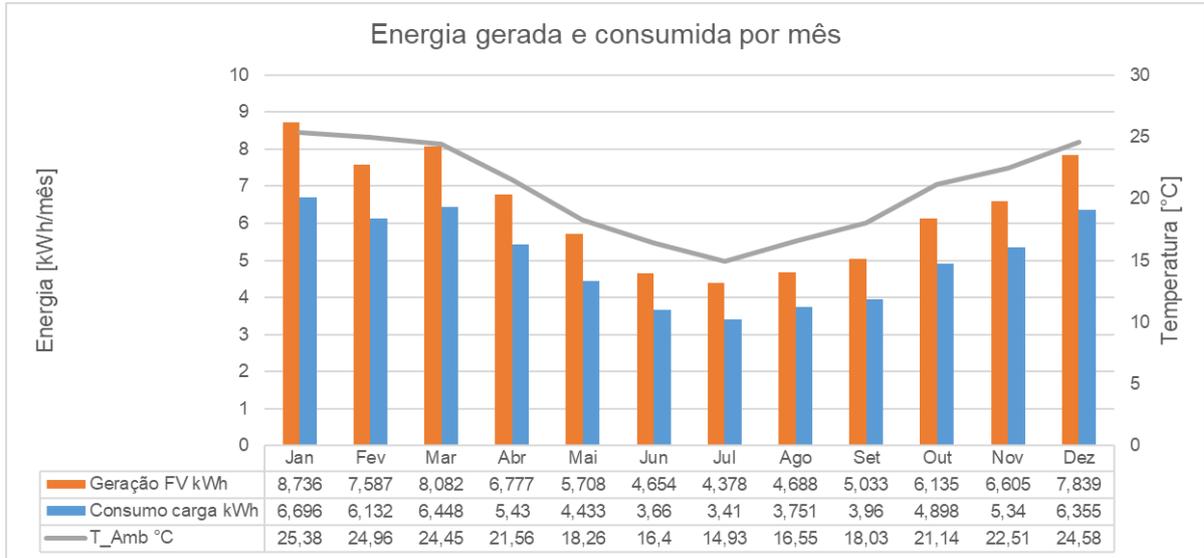
A eficiência global do sistema (*Performance Ratio* – PR) na simulação realizada é de 15,2%. Tal eficiência pode ser considerada muito baixa e é impactada especialmente pelo sombreamento e pela energia não utilizada. A questão do sombreamento é uma característica específica desse projeto, visto que foi o local disponibilizado dentro das instalações do laboratório. O fato do módulo ser sombreado

durante todo o período da tarde contribui para demonstração da robustez da solução, visto que a energia gerada poderia ser maior se o módulo pudesse ser exposto ao sol durante todo o dia. A questão da energia subutilizada indica que há energia de sobra e que o sistema consegue absorver maiores cargas.

Tabela 4 – Demonstrativo de resultado de energia utilizada no sistema, identificadas na simulação no PVsyst, com apresentação de ganhos e perdas. A tabela apresenta, de cima para baixo, as perdas e ganhos em cada elemento considerado no processo, desde a irradiação solar disponível no plano horizontal, até a efetiva energia utilizada no sistema.

Descrição	Tipo de operação	Valor	Resultante anual	Unidade
Irradiação global horizontal			1549,3	kWh/m ²
Irradiação no plano do módulo	Ganhos	0,90%	1563,2	kWh/m ²
Perdas por Sombreamento	Perdas	-29,12%	1108,1	kWh/m ²
Perdas por IAM (reflexão)	Perdas	-0,91%	1098,0	kWh/m ²
Irradiação efetiva no plano do módulo			1098,0	kWh/m ²
Área total de células fotovoltaicas	Multiplicador	1,6 m ²	1782,5	kWh
Energia nominal gerada pelos módulos (eficiência @STC)	Multiplicador	15,70%	279,9	kWh
Perdas devido ao nível de irradiação (menor que 1000W/m ²)	Perdas	-1,56%	275,5	kWh
Perdas por temperatura	Perdas	-5,25%	261,0	kWh
Ganhos devido qualidade do módulo	Ganhos	0,75%	263,0	kWh
Perdas por <i>mismatch</i>	Perdas	-2,10%	257,5	kWh
Perdas por resistência elétrica	Perdas	-3,28%	249,0	kWh
Energia não utilizada	Perdas	-69,4%	76,3	kWh
Perdas na conversão de energia	Perdas	-11,0%	67,9	kWh
Perdas por tensão insuficiente para acionamento do conversor	Perdas	-0,12%	67,9	kWh
Perdas na bateria	Perdas	-10,9%	60,5	kWh
Energia final utilizada			60,5	kWh

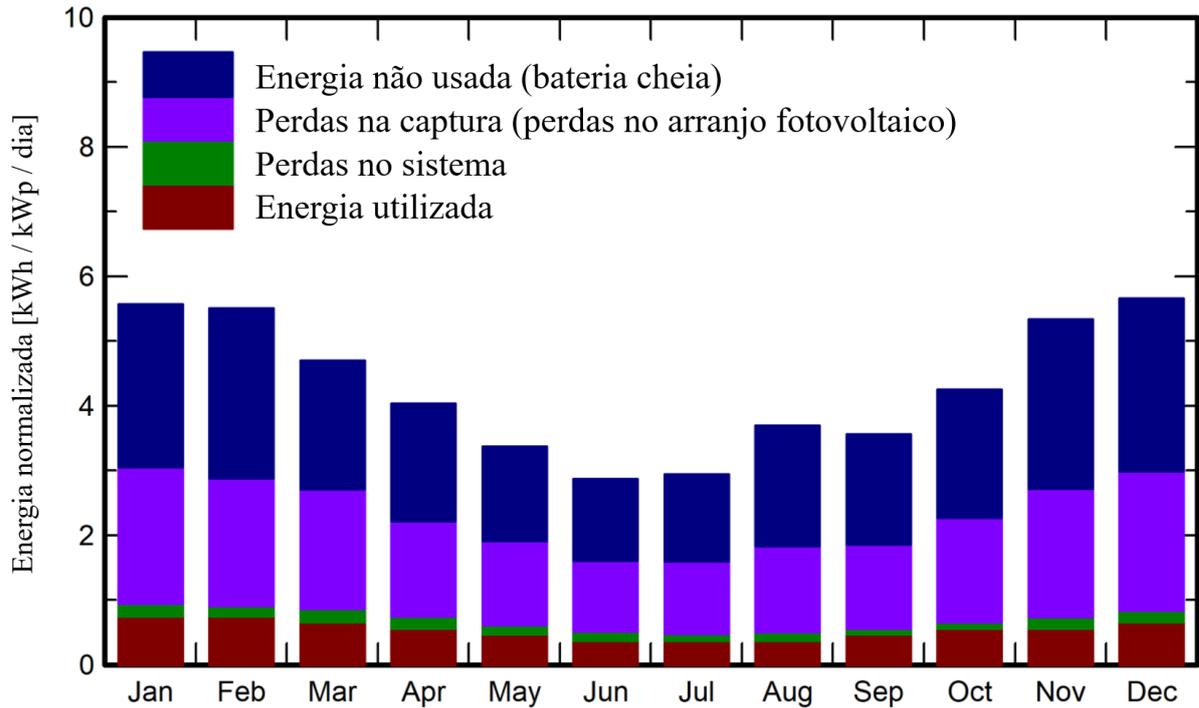
Figura 22 - Resultados da simulação para geração total de energia, consumo e temperatura do ar ambiente média.



A geração de energia acompanhou o consumo ao longo dos meses do ano. Nos meses de inverno, com temperatura mais baixa, espera-se menor consumo do refrigerador, e o contrário é observado nos meses de verão. A geração de energia acompanhou o consumo tanto nos meses de inverno como verão (Figura 22). A probabilidade de perda de carga (LLP) resultante apresentada pelo PVsyst foi de 0,0%, o que indica que o sistema tem alta capacidade de atender a demanda configurada.

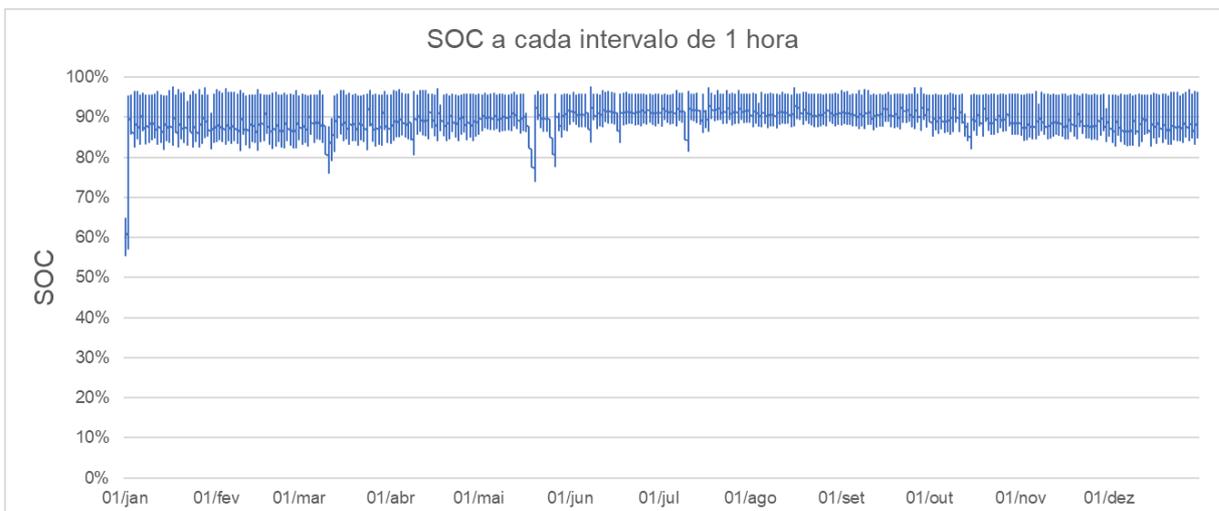
Ao analisar o potencial total de energia ao longo dos meses do ano (Figura 23) observa-se que há maior energia excedente disponível nos meses de verão. Apesar do maior consumo de energia pelo refrigerador, a maior disponibilidade de recurso solar excede a demanda da carga oferecendo maior energia total disponível.

Figura 23 - Potencial de energia a cada mês do ano com principais componentes de perda de energia.



Ao analisar o comportamento da bateria, observa-se que o estado de carga (SOC) da bateria se manteve em níveis elevados durante todo o período de simulação. Poucas ocorrências abaixo de 80% do nível de carga foram identificadas, principalmente nos meses de inverno (Figura 24).

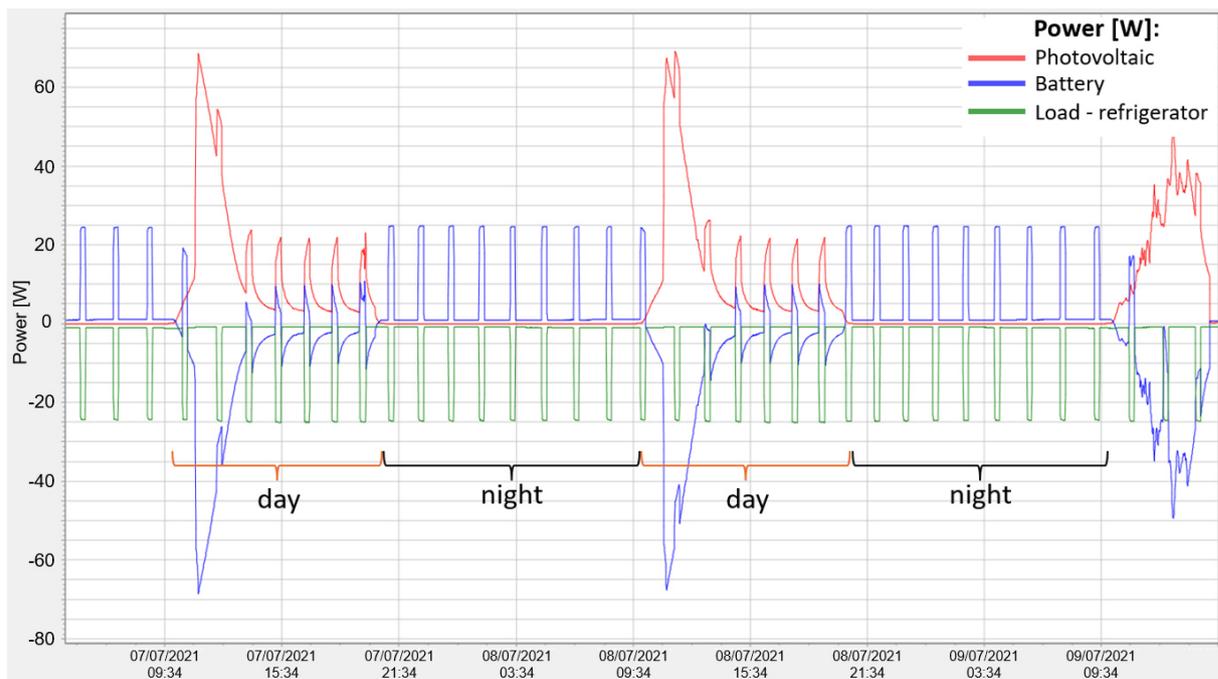
Figura 24 - Estado de carga (SOC) da bateria durante todo o período de simulação.



4.3 RESULTADOS DO EXPERIMENTO

A partir dos dados coletados no experimento, foi possível observar o comportamento do fluxo de energia elétrica no sistema. Os dados foram compilados e analisados por meio de análises gráficas e indicadores. A energia gerada pelo módulo solar fotovoltaico carrega as baterias ao longo das primeiras horas de sol. A partir do momento em que as baterias já estão carregadas, há uma redução na geração de energia fotovoltaica, conforme a Figura 25. Por ser um sistema isolado *off-grid*, ou seja, não há rede elétrica para escoar a energia, só há geração de energia quando há consumo pela carga (geladeira) ou para carregamento das baterias.

Figura 25 - Perfil do fluxo de energia elétrica do sistema experimental: geração de energia solar (vermelho), carga e descarga da bateria (azul) e consumo do refrigerador (verde).



O perfil mostrado na linha verde (Figura 25) é típico de um refrigerador com compressor tradicional, onde o equipamento desliga quando a temperatura interna atinge o *setpoint* e liga novamente quando a temperatura sobe. Esse não é o perfil típico de um compressor *inverter*, mas ele possui essas características, segundo o fabricante, devido à programação do compressor e ao pequeno volume do refrigerador, de forma que o ar interno atinge a temperatura mínima de resfriamento mesmo com o compressor na rotação mínima e, portanto, é desligado pelo sistema

de controle. O perfil de carga tem valores negativos, o que significa que a energia está sendo retirada do sistema.

O perfil da energia da bateria (linha azul) apresenta valores negativos e positivos. Os valores negativos indicam instantes em que a bateria é uma carga para o sistema, ou seja, a bateria está sendo carregada. Valores positivos indicam que a bateria está fornecendo energia para a carga (refrigerador), ou seja, está se descarregando. Durante a noite, o perfil da bateria é praticamente espelhado ao consumo do refrigerador, o que indica que toda a energia está sendo fornecida pela bateria. Durante o dia, a bateria e o sistema fotovoltaico (linha vermelha) fornecem energia simultaneamente. Durante boa parte do dia, a geração fotovoltaica consegue suprir a demanda do refrigerador e carregar a bateria ao mesmo tempo. Nos horários em que a incidência de radiação solar é menor, o consumo do refrigerador é parcialmente suprido pelas baterias.

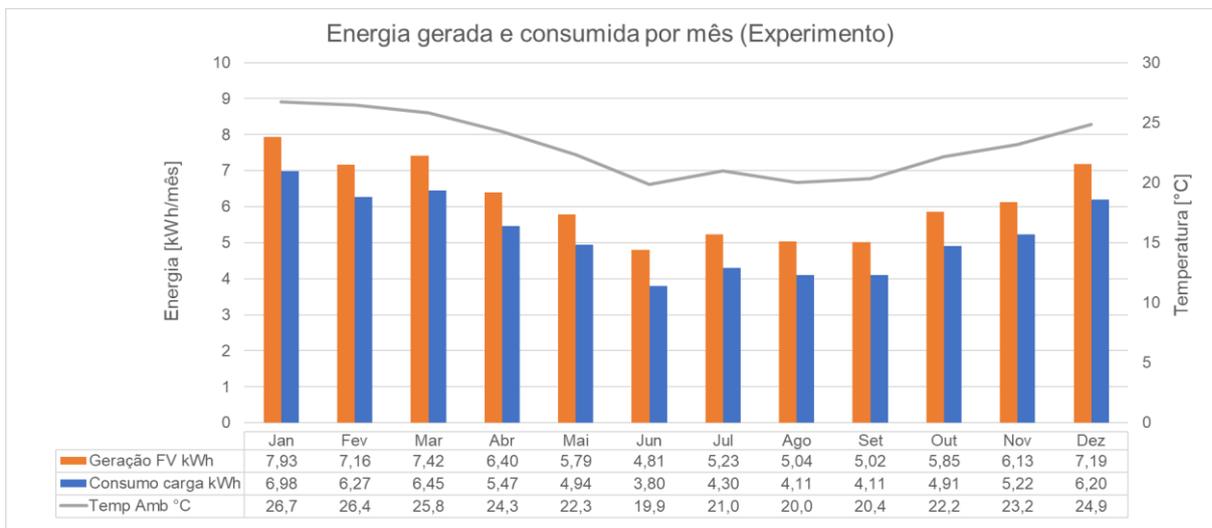
Tabela 5 - Valores médios mensais de temperatura do refrigerador, temperatura da sala e consumo diário médio do refrigerador.

Mês	Temperatura refrigerador (média dos 3 pontos) [°C]	Temperatura do ar na sala [°C]	Consumo diário [Wh]
01/2022	4,7	26,7	225,0
02/2022	4,8	26,4	223,8
03/2022	5,2	25,8	208,2
04/2022	5,5	24,2	182,3
05/2022	5,5	22,3	159,3
06/2022	5,9	19,9	126,8
07/2022	5,9	21,0	138,5
08/2022	5,9	20,0	132,5
09/2022	5,9	20,3	136,9
10/2022	5,7	22,2	158,2
11/2022	5,6	23,2	174,1
12/2022	5,1	24,9	199,9
Média Anual	5,5	23,08	172,1

Ao observar o desempenho do sistema ao longo de um ano, verificou-se que o consumo de energia do refrigerador é variável e dependente da temperatura ambiente (Tabela 5 e Figura 26). Considerando que o refrigerador estava carregado com garrafas de água e com perfil de uso leve, a variação do consumo se deve principalmente à variação da temperatura do ambiente. Ao comparar os meses de

janeiro/22 (Verão no Brasil) e junho/22 (Inverno no Brasil), é possível observar uma redução de 45% no consumo de energia e 39% na geração de energia fotovoltaica (Figura 26). Observa-se que o posicionamento do módulo também interfere na diferença de geração entre inverno e verão, visto que este é fixo na mesma posição para o ano todo. O maior consumo nos meses de verão gera uma maior demanda das baterias, que devem atender o maior consumo do refrigerador em noites quentes e dias nublados e quentes.

Figura 26 - Comparação de geração e consumo de energia e temperatura do ar no ambiente interno pelo período de 12 meses (janeiro/22 – dezembro/22)



Para fins de análise de valores anuais (Tabela 6 e Tabela 7), foi considerado o período de 01/01/2022 a 31/12/2022. A energia gerada pelo sistema Painel-controlador foi de 74,0 kWh, sendo que a energia consumida pelo refrigerador foi de 62,7 kWh. A energia total utilizada para carregamento da bateria foi de 49,9 kWh e a energia fornecida pela bateria para a carga foi de 38,7 kWh. Observa-se que uma parte da energia gerada (11,2 kWh) não foi efetivamente consumida pela carga. Esse valor refere-se à diferença entre a energia utilizada para carregar a bateria e a energia efetivamente fornecida pela bateria para a carga.

Tabela 6 - Valores mensais de energia medidos no experimento, considerando 12 meses.

Mês	Energia FV gerada [Wh]	Consumo refrigerador [Wh]	Energia carregamento [Wh]	Energia descarregamento [Wh]
01/2022	7.933,5	6.976,4	4.991,3	4.034,1
02/2022	7.159,3	6.267,6	4.555,4	3.663,7
03/2022	7.422,4	6.453,4	4.999,6	4.030,7
04/2022	6.400,6	5.470,6	4.369,2	3.439,2
05/2022	5.793,5	4.937,6	4.112,1	3.256,2
06/2022	4.807,9	3.804,5	3.542,5	2.539,2
07/2022	5.235,0	4.295,1	3.761,2	2.821,3
08/2022	5.039,5	4.106,6	3.632,1	2.699,1
09/2022	5.022,9	4.109,7	3.510,5	2.597,3
10/2022	5.852,3	4.905,7	4.017,2	3.070,6
11/2022	6.129,6	5.222,2	3.906,3	2.998,9
12/2022	7.185,0	6.195,8	4.503,5	3.514,3
Anual (soma)	73.981,4	62.745,2	49.900,8	38.664,6

Tabela 7 - Resultados anuais do experimento

Variável	Valor	Unidade
Temperatura dentro do refrigerador (média)	5,5	°C
Temperatura do ar da sala (média)	23,1	°C
Energia total gerada (soma)	74,0	kWh
Energia total consumida pelo refrigerador (soma)	62,7	kWh
Energia usada para carregamento da bateria (soma)	49,9	kWh
Energia fornecida pela bateria (soma)	38,7	kWh
Perda de energia (soma)	11,2	KWh

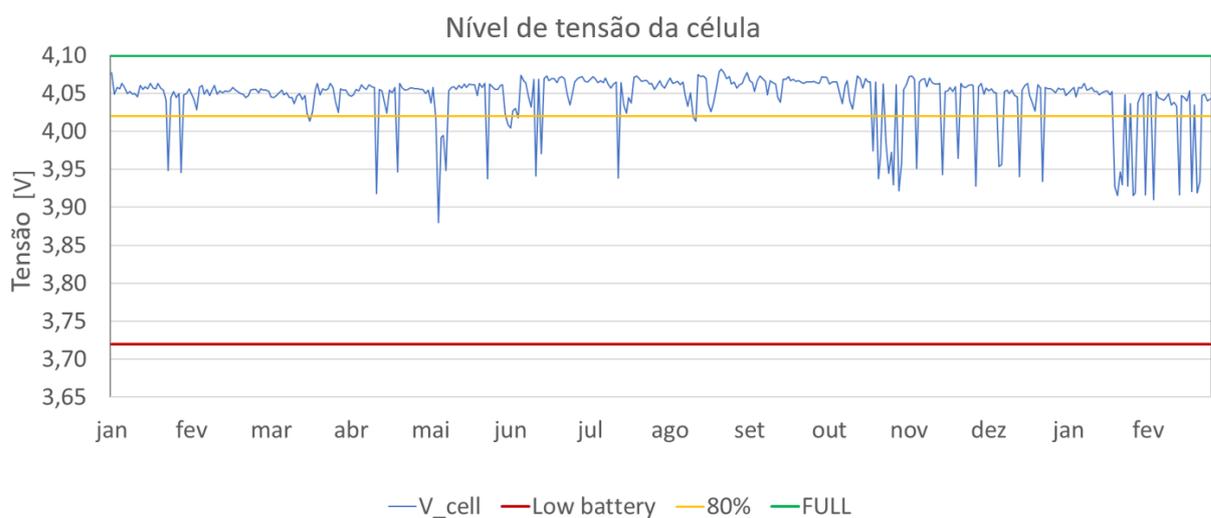
A diferença de energia de entrada e saída da bateria foi utilizada para definir um valor de eficiência do conjunto de bateria nesse sistema (Tabela 8). A eficiência global da bateria foi medida como 77,2%, valor abaixo do valor de referência de 90% considerado no dimensionamento.

Tabela 8 - Eficiência da bateria a cada mês e média anual.

Mês	Eficiência da bateria
01/2022	80,8%
02/2022	80,4%
03/2022	80,6%
04/2022	78,7%
05/2022	79,2%
06/2022	71,7%
07/2022	75,0%
08/2022	74,3%
09/2022	74,0%
10/2022	76,4%
11/2022	76,8%
12/2022	78,0%
Anual	77,2%

O nível de tensão das células da bateria foi avaliado em períodos de menor interferência (durante a noite e com o compressor desligado), para que a tensão medida seja a mais próxima de uma tensão de circuito aberto, ou seja, da tensão real da célula. Considerando essas medições, ao longo dos 12 meses medidos (Figura 27), a tensão das células manteve-se em níveis bastante seguros.

Figura 27 - Nível mínimo de tensão atingido pelas células da bateria para cada dia.



Em geral, até outubro/22, o nível mínimo de tensão atingido pelas células a cada dia permaneceu em torno ou acima de 80% de SOC (4,02 V), com queda em alguns dias, mas ainda acima do nível de 3,90 V. A partir de outubro/22, valores de tensão abaixo de 4,02 V foram observados com maior frequência.

Para identificar se o módulo fotovoltaico e o sistema de bateria atenderam a carga sem interrupção, indicador conhecido como *Loss of Load Probability* (LLP), foram considerados como não atendimento à carga os instantes em que dois eventos ocorressem de forma simultânea: a) temperatura medida igual ou maior a 8°C e b) compressor desligado. Considerando essas condições, não foi encontrado nenhum evento em que o sistema não tenha podido atender a demanda de carga. Com isso, o *Loss of Load Probability* (LLP) para o experimento foi de 0%, indicando que a demanda de carga foi totalmente satisfeita (KHATIB; IBRAHIM; MOHAMED, 2016).

Tabela 9 - PR mensal e anual do experimento.

Mês	PR
01/2022	21,3%
02/2022	17,5%
03/2022	25,8%
04/2022	26,5%
05/2022	18,9%
06/2022	21,9%
07/2022	20,7%
08/2022	15,6%
09/2022	17,8%
10/2022	15,5%
11/2022	14,2%
12/2022	16,4%
Anual	19,3%

Para análise do coeficiente de desempenho (PR) foram considerados os dados de irradiação global horizontal medidos com o piranômetro na estação solarimétrica, os dados de geração obtidos do experimento e a potência-pico nominal do sistema, conforme Equação (6). Os valores de PR foram obtidos para cada mês e para o ano, sendo que a PR para 12 meses de janeiro a dezembro de 2022 foi de 19,3%, conforme apresentado na Tabela 9.

5 DISCUSSÃO

5.1 COMPARATIVO ENTRE RESULTADOS DA SIMULAÇÃO E EXPERIMENTO

Os resultados da simulação apontam que, embora o sistema seja altamente impactado pelo sombreamento a que é exposto no período da tarde (perdas de 29,1%) há uma sobra significativa de energia, o que é observado a partir do indicador de perdas por bateria cheia (172,8 kWh), que equivale a 2,8 vezes a energia efetivamente consumida pela carga, que era apenas o refrigerador. Outras perdas relevantes são relacionadas à temperatura do módulo, controlador de carga e baterias.

Os resultados para consumo da carga simulados se mostraram próximos aos valores identificados no experimento (Tabela 10). O consumo anual simulado foi de 60,5 kWh enquanto o valor medido foi de 62,75 kWh, uma diferença de -3,6%. Ao analisar os valores mensais, observou-se maiores diferenças nos meses de maio (-10,3%) e julho (-20,7%). Vale ressaltar que a simulação foi realizada para um ano genérico com base nos dados de irradiação solar para a localidade de Florianópolis inseridos no software, os quais foram coletados do Atlas Brasileiro de Energia Solar 2ª edição, o que explica as diferenças maiores em alguns meses.

Tabela 10 - Comparativo de resultados de simulação e do experimento para consumo mensal do refrigerador.

Mês	Consumo refrigerador		Diferença
	[kWh/mês]		
	Simulação	Experimento	
Jan	6,70	6,98	-4,0%
Fev	6,13	6,27	-2,2%
Mar	6,45	6,45	0,0%
Abr	5,43	5,47	-0,7%
Mai	4,43	4,94	-10,3%
Jun	3,66	3,80	-3,7%
Jul	3,41	4,30	-20,7%
Ago	3,75	4,11	-8,8%
Set	3,96	4,11	-3,6%
Out	4,90	4,91	-0,2%
Nov	5,34	5,22	2,3%
Dez	6,36	6,20	2,6%
Ano	60,51	62,75	-3,6%

Observa-se que em uma situação de perfil de consumo do refrigerador com maior demanda, ou seja, com mais aberturas de porta e carga internas, um fator de segurança de até 17% pode ser usado para maximizar o valor do consumo do refrigerador.

Com relação aos valores de energia gerada pelo arranjo fotovoltaico, não foi possível realizar uma comparação direta, visto que os dados exportados pelo sistema do PVsyst não foram compatíveis com os dados medidos no experimento. O PVsyst apresenta o valor de energia que poderia ter sido gerado e as perdas por falta de demanda (bateria cheia), enquanto os dados medidos consideram apenas a energia efetivamente gerada, ou seja, não há energia gerada enquanto a bateria está cheia.

Assim, a melhor forma de realizar a análise é através do coeficiente de desempenho (PR). A PR considera a energia disponível (irradiação global horizontal) e a energia efetivamente utilizada pela carga. Toda a diferença entre elas entra no cálculo da perda e reduz a PR do sistema. Na Tabela 11 são apresentados os valores de PR a cada mês e a média anual. A PR simulada foi de 15,4% enquanto o valor medido no experimento foi de 19,3%. Esses valores de PR são considerados baixos, ainda que o valor típico para sistema isolados, cerca de 55 a 65%, seja bem menor do que é considerado para sistemas conectados à rede, onde é comum coeficientes de performance de 75-80%.

Tabela 11 - Comparativo de resultados de simulação e do experimento para PR.

Mês	Simulação	Experimento
Jan	15,2%	21,3%
Fev	15,4%	17,5%
Mar	18,0%	25,8%
Abr	18,7%	26,5%
Mai	16,8%	18,9%
Jun	16,4%	21,9%
Jul	16,0%	20,7%
Ago	12,8%	15,6%
Set	13,2%	17,8%
Out	15,5%	15,5%
Nov	12,4%	14,2%
Dez	15,0%	16,4%
Ano	15,4%	19,3%

Diferenças maiores são identificadas em alguns meses, tal como em janeiro, março, abril, junho e julho. Observa-se que os dados de entrada (irradiação solar e temperatura ambiente) são de bases de dados que representam um ano típico para a localidade. No entanto não representam necessariamente o ano em que foi realizado o experimento, e por isso, estão sujeitos a diferenças em seus resultados.

Os valores de PR para esse sistema são bastante afetados pela perda de energia por falta de demanda e sombreamento. Esse pode ser considerado um ponto positivo ao se considerar esse sistema para outras localidades. A questão do sombreamento pode ser facilmente resolvida ao selecionar um local distante de objetos que possam gerar sombra. Caso não seja possível, esse projeto demonstra que ainda assim o sistema pode funcionar, embora gere um pouco menos energia. A questão das perdas por bateria completamente carregada é, de fato, uma oportunidade para que outras cargas possam ser conectadas e alimentadas pelo sistema.

Ao considerar o indicador de probabilidade de perda de carga (LLP), tanto os resultados da simulação quanto os dados medidos indicam probabilidade muito baixa (menor que 0,01%) de que o sistema não consiga atender a demanda de energia.

5.2 DESEMPENHO GERAL DO SISTEMA

A partir dos resultados apresentados, observou-se que o sistema conseguiu atender a demanda de consumo do refrigerador com sobra de energia. As baterias conseguiram atender a demanda em dias nublados e foram recarregadas pelo módulo nos dias seguintes. Um aspecto importante para o bom desempenho foi o refrigerador de baixíssimo consumo e alta eficiência. O modelo utilizado é de alto desempenho, projetado para o mercado *off-grid*, e seu consumo médio (203 Wh) a 32°C é 62% menor que a média do segmento (533 Wh) (INMETRO, 2022). Esses aparelhos costumam ser mais caros (EFFICIENCY FOR ACCESS, 2019) devido a componentes específicos e menor produção quando comparados aos aparelhos comuns, mas seu desempenho no consumo de energia justifica o custo extra.

Embora este projeto *off-grid* com alimentação em corrente contínua possa tirar proveito da ausência de inversores, que consomem energia, os componentes de controle de energia usados no experimento não são eficientes e podem ser melhorados para atingir um nível semelhante ao do refrigerador e das baterias. O

controlador de carga MPPT (*Maximum Power Point Tracker*) para módulo fotovoltaico e controle de baterias tem uma eficiência nominal de 90% conforme rotulado pelo fabricante. No entanto, os inversores de sistemas fotovoltaicos domésticos modernos são frequentemente encontrados com eficiência acima de 98%. O regulador de tensão CC-CC, usado para elevar a tensão da bateria para 12 V para uso no refrigerador apresentou eficiência de 73%, o que também é baixo.

Evidentemente, este é o retrato do conjunto de equipamentos usados para este experimento e pode não ser o melhor caso. No entanto, esta situação demonstra que a disponibilidade de equipamentos auxiliares será um importante aliado às aplicações de baterias de segunda vida. O uso da segunda vida das baterias de veículos elétricos depende não apenas da qualidade da bateria, mas também do equipamento auxiliar para implementá-las com segurança em uma nova finalidade. Equipamentos comerciais para uso fora da rede são comumente projetados para aplicações com baterias de chumbo-ácido e não atendem aos requisitos para uso com baterias de íons de lítio. Mesmo equipamentos já projetados para baterias comerciais de íon-lítio podem não ser compatíveis, pois as baterias de VE possuem arranjos e modelos bastante variados. É necessário o desenvolvimento e comercialização de equipamentos auxiliares.

5.3 AUMENTO DA CARGA E OUTRAS FUNCIONALIDADES PARA O SISTEMA

Conforme identificado na simulação e consolidado no experimento, o sistema apresenta sobra de energia suficiente para alimentar outras cargas. Tais cargas podem ser equipamentos alimentadas por corrente contínua, tais como carregadores USB para dispositivos portáteis, lâmpadas de LED e lanternas, televisões, rádios e até mesmo painéis elétricos. Conforme é apresentado na Figura 3 na seção 2.1, esses são equipamentos típicos de um Solar Home System, e o uso de refrigerador somente é considerado em sistema de maior capacidade.

O carregamento de um aparelho celular, por exemplo, consome cerca de 15 Wh (menos de 10% do consumo do refrigerador) e é de grande utilidade para uma residência sem acesso à rede. Equipamentos com alimentação em corrente contínua já são desenvolvidos especificamente para uso em sistema isolados, com eficiências recordes. Televisões com consumo menor que 10 W e lâmpadas de até 3W são realidade e podem ser adicionados a sistemas como o apresentado nesse trabalho.

Organizações como a GOGLA - *Global Off-Grid Lighting Association* e iniciativas a *Global Leap Awards*, que busca premiar equipamentos *off-grid* de alta eficiência, e a VeraSol, que fornece informações de qualidade e certificação de produtos *off-grid*, ajudam a incentivar a expansão desse tipo de solução e o desenvolvimento de novos produtos para esse mercado.

5.4 DESAFIOS NA APLICAÇÃO DE SEGUNDA VIDA DE BATERIAS DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

O uso de segunda vida de baterias de íon de lítio provenientes de veículos elétricos representa uma oportunidade de atender a demanda por armazenamento de energia para uso em sistemas isolados em comunidades sem acesso à rede elétrica, e ao mesmo tempo fornecer uma solução para ampliação do uso das baterias desses veículos antes do seu descarte ou destinação final. A aplicação prática desse conceito mostra que há alguns desafios a serem trabalhados para que esse tipo de uso possa se tornar realidade.

5.4.1 Sistemas auxiliares compatíveis

Para a utilização dessas baterias aplicadas em sistemas estacionários, são necessários sistemas auxiliares como controladores e BMS, os quais devem ser compatíveis com o modelo de bateria e com a configuração de instalação utilizada. Para aplicação no projeto apresentado, a disponibilidade de equipamentos compatíveis com esse tipo de aplicação mostrou-se limitada. Além disso, mesmo o mercado de veículos elétricos sendo ainda muito recente, já existem diversos modelos e tecnologias de baterias de íons de lítio, o que dificulta a utilização de um mesmo equipamento de controle para diferentes projetos. O desenvolvimento de novos equipamentos e sua disponibilização para o mercado será um ponto relevante para que esse tipo de aplicação se torne realidade.

Para o projeto aqui apresentado, a escolha do controlador foi limitada pelo único equipamento compatível, que foi desenvolvido em parceria com o fabricante Unitron, especialmente para os projetos de segunda vida desenvolvidos pelo laboratório, em que se inclui a aplicação desse trabalho.

5.4.2 Baterias com diferentes históricos

Idealmente as baterias utilizadas em um mesmo banco devem possuir as mesmas características. Para a construção de um banco de segunda vida, mesmo que utilizadas apenas baterias provenientes de um mesmo modelo de veículo, ou seja, com características originais idênticas, será preciso utilizar unidades retiradas de diversos veículos distintos, as quais foram submetidas a diferentes condições de ciclos de carga e descarga, temperatura de operação, taxas de carregamento e forma de direção do condutor. Essas condições fazem com que as baterias apresentem diferentes características técnicas, como estágio no ciclo de vida e resistência interna. O processo de testagem, classificação e seleção das baterias é importante para a criação de bancos de baterias mais homogêneos e com bom funcionamento, visto que as baterias de pior qualidade acabam limitando a capacidade de todo o banco.

5.4.3 Desmontagem, triagem e testes

Uma etapa essencial para o uso das baterias em uma aplicação de segunda vida envolve a fase de montagem dessas baterias da sua aplicação original, desmontagem mecânica e elétrica; triagem dessas baterias considerando aspectos mecânicos e testes de capacidade e resistência elétrica. O desenvolvimento de processos, automatizações e equipamentos para apoio nessas etapas será essencial para torná-las mais rápidas, seguras e assertivas.

Outro ponto relevante envolve o desenvolvimento dessas baterias como produto para ser reutilizado. Modificações no encapsulamento, montagens e materiais utilizados, pensados para a fase de desmontagem e reuso, podem facilitar e, em alguns casos, viabilizar a reutilização desses equipamentos.

6 CONCLUSÃO

O refrigerador é considerado um dos maiores consumidores de energia nas residências, devido ao uso de motor elétrico e operação ininterrupta (MEIER, 1995). Este trabalho apresenta uma proposta viável de utilização de refrigerador para sistemas isolados com reaproveitamento de segunda vida de baterias descartadas de veículos elétricos. A capacidade restante de energia encontrada nas baterias avaliadas neste trabalho, em torno de 70%, mostrou-se muito útil para incluir outros dispositivos de baixo consumo de energia, mas de alto valor agregado para o usuário, como portas de carregamento USB, TV's e iluminação LED.

Outra constatação importante diz respeito à desmontagem, teste e triagem das baterias, que são atividades críticas e demoradas para viabilizar o uso de segunda vida. O desenvolvimento de processos e equipamentos para essas atividades será um fator relevante para facilitar as aplicações de segunda vida. O projeto de fabricação dos módulos de baterias deve considerar o seu fim de ciclo em veículos elétricos, para que estejam preparados para serem retirados e utilizados em uma segunda aplicação.

O método de dimensionamento e análise de viabilidade técnica utilizados neste trabalho são simples de aplicar, mas muito úteis para aplicação em sistemas similares. Embora os resultados deste estudo sejam limitados ao modelo de bateria analisado e às condições de contorno descritas, o método apresentado é geral e pode ser aplicado a qualquer sistema de bateria de íons de lítio de segunda vida associado a um gerador solar fotovoltaico. A confirmação dos resultados da simulação quando comparados aos resultados das medições ao longo de um período completo de um ano validam o método proposto nesta dissertação, com diferença anual menor que 5% em relação ao consumo do refrigerador, e com estado de carga da bateria (SOC) dentro da mesma faixa. Da mesma forma, os desafios técnicos identificados para a reutilização de baterias, como teste, triagem e desenvolvimento do sistema auxiliar, embora apresentados com as características técnicas específicas das baterias utilizadas, serão semelhantes em outros modelos de baterias.

O uso de baterias de íons de lítio de segunda vida reaproveitadas de uma frota de veículos elétricos em crescimento mundial é um tópico que atrairá muitos esforços de pesquisa e desenvolvimento em um futuro próximo. A indústria automotiva está interessada em fazer investimentos no valor residual das baterias descartadas de veículos elétricos, e o mercado de sistemas estacionários de armazenamento pode

se beneficiar com o fornecimento de grandes quantidades de baterias de íons de lítio que ainda são excelentes para aplicações como as descritas neste trabalho. O desafio será determinar seu valor residual e estabelecer formas rápidas e econômicas de caracterizar a vida restante desses elementos de armazenamento, antes de serem finalmente destinados à reciclagem para extração dos elementos químicos componentes das baterias, promovendo a economia circular.

Para trabalhos futuros, sugere-se identificar estratégias para uso de sistemas de controle eletrônico que possam ser adaptáveis à diferentes tipos de bateria, bem como realizar estudos com baterias de íon de lítio de outras tecnologias ou de outros modelos de veículos elétricos.

REFERÊNCIAS

AESC. **Cell, Module, and Pack for EV Applications**. Disponível em: <http://www.eco-aesc-lb.com:80/en/product/liion_ev/%0D>. Acesso em: 28 fev. 2018.

AHMADI, L. et al. A cascaded life cycle: reuse of electric vehicle lithium-ion battery packs in energy storage systems. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 22, n. 1, p. 111–124, 2017.

ALI, M. U. et al. Towards a smarter battery management system for electric vehicle applications: A critical review of lithium-ion battery state of charge estimation. **Energies**, v. 12, n. 3, 2019.

ANTONIOLLI, A. F. G. **Avaliação do desempenho de geradores solares fotovoltaicos conectados à rede elétrica no Brasil**. [s.l.] UFSC, 2015.

ASSUNÇÃO, A.; MOURA, P. S.; DE ALMEIDA, A. T. Technical and economic assessment of the secondary use of repurposed electric vehicle batteries in the residential sector to support solar energy. **Applied Energy**, v. 181, p. 120–131, 2016.

AUSFELDER, F. et al. Energy Storage as Part of a Secure Energy Supply. **ChemBioEng Reviews**, v. 4, n. 3, p. 144–210, 2017.

BHATT, A.; ONGSAKUL, W.; MADHU M., N. Optimal techno-economic feasibility study of net-zero carbon emission microgrid integrating second-life battery energy storage system. **Energy Conversion and Management**, v. 266, n. June, p. 115825, 2022.

BRACO, E. et al. Experimental assessment of cycling ageing of lithium-ion second-life batteries from electric vehicles. **Journal of Energy Storage**, v. 32, n. June, p. 101695, 2020.

CLIMATE ONEBUILDING. **Database BRA_SC_Florianopolis-Luz.Intl.AP.838990_TMYx**. Disponível em: <https://climate.onebuilding.org/WMO_Region_3_South_America/BRA_Brazil/index.html>. Acesso em: 13 ago. 2023.

CUSENZA, M. A. et al. Energy and environmental benefits of circular economy strategies: The case study of reusing used batteries from electric vehicles. **Journal of Energy Storage**, v. 25, n. July, p. 100845, 2019.

DAFFALLAH, K. O. Modelling and sizing of a 12 V DC photovoltaic refrigerator. **International Journal of Ambient Energy**, v. 0, n. 0, p. 1–5, 2019.

DOS SANTOS, D. R.; ROCHA, C. A. S. Monitoramento tecnológico sobre baterias aplicadas à indústria automotiva: estudo dos depósitos de patentes no Brasil. **Cadernos de Prospecção**, v. 10, n. 1, p. 47–55, 2017.

DOS SANTOS, L. N. C.; DE LIMA, G. F. M. Dimensionamento prático de um

sistema fotovoltaico – estudo de caso utilizando o software PVsyst. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 3, p. 20035–20047, 2022.

EFFICIENCY FOR ACCESS. **Off-Grid Refrigeration: Technology Roadmap**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <https://storage.googleapis.com/e4a-website-assets/Refrigeration-Roadmap_FINAL.pdf>.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional Relatório Síntese 2023 - Ano Base 2022**. Rio de Janeiro: [s.n.]. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-681/BEN_Síntese_2023_PT.pdf>.

ENGEL, H.; HERTZKE, P.; SICCARDO, G. Second-life EV batteries: The newest value pool in energy storage. **McKinsey & Company**, n. April, p. 1–9, 2019.

FERREIRA, J. A. DE A.; VINENTE, J. J. DE C.; PINHEIRO, É. C. N. M. Eficiência energética em refrigeradores domésticos. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 11, p. 71475–71493, 2022.

GEEPOWER. **3.7V 32AH POUCH CELL - GPNCM75161227 Datasheet**GeeBattery, , [s.d.].

GLOBAL LEAP. **2019 Buyer's Guide for Outstanding Off-Grid Refrigerators**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://efficiencyforaccess.org/publications/2019-global-leap-awards-buyers-guide-for-outstanding-off-grid-refrigerators>>.

GTES. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Edição esp ed. Rio de Janeiro: CRESESB, 2004.

HARAM, M. H. S. M. et al. Feasibility of utilising second life EV batteries: Applications, lifespan, economics, environmental impact, assessment, and challenges. **Alexandria Engineering Journal**, v. 60, n. 5, p. 4517–4536, 2021.

HARPER, G. et al. Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. **Nature**, v. 575, n. 7781, p. 75–86, 7 nov. 2019.

HARRINGTON, L.; AYE, L.; FULLER, R. J. Opening the door on refrigerator energy consumption: quantifying the key drivers in the home. **Energy Efficiency**, v. 11, n. 6, p. 1519–1539, 2018.

HOHMANN, M.; KIRSTEN VIDAL DE OLIVEIRA, A.; RÜTHER, R. **Análise de Viabilidade Técnica da Utilização de Baterias de Segunda Vida Retiradas de Veículos Elétricos**. Anais do IX Congresso Brasileiro de Energia Solar. **Anais...**Florianópolis: 2022

HOSSAIN, E. et al. A Comprehensive Review on Second-Life Batteries: Current State, Manufacturing Considerations, Applications, Impacts, Barriers Potential Solutions, Business Strategies, and Policies. **IEEE Access**, v. 7, p. 73215–73252, 2019.

IEC. **IEC62552-3 2015 - Household refrigerating appliances - Characteristics and test methods - Part 3: Energy consumption and volume** IEC, 2015. Disponível em: <<https://webstore.iec.ch/publication/21803>>

INMETRO. **Refrigeradores, frigobares, combinados, combinados frost-free**. Brasília: [s.n.]. Disponível em: <<https://www.gov.br/inmetro/pt-br/assuntos/avaliacao-da-conformidade/programa-brasileiro-de-etiquetagem/tabelas-de-eficiencia-energetica/refrigeradores-frigobares-combinados-combinados-frost-free>>.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **For the first time in decades, the number of people without access to electricity is set to increase in 2022** Paris IEA, 2022a. Disponível em: <<https://www.iea.org/commentaries/for-the-first-time-in-decades-the-number-of-people-without-access-to-electricity-is-set-to-increase-in-2022>>

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global EV Outlook 2022 - Securing supplies for an electric future. Global EV Outlook 2022**, p. 221, 2022b.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Outlook 2022**. Paris: [s.n.].

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Guidebook for Improved Electricity Access Statistics. Guidebook for Improved Electricity Access Statistics**, 2023a.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Renewables: Solar PV**. Disponível em: <<https://www.iea.org/energy-system/renewables/solar-pv>>. Acesso em: 6 ago. 2023b.

KHATIB, T.; IBRAHIM, I. A.; MOHAMED, A. A review on sizing methodologies of photovoltaic array and storage battery in a standalone photovoltaic system. **Energy Conversion and Management**, v. 120, p. 430–448, 2016.

LALLI, F. Teste completo: Nissan Leaf em condições reais de uso. **Revista Carro**, ago. 2019.

LI, M. et al. 30 Years of Lithium-Ion Batteries. **Advanced Materials**, v. 30, n. 33, p. 24, 14 ago. 2018.

LIANG, K. A review of linear compressors for refrigeration. **International Journal of Refrigeration**, v. 84, p. 253–273, 2017.

LIGHTING GLOBAL. **Off-Grid Solar Market Trends Report 2022**. GOGLA ed. Washington: The World Bank, 2022.

MA, Y. Computer Simulation of Cathode Materials for Lithium Ion and Lithium Batteries: A Review. **Energy and Environmental Materials**, v. 1, n. 3, p. 148–173, 2018.

MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B.; ECHER, M. P. D. S. Levantamento dos recursos de energia solar no Brasil com o emprego de satélite geoestacionário-o Projeto Swera (Solar energy resources assesment using geostationary satellites in

brazil-Swera Project). **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 26, n. 2, p. 145–159, 2004.

MEIER, A. Refrigerator energy use in the laboratory and in the field. **Energy and Buildings**, v. 22, n. 3, p. 233–243, 1995.

MENDES, T. et al. Seleção de características em um sistema de refrigeração para identificar degradações em seus componentes. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 10, p. 77918–77932, 2020.

MICHELINI, A. **Baterias recarregáveis para equipamentos portáteis**. 1a edição ed. Cotia, SP: STA, 2017.

MIRZAEI OMRANI, M.; JANNESARI, H. Economic and environmental assessment of reusing electric vehicle lithium-ion batteries for load leveling in the residential, industrial and photovoltaic power plants sectors. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 116, 2019.

NARAYAN, N. et al. Estimating battery lifetimes in Solar Home System design using a practical modelling methodology. **Applied Energy**, v. 228, n. July, p. 1629–1639, 2018.

NEDJALKOV, A. et al. Blueprint and implementation of rural stand-alone power grids with second-life lithium ion vehicle traction battery systems for resilient energy supply of tropical or remote regions. **Materials**, v. 12, n. 16, 2019.

NGUYEN, C.-L. et al. **A Cost-Effective Standalone E-bike Charging Station Powered by Hybrid Wind and Solar Power System Including Second-Life BESS**. 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). **Anais...Detroit, USA: IEEE, 2020**

OUR WORLD IN DATA. **Electricity Mix**. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/electricity-mix>>. Acesso em: 6 ago. 2023.

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017.

PIKULTONG, P.; THONGSAN, S.; JIAJITSAWAT, S. The Study of Usable Capacity Efficiency and Lifespan of Hybrid Energy Storage (Lead-Acid with Lithium-ion Battery) Under Office Building Load Pattern. **Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences**, v. 98, n. 2, p. 67–79, 2022.

PVSYST. **Shadings - General**. Disponível em: <https://www.pvsyst.com/help/shadings_general.htm>. Acesso em: 9 set. 2023a.

PVSYST. **Performance Ratio**. Disponível em: <https://www.pvsyst.com/help/performance_ratio.htm#:~:text=The Performance Ratio is the,the available energy is E_Grid.>. Acesso em: 10 set. 2023b.

REN21. **Renewables 2020 Global Status Report**REN21 Secretariat. Paris: [s.n.]. Disponível em: <https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2020_full_report_en.pdf>.

RITCHIE, H.; ROSER, M.; ROSADO, P. **Access to Energy**. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/energy-access>>. Acesso em: 31 jul. 2023.

ROHATGI, A. **WebPlotDigitizer Version 4.6**. Disponível em: <<https://apps.automeris.io/wpd/>>. Acesso em: 2 mar. 2023.

RÜTHER, R. **Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil**. 1a. ed. Florianópolis: Editora UFSC, 2004.

SONG, Z. et al. Benefit assessment of second-life electric vehicle lithium-ion batteries in distributed power grid applications. **Journal of Energy Storage**, v. 56, n. PC, p. 105939, 2022.

STOECKER, W. F.; JONES, J. W. **Refrigeração e ar condicionado**. Tradução J ed. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1985.

SULLIVAN, J. L.; GAINES, L. **A review of battery life-cycle analysis: State of knowledge and critical needs**. Argonne, USA: Argonne National Laboratory, 2010.

TONG, S. J. et al. Off-grid photovoltaic vehicle charge using second life lithium batteries: An experimental and numerical investigation. **Applied Energy**, v. 104, p. 740–750, 2013.

UL HASSAN, M. et al. A comprehensive review of battery state of charge estimation techniques. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 54, n. 3, p. 102801, dez. 2022.

WHITE, C.; THOMPSON, B.; SWAN, L. G. Comparative performance study of electric vehicle batteries repurposed for electricity grid energy arbitrage. **Applied Energy**, v. 288, n. February, p. 116637, 2021.

WHO. **Introducing solar-powered vaccine refrigerator and freezer systems**. Geneva: [s.n.].

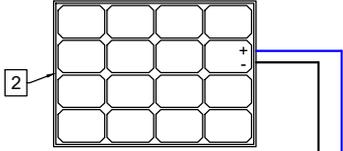
YOUMMA. **Nilo 100 Technical Specification**. Disponível em: <https://www.yoummasolar.com/_files/ugd/4e45b6_d5be556a48274d628151a0394a537b05.pdf>. Acesso em: 12 ago. 2023.

ZAGO CANTÚ, V. et al. Comparativo Técnico entre Bancos de Baterias de Primeira e Segunda Vida para Aplicação On-Grid de Porte Comercial. **Anais do IX Congresso Brasileiro de Energia Solar**, v. d, 2022.

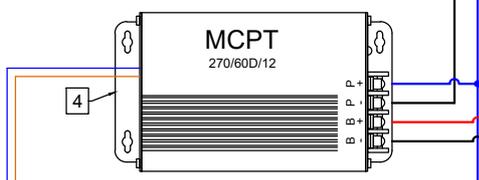
APÊNCIDE A – DIAGRAMA DO SISTEMA DE INSTRUMENTAÇÃO

Sistema Painel-Controlador (PC)

PV MODULE



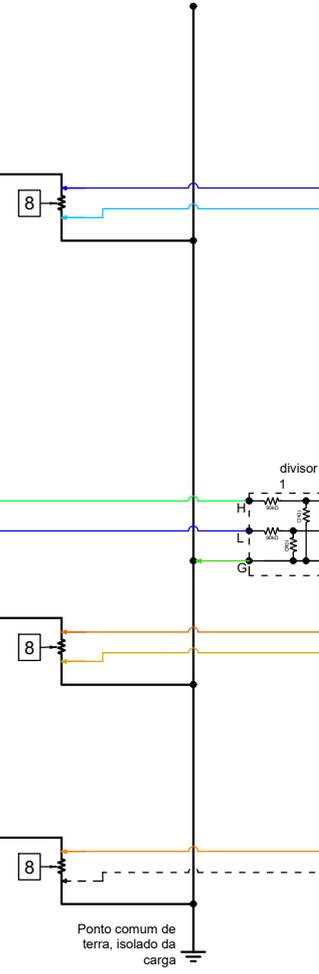
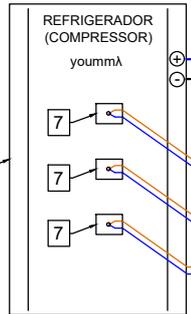
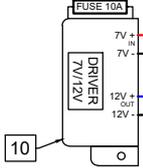
Icarga	consome	-
I_PC	fornece	+
Ibat	consome	-
Ibat	fornece	+
CONVENÇÃO DE SINAL DE CORRENTE		



Sistema Bateria



Sistema Carga (Refrigerador)



5

DATALOGGER			
NETWORK SETTINGS			
TCP ADDRESS	150.162.142.190		
TCP PORT	6785		
LOGGER	CR1000X		
PAKBUS ADDRESS	15		
GLOBAL ADDRESS	4080		
LOGGERLINK PAKBUS			

CANAL	VARIÁVEL	UN.	CABO
DIFF 2	H I_PC	A	blue_dark
	L I_PC	A	blue_light

SE11	Vbat	V	green_light
SE12	Vcell	V	blue_dark
↓	Analog Ground		green_dark

DIFF 3	H Ibat	A	brown_dark
	L Ibat	A	brown_light

DIFF 7	H Icarga	A	orange
	L Icarga	A	white

11

CANAL	VARIÁVEL	UN.	CABO
DIFF 5	L Te_BatLi	°C	TP red
	H Te_BatLi	°C	TP blue
DIFF 6	L Te_Ext	°C	TP red
	H Te_Ext	°C	TP blue
DIFF 4	L Te_Sala	°C	TP13 red
	H Te_Sala	°C	TP13 blue
DIFF 1	L Te_Ref_Sup	°C	TP09 red
	H Te_Ref_Sup	°C	TP09 blue
DIFF 3	L Te_Ref_X	°C	TP10 red
	H Te_Ref_X	°C	TP10 blue
DIFF 2	L Te_Ref_Inf	°C	TP11 red
	H Te_Ref_Inf	°C	TP11 blue
HI	Common High	-	brown
LO	Common Low	-	white/brown
↓	Analog Ground	-	green
CLK	Clock	-	white/orange
RES	Reset	-	orange
VX	PRT Excitation	-	white/green
12V	12VDC	-	black
G	Power Ground	-	red

DIFF 1	H		
	L		
↓			
C1			
C2			
VX1			
12V			
G			

ITEM	DESCRIÇÃO	QTDE
11	Multiplexador de termopares - Campbell AM25T	1
10	Driver conversor tensão 7,5VDC-12VDC - Unित्रon	1
9	Voltage Divider 10/1 - Campbell VDIV10.1	1
8	Shunt resistor 0,01ohm 5W 1% - Ohmite 15FR010E	3
7	Termopar tipo T - Omega	6
6	Driver controlador carga e descarga Li-ion - Unित्रon	1
5	Datalogger - Campbell CR1000X	1
4	Conversor-Controlador - Unित्रon MCPT 270/60D/12	1
3	Bateria ion-Lítio 7,5VDC - Nissan Leaf	3
2	Painel fotovoltaico 255W - YGE_YL255P	1
1	Refrigerador DC - Yomma Nilo 100	1
LISTA DE MATERIAIS		

Projetista Vinícius Cantú	Arquivo	Data 28.06.2021	Escala
Universidade Federal de Santa Catarina Fotovoltaica - UFSC		Diagrama de circuito - experimento refrigerador solar FV	
Av Luiz Boileux Plaza, 1302, Lotes 114/115 - Florianópolis - SC Tel: +55 (48) 3721-4598		Rev 14	Folha 1