



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

RAFAEL LEITE BEZERRA

**DESENVOLVIMENTO DE GELADEIRA FOTOVOLTAICA COM
ESTOCAGEM DE ENERGIA EM ÁGUA NA FORMA DE GELO E LÍQUIDA**

JOÃO PESSOA

2025

RAFAEL LEITE BEZERRA

**DESENVOLVIMENTO DE GELADEIRA FOTOVOLTAICA COM
ESTOCAGEM DE ENERGIA EM ÁGUA NA FORMA DE GELO E LÍQUIDA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado para obtenção dos créditos da disciplina de Trabalho de Conclusão da Universidade Federal da Paraíba, Campus João Pessoa, como parte das exigências para graduação no curso de Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr José Maurício Alves de Matos Gurgel.

JOÃO PESSOA

2025

RAFAEL LEITE BEZERRA

**DESENVOLVIMENTO DE GELADEIRA FOTOVOLTAICA COM
ESTOCAGEM DE ENERGIA EM ÁGUA NA FORMA DE GELO E LÍQUIDA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado para
obtenção dos créditos da disciplina de Trabalho de
Conclusão da Universidade Federal da Paraíba,
Campus João Pessoa, como parte das exigências
para graduação no curso de Engenharia Mecânica.

Aprovado em: 30 / 04 / 2025

BANCA EXAMINADORA



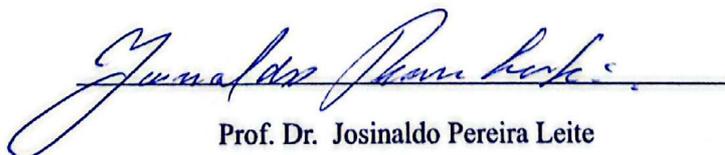
Prof. Dr. José Maurício Alves de Matos Gurgel. (Orientador)

Universidade Federal da Paraíba (UFPB)



Prof. Dr. Bruno Leonardo Campelo de Queiroga

Universidade Federal da Paraíba (UFPB)



Prof. Dr. Josinaldo Pereira Leite

Universidade Federal da Paraíba (UFPB)

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

B574d Bezerra, Rafael Leite.

DESENVOLVIMENTO DE GELADEIRA FOTOVOLTAICA COM
ESTOCAGEM DE ENERGIA EM ÁGUA NA FORMA DE GELO E LÍQUIDA
/ Rafael Leite Bezerra. - João Pessoa, 2025.
57 f. : il.

Orientação: José Maurício Gurgel.
TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. Energia solar fotovoltaica. 2. armazenamento
térmico. 3. refrigeração off-grid. 4. sustentabilidade.
5. regiões remotas. I. Gurgel, José Maurício. II.
Título.

UFPB/CT/BSCT

CDU 621(043.2)

A Deus.

Aos meus pais, minha namorada e meu
irmão.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por me abençoar, desde sempre, com saúde, disposição e inteligência em abundância, guiando-me em cada etapa desta jornada. Ao Prof. Dr. José Maurício Alves de Matos Gurgel, meu orientador, direciono minha profunda gratidão pela excelente orientação, paciência e dedicação, que foram essenciais para a conclusão deste trabalho. Também manifesto meu reconhecimento aos professores Josinaldo Pereira Leite e Dr. Bruno Leonardo Campelo de Queiroga, membros da banca examinadora, pelo tempo dispensado, pelas valiosas contribuições e pelas sugestões que tanto enriqueceram esta pesquisa. Aos meus colegas de turma, especialmente Caio Victor e João Vitor Amorim, assim como aos demais amigos que conquistei ao longo desta caminhada, agradeço pelo apoio, pelas reflexões e pelas críticas construtivas que me ajudaram a crescer tanto academicamente quanto pessoalmente. À minha família, em especial aos meus pais e irmão, expresso meu eterno agradecimento pelo amor incondicional e pelo incentivo que me impulsionaram a superar todos os desafios. Por fim, mas não menos importante, à minha namorada, Pollyana Porto Vasconcelos, dedico minha mais sincera gratidão por estar ao meu lado em todos os momentos, oferecendo apoio, compreensão e força nos períodos mais difíceis da graduação e da vida pessoal, sendo meu porto seguro e minha maior motivação. Este trabalho é o resultado não apenas do meu esforço, mas da contribuição generosa de cada uma dessas pessoas, e por isso, a todos, o meu mais profundo obrigado.

RESUMO

A energia solar fotovoltaica apresenta-se como uma solução viável para o fornecimento de energia em regiões remotas, onde cerca de 770 milhões de pessoas ainda não têm acesso à eletricidade. A refrigeração de alimentos e medicamentos é essencial para a segurança alimentar e a saúde pública, porém, sistemas convencionais enfrentam altos custos e complexidade técnica. Este trabalho propõe um sistema fotovoltaico off-grid acoplado a um refrigerador doméstico, utilizando gelo como reserva térmica para manter a temperatura abaixo de 5 °C durante a noite. O objetivo principal é superdimensionar painéis solares para que forneçam energia por um maior intervalo de tempo, conseguindo assim armazenar mais energia na forma de gelo, substituindo baterias pelo armazenamento térmico, reduzindo custos e aumentando a eficiência. Metodologicamente, o projeto inclui cálculo da demanda energética, otimização do isolamento térmico, análise de viabilidade econômica e validação experimental. Considerando a intermitência natural das fontes renováveis, como a energia solar, a estocagem de energia torna-se fundamental para garantir o fornecimento contínuo, sobretudo durante períodos sem radiação solar. No presente estudo, essa estocagem é realizada de maneira inovadora, utilizando água/gelo como meio de armazenamento da energia acumulada durante o dia, permitindo que o sistema suporte a carga de refrigeração durante a noite. Essa abordagem elimina a necessidade de baterias, que representam um dos principais fatores de encarecimento em sistemas solares fotovoltaicos convencionais. Os resultados esperados demonstram que o sistema pode ser uma alternativa sustentável para locais sem infraestrutura energética, contribuindo para a redução de perdas de alimentos e melhoria na conservação de medicamentos. Conclui-se que a abordagem proposta é tecnicamente viável, economicamente acessível e ambientalmente sustentável, podendo ser aplicada em comunidades isoladas ou em situações de instabilidade energética.

Palavras-chave: Energia solar fotovoltaica, armazenamento térmico, refrigeração off-grid, sustentabilidade, regiões remotas.

ABSTRACT

Solar photovoltaic energy emerges as a viable solution for providing electricity in remote areas, where approximately 770 million people still lack access to power. The refrigeration of food and medicines is essential for food security and public health; however, conventional systems face high costs and technical complexity. This study proposes an off-grid photovoltaic system coupled with a household refrigerator, using ice as a thermal storage medium to maintain temperatures below 5 °C overnight. The main objective is to oversize solar panels, replacing batteries with thermal storage, thereby reducing costs and increasing efficiency. Methodologically, the project includes calculating energy demand, optimizing thermal insulation, conducting an economic feasibility analysis, and performing experimental validation. Given the natural intermittency of renewable sources such as solar energy, energy storage becomes fundamental to ensure continuous supply, especially during periods without sunlight. In this study, storage is innovatively achieved using water/ice to retain the energy accumulated during the day, allowing the system to support refrigeration loads overnight. This approach eliminates the need for batteries, which are a major cost factor in conventional photovoltaic systems. The expected results demonstrate that the system can be a sustainable alternative for locations without energy infrastructure, contributing to the reduction of food losses and the improvement of medicine preservation. It is concluded that the proposed approach is technically feasible, economically accessible, and environmentally sustainable, and can be applied to isolated communities or situations of energy instability.

Keywords: Solar photovoltaic energy, thermal storage, off-grid refrigeration, sustainability, remote areas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Placas solares	18
Figura 2 – Tipos de células fotovoltaicas	18
Figura 3 – Sistema Off-grid	22
Figura 4 – Ciclo Ideal de Compressão a Vapor e diagrama T-s	25
Figura 5 – Fluxograma da metodologia implementada	31
Figura 6 – Geladeira da marca Consul: 1- congelador; 2 – refrigerador	32
Figura 7 – Irradiação solar da Paraíba	33
Figura 8 – Conjunto de monitoramento: a) Temporizador; b) Sensor PT100	36
Figura 9 – Recipientes para armazenamento de gelo	36
Figura 10 – Sistema de aquisição de dados	37
Figura 11 – Sistema de geração fotovoltaica autônomo	38
Figura 12 – Recipientes instalados no interior da geladeira	40
Figura 13 – Dados do primeiro dia de coleta de dados (2 garrafas)	42
Figura 14 – Dados do segundo dia de coleta de dados (2 garrafas)	43
Figura 15 – Dados das 48 horas da coleta de dados (3 garrafas)	44
Figura 16 – Dados das 48 horas da coleta de dados (4 garrafas)	45
Figura 17 – Quarto experimento completo (93 horas)	47
Figura 18 – Quarto experimento energizado (48 horas)	48
Figura 19 – Quarto experimento desenergizado (38 horas)	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Medições de gelo e água no congelador e geladeira.....	38
Tabela 2 – Resultados dos cálculos das Perdas de Calor em função das partições	41
Tabela 3 – Estimativa de consumo diário da geladeira	49
Tabela 4 – Dimensionamento do banco de baterias.....	49
Tabela 5 – Dimensionamento dos painéis solares	50
Tabela 6 – Resumo dos componentes e custo estimado	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANVISA – Agência Nacional de Vigilância Sanitária

CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito

FAO – Food and Agriculture Organization

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IRENA – International Renewable Energy Agency

NBR – Norma Brasileira Regulamentar

OMS – Organização Mundial da Saúde

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Objetivos Gerais	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 Energia Solar	15
2.2 Sistema Fotovoltaico	17
2.2.1 Módulo Fotovoltaico	18
2.2.2 Tipos de Células Fotovoltaicas	20
2.3 Sistema Off-Grid	21
2.3.1 Estocagem de Energia	24
2.4 Transferência de Calor	24
2.5 Sistemas de Refrigeração	26
2.5.1 Controle de Temperatura em Refrigeração por Compressão de Vapor	27
2.5.2 Geladeira por Compressão de Vapor	29
3 MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1 Análise da Formação de Gelo e Eficiência em Refrigeração	31
3.1.1 Caracterização da Geladeira	31
3.1.2 Cálculo da Perda de Calor (Q)	32
3.1.3 Cálculo da Massa de Gelo Necessária	33
3.2 Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico	33
3.3 Separação dos Materiais	34
3.4 Construção e Validação Experimental	36
3.4.1 Construção do Sistema	36
3.4.2 Coleta dos Dados	37
3.4.3 Tratamento dos Dados	39
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
4.1 Análise da Formação de Gelo e Eficiência em Refrigeração	40
4.1.1 Perda de calor	40
4.1.2 Cálculo da Massa de Gelo Necessária	41
4.2 Análise dos Dados Recebidos	41
4.3 Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico	48
5 CONCLUSÃO	52
REFERÊNCIAS	54

1 INTRODUÇÃO

Diante do cenário energético global e dos desafios inerentes ao fornecimento de energia em regiões remotas — onde a expansão da infraestrutura convencional é inviável —, a energia solar fotovoltaica emerge como uma alternativa sustentável e estratégica. Segundo dados do Our World in Data (2023), aproximadamente 770 milhões de pessoas ainda não têm acesso à eletricidade, com destaque para a África Subsaariana e o Sul da Ásia.

Nesse contexto, a refrigeração de alimentos e medicamentos representa uma necessidade essencial, pois está diretamente relacionada à segurança alimentar, à saúde pública e à qualidade de vida. A utilização de geladeiras alimentadas por sistemas fotovoltaicos off-grid torna-se, portanto, de grande importância em comunidades isoladas, onde a ausência de energia elétrica compromete a conservação de produtos perecíveis e medicamentos termolábeis. A Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA, 2019) estabelece que alimentos perecíveis devem ser armazenados a temperaturas inferiores a 5 °C e que medicamentos sensíveis ao calor necessitam de conservação entre 2 °C e 8 °C para a preservação de suas propriedades.

Contudo, mesmo os sistemas fotovoltaicos enfrentam desafios consideráveis em aplicações de refrigeração. O alto consumo energético dos compressores tradicionais exige bancos de baterias robustos, o que eleva significativamente os custos e a complexidade dos sistemas off-grid (IRENA, 2022). Além disso, durante a pandemia de COVID-19, a Organização Mundial da Saúde (OMS, 2021) e a Aliança GAVI (2021) alertaram que a falha na cadeia de frio poderia comprometer a eficácia das vacinas, destacando a importância da refrigeração confiável em regiões desprovidas de infraestrutura energética adequada.

Para populações tradicionais, como as comunidades pesqueiras, a ausência de refrigeração também gera perdas alimentares expressivas, podendo chegar a 50% da produção, especialmente em regiões tropicais (FAO, 2020). Dessa forma, assegurar a manutenção adequada da temperatura dos alimentos e medicamentos é essencial para a promoção da saúde, da segurança alimentar e para o fortalecimento socioeconômico de comunidades vulneráveis.

Neste cenário, a estocagem de energia assume papel central em sistemas baseados em fontes renováveis, como a energia solar, cuja disponibilidade é intermitente. Tradicionalmente realizada por meio de baterias eletroquímicas, essa

solução implica em altos custos, tornando-se uma barreira para projetos em regiões de baixa renda. Como alternativa, o armazenamento térmico por meio da formação de gelo destaca-se como uma solução promissora, permitindo acumular energia durante o dia e utilizá-la para manter a refrigeração à noite, sem a necessidade de grandes bancos de baterias.

Diante desses desafios, este trabalho propõe investigar o uso do gelo como reserva térmica em sistemas fotovoltaicos off-grid. Devido ao seu alto calor latente de fusão (334 kJ/kg), o gelo apresenta-se como uma solução eficiente e de baixo custo para aplicações de refrigeração de curto prazo, reduzindo a dependência de baterias e contribuindo para a democratização do acesso à refrigeração em áreas remotas — uma abordagem ainda pouco explorada na literatura, mas com grande potencial para promover o desenvolvimento sustentável e resiliente.

1.1 OBJETIVOS GERAIS

O objetivo geral do trabalho consiste em estudar um sistema fotovoltaico autônomo (*off-grid*) com painéis solares superdimensionados para alimentar uma geladeira doméstico em operação contínua, maximizando a produção diurna de gelo. Esse gelo, armazenado no compartimento interno, atuará como reserva térmica para manter a temperatura adequada de conservação ($< 5^{\circ}\text{C}$) durante a noite, assegurando a preservação de alimentos e medicamentos sem dependência da rede elétrica.

Os objetivos específicos são:

- a) Dimensionar o sistema fotovoltaico calculando a potência necessária dos painéis solares considerando a demanda energética contínua do refrigerador e as variações sazonais de irradiação solar e selecionar os componentes do sistema off-grid (controlador de carga, inversor e quantidade de gelo que servirá como seu banco de baterias) para garantir autonomia e eficiência energética.
- b) Otimizar o armazenamento térmico por gelo e verificar isolamento térmico para estimar as perdas de energia do refrigerador a ser compensado.
- c) Analisar a viabilidade técnica e econômica, comparar o consumo energético do sistema proposto com geladeira fotovoltaicas funcionando com banco de baterias e estimar o custo-benefício da implementação incluindo payback.
- d) Validar experimentalmente o protótipo, implementar modelo funcional em escala real, além de verificar eficácia do gelo como reserva térmica noturna através de medições de temperatura.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Energia Solar

A crescente demanda por fontes de energia menos poluentes e a necessidade de diversificar a matriz energética brasileira têm impulsionado o desenvolvimento de tecnologias renováveis, entre as quais se destaca a energia solar fotovoltaica. A matriz elétrica do Brasil é majoritariamente composta por usinas hidrelétricas, que dependem de níveis estáveis de precipitação para manter seus reservatórios operacionais (DA ROSA; GASPARIN, 2017, p. 140). A instabilidade no regime de chuvas acarreta o acionamento de usinas termoeletricas, cujos custos são mais elevados e que geram impactos ambientais significativos devido à emissão de gases de efeito estufa (DA ROSA; GASPARIN, 2017, p. 140).

Nesse contexto, a energia solar fotovoltaica surge como uma alternativa estratégica. A tecnologia utiliza a luz solar para gerar eletricidade por meio de células compostas de silício, material abundante e com ampla aplicabilidade (SILVA; ARAÚJO, 2022, p. 859). O Brasil possui elevado potencial de radiação solar, superior ao de países que já incorporaram amplamente essa fonte em suas matrizes energéticas (DA ROSA; GASPARIN, 2017, p. 141). Além disso, a energia solar se destaca por sua aplicabilidade em locais isolados e por contribuir com a redução dos impactos ambientais, o que a torna uma das formas mais viáveis de geração renovável (NASCIMENTO; ALVES, 2017, p. 274).

A viabilidade de sistemas solares fotovoltaicos também depende do correto dimensionamento dos equipamentos necessários para atender a demanda energética prevista.

Um dos parâmetros essenciais nesse processo é a potência dos painéis solares, que pode ser determinada a partir da energia total requerida e da quantidade de horas de sol pleno disponíveis no local de instalação. Esse cálculo é representado pela equação 1:

$$P_{\text{painel}} = \frac{E_t}{HST} \quad (1)$$

em que:

- P_{painel} é a potência necessária do painel fotovoltaico (W),
- E_t é a energia total demandada (Wh),
- HSP corresponde às horas de sol pleno diárias médias da região (h).

A utilização desta metodologia assegura que o sistema fotovoltaico seja projetado com eficiência, garantindo o atendimento da carga elétrica prevista sem superdimensionamento ou falhas de fornecimento.

A geração distribuída, autorizada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), tem estimulado a produção própria de energia elétrica, permitindo o repasse do excedente à rede pública em troca de abatimentos na fatura (SILVA; ARAÚJO, 2022, p. 862). Contudo, o investimento inicial necessário para a instalação de sistemas fotovoltaicos ainda representa uma barreira, especialmente para consumidores residenciais (DA ROSA; GASPARIN, 2017, p. 141). A falta de incentivos fiscais e as dificuldades tributárias e institucionais são fatores que inibem o avanço dessa tecnologia (DA ROSA; GASPARIN, 2017, p. 141).

A importância de fontes limpas de energia também está associada aos compromissos ambientais e à promoção da saúde pública. As tecnologias solares emitem quantidades mínimas de poluentes atmosféricos e gases de efeito estufa, quando comparadas às fontes convencionais (SILVA; ARAÚJO, 2022, p. 862). Essa característica posiciona a energia solar como ferramenta relevante para alcançar metas de sustentabilidade.

Apesar dos desafios econômicos, estudos continuam sendo realizados com o objetivo de ampliar o conhecimento sobre essa tecnologia e reduzir seus custos, promovendo maior acesso à população (SILVA; ARAÚJO, 2022, p. 859). De acordo com Pacheco (2006), há uma grande necessidade de utilizar fontes naturais para a geração de eletricidade, como a radiação solar, os ventos, a biomassa e outras alternativas. Ainda que o Brasil disponha de diversas opções energéticas e vasto potencial de recursos renováveis, a utilização dessas fontes permanece aquém do necessário (NASCIMENTO; ALVES, 2017, p. 274).

Como alternativa às crises hidrológicas e aos impactos das termoeletricas, cresce o interesse pela diversificação da matriz elétrica com fontes renováveis (DA ROSA; GASPARIN, 2017, p. 140). A energia solar fotovoltaica, por suas características técnicas e ambientais, apresenta-se como uma solução viável e promissora no contexto brasileiro (SANTOS; SILVA; OLIVEIRA, 2021, p. 6).

Dessa forma, a ampliação do uso da energia solar requer não apenas avanço tecnológico, mas também políticas públicas eficazes e maior conscientização da

população. O fortalecimento desses elementos pode viabilizar sua expansão e contribuir para a sustentabilidade ambiental e energética do país.

2.2 Sistema Fotovoltaico

O sistema fotovoltaico (SFV) é constituído por um conjunto de dispositivos capazes de converter a radiação solar em energia elétrica, utilizando o efeito fotovoltaico. Nesse processo, a luz solar incide sobre as células fotovoltaicas, que, a partir da excitação de elétrons, geram uma corrente elétrica contínua. Para que essa corrente seja compatível com a maioria dos aparelhos elétricos, utiliza-se inversores para convertê-la em corrente alternada (CARDOSO, 2019). O uso dessa tecnologia tem se expandido no Brasil, devido ao seu elevado potencial de geração de energia limpa e sustentável (DA ROSA; GASPARIN, 2017, p. 142).

A eficiência dos sistemas fotovoltaicos é influenciada por diversos fatores, tanto ambientais quanto operacionais. Dentre os principais, destacam-se a intensidade da radiação solar disponível na localidade, o ângulo e a orientação dos módulos, e o desempenho dos inversores. O Brasil, devido à sua posição geográfica privilegiada, apresenta condições favoráveis para a exploração dessa fonte de energia, especialmente em regiões com alta irradiação solar (SILVA; ARAÚJO, 2022, p. 860). Contudo, o sombreamento dos módulos pode comprometer significativamente a geração de energia, representando um desafio importante na otimização do sistema fotovoltaico (LAMBERTS et al., 2010).

O correto dimensionamento do sistema fotovoltaico também exige a determinação da corrente de carga necessária para o carregamento das baterias. Essa corrente pode ser obtida a partir da equação:

$$I_c = \frac{P_{total}}{V_s} \quad (2)$$

em que:

- I_c representa a corrente de carga (A),
- P_{total} é a potência total do sistema (W),
- V_s é a tensão nominal do sistema (V).

Esse parâmetro é fundamental para a seleção adequada dos controladores de carga e para garantir o desempenho eficiente do sistema off-grid.

Além dos fatores naturais, aspectos econômicos também influenciam a expansão da energia solar no país. O custo inicial elevado e a ausência de incentivos fiscais adequados ainda representam obstáculos à adoção em larga escala. No entanto, os benefícios ambientais da energia solar, como a redução das emissões de gases de efeito estufa, posicionam essa tecnologia como uma solução estratégica para a diversificação da matriz energética e para o cumprimento das metas climáticas (SANTOS; SILVA; OLIVEIRA, 2021, p. 5).

A flexibilidade dos sistemas fotovoltaicos permite sua instalação em diferentes contextos, como em telhados residenciais, áreas rurais e instalações industriais. Essa versatilidade torna a energia solar acessível tanto em regiões conectadas à rede elétrica quanto em áreas remotas, oferecendo uma solução viável para comunidades isoladas (SILVA; ARAÚJO, 2022, p. 861). Assim, além de fornecer autonomia energética, a energia solar fotovoltaica contribui para a redução da dependência de fontes de energia não renováveis (NASCIMENTO; ALVES, 2017, p. 275).

Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados em três modalidades principais: sistemas isolados (off-grid), sistemas conectados à rede elétrica (on-grid) e sistemas híbridos, que combinam a geração solar com outras fontes de energia e métodos de armazenamento. A escolha entre essas modalidades depende da infraestrutura disponível e das necessidades energéticas locais (LAMBERTS et al., 2010). A manutenção dos sistemas fotovoltaicos, que inclui a limpeza periódica dos módulos e o monitoramento constante de seu desempenho, é essencial para garantir a eficiência e a longevidade do sistema (SILVA; ARAÚJO, 2022, p. 862).

Em síntese, a energia solar fotovoltaica surge como uma solução tecnológica promissora para a geração de energia renovável e sustentável. Sua aplicação no Brasil, dada a abundância de recursos solares, representa uma estratégia relevante para a transição para uma economia de baixo carbono, além de contribuir para a diversificação da matriz energética e a mitigação dos impactos ambientais (DA ROSA; GASPARIN, 2017, p. 143).

2.2.1 Módulo Fotovoltaico

Os módulos fotovoltaicos, também conhecidos como placas solares e apresentados na Figura 1, são componentes fundamentais nos sistemas fotovoltaicos. Estes dispositivos convertem a luz solar em energia elétrica, sendo compostos por

células fotovoltaicas interligadas em série ou paralelo. A quantidade de módulos necessários em um sistema fotovoltaico depende diretamente das necessidades energéticas específicas da instalação, sendo dimensionados de acordo com a demanda de eletricidade (RIBEIRO, 2020). Segundo Pacheco (2006), a eficiência dos módulos fotovoltaicos é determinada pela qualidade do silício utilizado e pelo design da célula fotovoltaica, o que impacta diretamente na capacidade de conversão da energia solar.

Figura 1 – Placas solares



Fonte: Criterias energia (2024)

A estrutura de um módulo fotovoltaico é essencial para garantir a eficiência no processo de conversão. O desempenho de cada módulo depende da qualidade das células fotovoltaicas que o compõem. Células fotovoltaicas de silício puro têm se mostrado as mais eficientes, especialmente as monocristalinas, que são produzidas a partir de um único cristal de silício. Essas células são caracterizadas pela alta eficiência e longevidade, sendo comumente utilizadas em sistemas que exigem alta performance (SILVA; ARAÚJO, 2022, p. 860). Já os módulos policristalinos, embora menos eficientes, oferecem uma alternativa de custo mais baixo, tornando-se uma opção viável para projetos com orçamento mais restrito (OLIVEIRA, 2019).

A instalação e a manutenção adequadas dos módulos solares são cruciais para garantir seu funcionamento adequado. De acordo com Santos (2019), a limpeza periódica dos módulos fotovoltaicos e o monitoramento contínuo do desempenho das células são práticas essenciais para garantir a eficiência e a durabilidade do sistema. O desempenho de um módulo fotovoltaico pode ser significativamente impactado pela sujeira acumulada em sua superfície, o que reduz a quantidade de luz solar que atinge as células e, conseqüentemente, a geração de energia. Além disso, o posicionamento dos

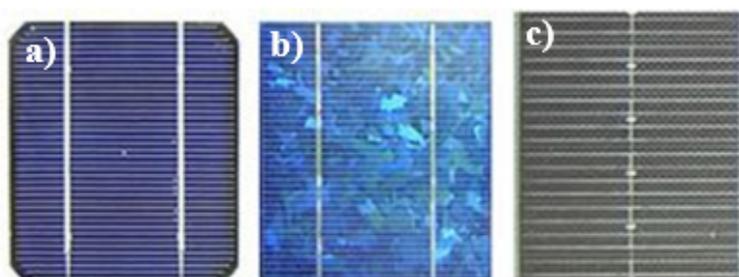
módulos, considerando o ângulo de inclinação e a orientação em relação ao sol, deve ser cuidadosamente planejado para maximizar a eficiência da conversão energética.

Por fim, o desenvolvimento e aprimoramento das tecnologias relacionadas aos módulos fotovoltaicos têm sido fundamentais para o aumento da competitividade dessa fonte de energia no mercado. Avanços na fabricação de células solares mais eficientes, com menores custos de produção, têm contribuído para a popularização da energia solar, tornando-a mais acessível e economicamente viável para uma maior parte da população, especialmente no Brasil, que possui um grande potencial de geração solar (DA ROSA; GASPARIN, 2017, p. 142).

2.2.2 Tipos de Células Fotovoltaicas

Os módulos fotovoltaicos são compostos por células fotovoltaicas, que são os componentes responsáveis pela conversão da luz solar em energia elétrica. Essas células são fabricadas a partir de silício altamente purificado, o que garante sua alta eficiência no processo de conversão fotovoltaica. A principal diferença entre os tipos de células fotovoltaicas está na sua estrutura cristalina, que pode ser monocristalina, policristalina ou amorfa (RIBEIRO, 2020), como mostra a Figura 2.

Figura 2 – Tipos de células fotovoltaicas. a) Monocristalinas; b) Policristalinas; c) Amorfais



Fonte: CRESESB (2015)

As células fotovoltaicas monocristalinas são compostas por um único cristal de silício, o que garante uma estrutura mais uniforme e, conseqüentemente, uma maior eficiência na conversão da luz solar em eletricidade. Esse tipo de célula é considerado o mais eficiente e, portanto, o mais caro. Segundo Oliveira (2019), as células monocristalinas apresentam uma eficiência superior a 20%, sendo ideais para sistemas em que o espaço disponível para instalação é limitado, mas a necessidade de geração de

energia é alta. Essa alta eficiência está relacionada ao fato de que a célula possui uma maior pureza de silício, permitindo que mais elétrons sejam excitados pela luz solar.

Por outro lado, as células policristalinas são compostas por vários cristais de silício, o que resulta em uma estrutura mais irregular e, conseqüentemente, uma eficiência menor, em torno de 15 a 17%. No entanto, como observam Silva e Araújo (2022), as células policristalinas apresentam um custo de fabricação mais baixo em relação às monocristalinas, o que torna essa tecnologia mais acessível, especialmente para sistemas de menor escala ou em regiões onde o custo é uma consideração crucial.

As células amorfas, por sua vez, não possuem uma estrutura cristalina definida. Elas são fabricadas a partir de silício não cristalizado e, embora apresentem uma eficiência menor (em torno de 7 a 10%), oferecem vantagens em termos de flexibilidade e custo de produção. Essas células são frequentemente utilizadas em aplicações de baixo consumo de energia, como em dispositivos portáteis e pequenos sistemas fotovoltaicos, e têm se mostrado uma alternativa interessante para projetos em que a flexibilidade e o custo baixo são mais importantes que a eficiência (SILVA; ARAÚJO, 2022, p. 860).

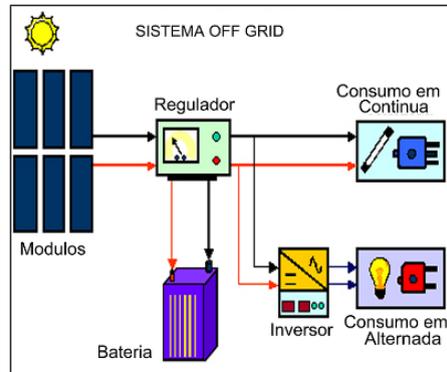
A escolha do tipo de célula fotovoltaica depende das especificidades de cada projeto, como o orçamento disponível, o espaço para instalação e as necessidades energéticas. No entanto, independentemente do tipo de célula utilizada, o objetivo final é sempre otimizar a eficiência do sistema fotovoltaico para garantir a máxima produção de energia com o mínimo de desperdício. O desenvolvimento contínuo das tecnologias relacionadas às células fotovoltaicas promete melhorar ainda mais a eficiência desses dispositivos, tornando a energia solar uma opção cada vez mais competitiva no mercado global (SANTOS; SILVA; OLIVEIRA, 2021, p. 5).

2.3 Sistema Off-Grid

O sistema Off-Grid, também conhecido como sistema isolado, é uma solução energética que opera de maneira independente, sem a necessidade de conexão com a rede elétrica pública, como é possível observar na Figura 3. Esses sistemas são alimentados exclusivamente por fontes de energia renováveis, como os painéis solares fotovoltaicos, e dependem de baterias para armazenar a energia gerada e fornecer eletricidade de forma contínua, mesmo quando a radiação solar não está disponível, como durante a noite ou em dias nublados (SANTOS, 2019). Em áreas remotas ou

regiões de difícil acesso, onde a infraestrutura elétrica convencional não chega, os sistemas Off-Grid se tornam uma solução eficiente e sustentável.

Figura 3 – Sistema *Off-grid*



Fonte: Portal do Sol (2025).

A principal vantagem dos sistemas Off-Grid é a autonomia energética que proporcionam, uma vez que não dependem da rede elétrica pública. De acordo com Nascimento e Alves (2017), esses sistemas são particularmente vantajosos para comunidades isoladas, como em áreas rurais ou em ilhas, onde a instalação de redes elétricas convencionais seria economicamente inviável. Além disso, esses sistemas oferecem uma fonte confiável de energia renovável, o que contribui para a redução da dependência de combustíveis fósseis e para a diminuição dos impactos ambientais associados ao uso de fontes de energia não renováveis.

Em sistemas Off-Grid, a determinação da capacidade do banco de baterias é crucial para assegurar a autonomia e a confiabilidade do fornecimento de energia. Inicialmente, calcula-se a energia de descarga diária pela equação 3:

$$Ed = P * t \quad (3)$$

onde:

- P é a potência da carga (W),
- t é o tempo de funcionamento (h).

Em seguida, obtém-se a energia total necessária, considerando as perdas do sistema, através da relação mostrada na equação 4:

$$Et = Ed * (1 + fp) \quad (4)$$

sendo:

- fp o fator de perda.

A capacidade da bateria em ampère-hora é determinada pela equação 5:

$$C_{bat} = \frac{Et * Nd}{V} \quad (5)$$

em que:

- Nd representa o número de dias de autonomia,
- V é a tensão do sistema.

Por fim, para considerar o limite de descarga segura da bateria, utiliza-se a expressão da equação 6:

$$C_{total} = \frac{C_{bat}}{DOD} \quad (6)$$

onde:

- DOD corresponde à profundidade máxima de descarga permitida.

Essa metodologia de dimensionamento garante que o sistema mantenha o fornecimento de energia mesmo durante períodos prolongados de baixa geração, assegurando a eficiência e a durabilidade do banco de baterias.

Contudo, a principal desvantagem dos sistemas Off-Grid está no custo inicial elevado, que inclui a compra de módulos fotovoltaicos, baterias e outros equipamentos necessários. Como observado por Da Rosa e Gasparin (2017), a instalação de sistemas Off-Grid pode ser financeiramente desafiadora para muitas comunidades, especialmente em locais onde o acesso a incentivos fiscais e subsídios para a instalação de sistemas solares é limitado. Nesse sentido, políticas públicas de incentivo à adoção de tecnologias renováveis podem desempenhar um papel crucial na viabilização desses sistemas em regiões mais carentes.

Além disso, a eficiência dos sistemas Off-Grid depende diretamente do dimensionamento correto do sistema fotovoltaico e das baterias. A escolha de baterias adequadas, com capacidade suficiente para armazenar energia durante os períodos sem sol, é fundamental para garantir o funcionamento contínuo do sistema. Santos (2019) enfatiza que a utilização de baterias de alta qualidade e a manutenção adequada das mesmas são aspectos essenciais para prolongar a vida útil do sistema e garantir a eficiência energética ao longo do tempo.

Por fim, o avanço das tecnologias de armazenamento de energia, como as baterias de íon de lítio, tem contribuído para a melhoria dos sistemas Off-Grid. Essas baterias são mais eficientes, duráveis e oferecem maior capacidade de armazenamento

em comparação com as baterias tradicionais, tornando os sistemas Off-Grid mais acessíveis e viáveis para um número maior de pessoas, especialmente em locais onde a rede elétrica não é uma opção viável (SILVA; ARAÚJO, 2022, p. 861).

2.3.1 Estocagem de Energia

A estocagem de energia desempenha um papel fundamental em sistemas Off-Grid, pois assegura o fornecimento contínuo de eletricidade, mesmo em períodos de baixa geração, como durante a noite ou em dias nublados. Segundo Souza e Silva (2018), a utilização de sistemas de armazenamento, como bancos de baterias, é essencial para garantir a autonomia energética e aumentar a confiabilidade dos sistemas isolados. Em projetos Off-Grid, o dimensionamento adequado do sistema de armazenamento é crucial para evitar interrupções no fornecimento de energia, protegendo cargas críticas e garantindo o funcionamento eficiente do sistema.

Além da garantia de fornecimento, a estocagem de energia permite a otimização do uso da geração renovável, evitando o desperdício da energia excedente produzida em horários de alta insolação. De acordo com Santos et al. (2020), a eficiência global de um sistema fotovoltaico isolado está diretamente ligada à capacidade de armazenar o excesso de energia para utilização posterior, o que maximiza o aproveitamento do recurso solar disponível. Dessa forma, o armazenamento contribui para tornar os sistemas Off-Grid mais sustentáveis e autossuficientes, aspectos essenciais principalmente em comunidades remotas e de difícil acesso.

Por fim, a escolha adequada do tipo de bateria e da tecnologia de armazenamento impacta diretamente a vida útil e o custo-benefício do sistema. De acordo com Tonin et al. (2017), fatores como a profundidade de descarga, a eficiência de carga e descarga, e a durabilidade dos sistemas de estocagem devem ser cuidadosamente avaliados no projeto de sistemas isolados. O avanço das tecnologias de baterias, como as de íon de lítio, tem ampliado as possibilidades de projetos mais compactos, duráveis e com maior capacidade de armazenamento, melhorando significativamente a eficiência e a viabilidade econômica dos sistemas Off-Grid modernos.

2.4 Transferência de Calor

A transferência de calor é o fenômeno pelo qual a energia térmica é transportada de um corpo ou sistema para outro devido a uma diferença de temperatura.

Segundo Bergman et al. (2018, p. 2), essa troca de energia ocorre essencialmente por três mecanismos: condução, convecção e irradiação, sendo fundamental em processos de aquecimento, resfriamento e geração de energia. A eficiência no controle térmico é especialmente importante em sistemas termoeletrônicos e fotovoltaicos, nos quais a gestão adequada do calor impacta diretamente no desempenho e na durabilidade dos dispositivos (SILVA, 2019).

A condução é caracterizada pela transferência de calor através da matéria, sem que haja movimentação macroscópica do material. Este processo é descrito pela Lei de Fourier, cuja expressão é dada pela equação 7:

$$Q = \frac{k \cdot A \cdot \Delta T \cdot t}{L} \quad (7)$$

onde:

- Q é a quantidade de calor transferida (J),
- k é a condutividade térmica do material (W/m·K),
- A é a área de transferência (m²),
- ΔT é a diferença de temperatura entre as superfícies (K ou °C),
- t é o tempo de transferência (s),
- L é a espessura do material (m).

A eficiência da condução térmica é determinante em sistemas de resfriamento termoeletrônicos, que dependem da rápida dissipação do calor para manter o funcionamento estável (LEGRAND, 2014).

A convecção refere-se à transferência de calor em fluidos em movimento, combinando a difusão térmica das partículas com o transporte do fluido propriamente dito. Esse mecanismo é particularmente relevante em sistemas que utilizam líquidos ou gases para promover a troca térmica, como sistemas de ventilação e resfriamento ativo. Conforme destaca Ventas (2014, p. 5), o controle da convecção é essencial para assegurar a eficiência térmica, especialmente em aplicações que exigem o resfriamento contínuo de módulos eletrônicos ou termoeletrônicos.

Já a irradiação consiste na transferência de calor por meio da emissão de ondas eletromagnéticas, não necessitando de um meio material para ocorrer. Trata-se de um mecanismo dominante em ambientes onde a condução e a convecção são limitadas, como no espaço ou em sistemas isolados termicamente. Em dispositivos termoeletrônicos,

a gestão da irradiação é necessária para minimizar perdas energéticas e garantir que o calor gerado seja dissipado de maneira controlada (ALVES, 2017).

O domínio dos processos de condução, convecção e irradiação é essencial para o projeto de dispositivos mais eficientes e sustentáveis. A integração de estratégias de otimização térmica permite não apenas melhorar a performance dos sistemas termoelétricos, mas também reduzir o consumo energético e o impacto ambiental associado (RODRÍGUEZ, 2014).

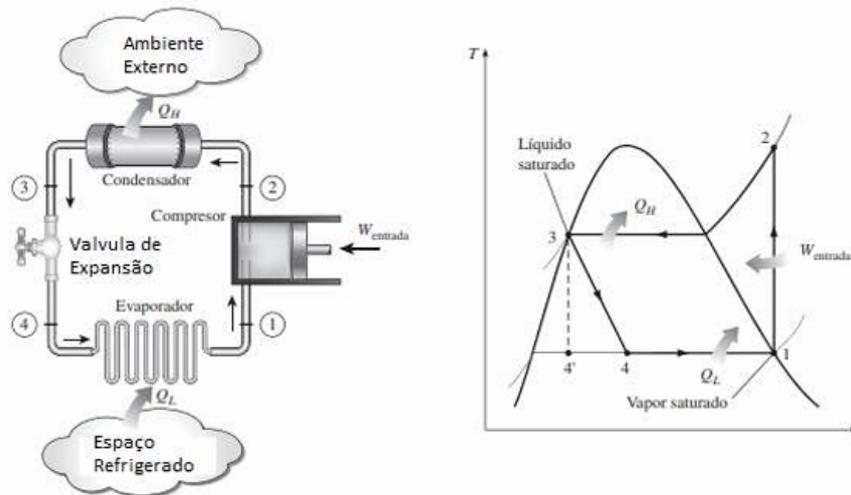
Em sistemas como geladeiras termoelétricas, o controle preciso da transferência de calor determina a estabilidade da temperatura interna e o consumo de energia do aparelho. Como resalta Legrand (2014), a eficiência energética desses dispositivos depende diretamente do equilíbrio entre os diferentes mecanismos de transferência térmica.

Assim, compreender e aplicar os conceitos de transferência de calor é um requisito fundamental para a inovação tecnológica em sistemas de resfriamento e geração de energia. A pesquisa e o desenvolvimento de novas soluções que potencializem a condução, otimizem a convecção e minimizem as perdas por irradiação são passos indispensáveis para atender às demandas de eficiência e sustentabilidade da engenharia contemporânea (SILVA, 2019).

2.5 Sistemas de Refrigeração

O sistema convencional de refrigeração baseado no ciclo de compressão de vapor é um dos métodos mais empregados tanto em aplicações domésticas quanto industriais, reconhecido por sua eficiência e confiabilidade. Esse ciclo termodinâmico é composto por quatro etapas principais: compressão, condensação, expansão e evaporação que pode ser visto na Figura 4, onde é ilustrado o funcionamento do ciclo de compressão de vapor, bem como seu respectivo diagrama temperatura-entropia (T-s).

Figura 4 - Ciclo Ideal de Compressão a Vapor e diagrama T – s



Fonte: Matsuda (2022).

O processo tem início no compressor, onde o fluido refrigerante, inicialmente em estado gasoso e de baixa pressão, é comprimido, elevando-se sua temperatura e pressão. O gás superaquecido é então conduzido ao condensador, onde ocorre a troca de calor com o ambiente externo. Nesse estágio, o refrigerante libera calor e sofre condensação, transformando-se em líquido sob alta pressão (STOECKER; JONES, 1985; BERGMAN et al., 2018, p. 667).

Em seguida, o líquido refrigerante atravessa uma válvula de expansão, na qual sua pressão e temperatura caem de forma abrupta. Como resultado, forma-se uma mistura de líquido e vapor que ingressa no evaporador. É nesse componente que o refrigerante absorve calor do espaço refrigerado, evaporando-se completamente e retornando ao estado gasoso. Esse processo de absorção de energia térmica é o mecanismo essencial que promove o resfriamento do ambiente interno do sistema. O refrigerante gasoso retorna ao compressor, reiniciando o ciclo continuamente e de forma controlada (BERGMAN et al., 2018, p. 668–669).

Entre os componentes do ciclo, o compressor se destaca como o principal responsável pelo consumo de energia elétrica. Em sistemas convencionais equipados com compressores de velocidade fixa, o controle da temperatura é realizado por meio do acionamento intermitente do motor. O compressor é ativado sempre que a temperatura interna ultrapassa o valor de referência e desligado quando o ambiente atinge a condição desejada. Embora funcional, essa estratégia acarreta operação constante em plena carga, independentemente da real demanda térmica, o que pode resultar em desperdício de energia e oscilações na temperatura interna (MENDES et al., 2020; PITA, 2001).

Para otimizar a eficiência energética, surgiram tecnologias como os compressores de velocidade variável, também denominados compressores inverter. Diferentemente dos modelos tradicionais, esses dispositivos ajustam sua velocidade de operação em função da carga térmica, promovendo um controle mais preciso da temperatura e reduzindo o consumo de energia. De acordo com a ASHRAE (2014), a utilização dessa tecnologia proporciona ganhos expressivos em eficiência, além de favorecer maior durabilidade dos componentes e operação mais silenciosa. Assim, a evolução dos sistemas de refrigeração aponta para soluções que conciliam alto desempenho térmico e responsabilidade energética.

2.5.1 Controle de Temperatura em Refrigeração por Compressão de Vapor

O controle de temperatura é uma variável essencial nos sistemas de refrigeração, particularmente em dispositivos como geladeiras. Em sistemas de compressão de vapor, o vapor refrigerante é comprimido e expandido para promover a troca de calor, garantindo que a temperatura interna do equipamento permaneça dentro dos limites desejados. O controle preciso dessa temperatura assegura a eficiência e o bom desempenho do sistema de refrigeração.

Tradicionalmente, o controle térmico em geladeiras é feito por meio de termostatos no modo "on/off", que acionam o compressor quando a temperatura interna foge dos parâmetros preestabelecidos. Contudo, tecnologias mais recentes, como a tecnologia INVERTER, têm sido integradas para otimizar o controle térmico. Essa tecnologia possibilita a modulação contínua da velocidade do compressor, ajustando-se dinamicamente às variações de carga térmica, o que contribui para a redução do consumo energético e melhora na estabilidade da temperatura.

De acordo com Rodrigues (2021), a tecnologia INVERTER reduz significativamente o número de ciclos de liga/desliga do compressor, promovendo maior eficiência energética e maior durabilidade do sistema. A modulação contínua do compressor permite uma resposta mais eficiente a flutuações de temperatura, proporcionando um controle mais preciso.

Outro aspecto crítico no controle de temperatura em sistemas de compressão de vapor é a dissipação térmica. O condensador, onde ocorre a troca de calor do sistema, precisa ser eficiente para evitar o superaquecimento. A escolha de materiais com alta condutividade térmica para os dissipadores de calor é fundamental, pois garante que o calor gerado seja adequadamente removido, aumentando a eficiência do sistema (Moura

e Almeida, 2014). O desempenho do sistema também é diretamente influenciado pela capacidade de dissipação térmica, a qual pode ser dimensionada pela equação 8:

$$M = \frac{Q_{total}}{\lambda} \quad (8)$$

em que:

- M é a massa do material (kg),
- Q_{total} é a quantidade total de calor (J),
- λ é o calor latente do material utilizado (J/kg).

Esse cálculo é crucial para o dimensionamento correto dos componentes de dissipação, garantindo o funcionamento estável e eficiente do sistema. Portanto, o controle eficiente da temperatura, aliado à dissipação térmica adequada e à aplicação de tecnologias como o INVERTER, são fundamentais para o desenvolvimento de sistemas de refrigeração mais eficientes e sustentáveis.

2.5.2 Geladeira por Compressão de Vapor

O sistema de refrigeração por compressão de vapor tem sido amplamente utilizado em geladeiras residenciais e comerciais. Este sistema, embora eficaz, apresenta desafios em termos de eficiência energética e impacto ambiental. A crescente demanda por soluções mais sustentáveis evidencia a necessidade de otimizar esses sistemas, principalmente em relação ao custo elevado de baterias, à curta vida útil desses componentes e aos problemas ambientais associados ao uso de fluidos refrigerantes e à substituição constante de equipamentos.

Em termos de estocagem de energia, algumas pesquisas têm explorado alternativas como a utilização de estocagem de gelo, que oferece uma solução para mitigar os desafios do consumo energético e da durabilidade dos componentes. A estocagem de gelo funciona como um mecanismo de acumulação de frio durante períodos de baixa demanda energética, permitindo reduzir o consumo de energia nos horários de pico. Segundo Zhang et al. (2019), a estocagem de gelo tem sido utilizada em sistemas de refrigeração para melhorar a eficiência energética, possibilitando o uso mais otimizado da energia e reduzindo a necessidade de picos de consumo.

O custo de baterias e o impacto ambiental das tecnologias de armazenamento de energia são identificados como questões relevantes em sistemas de refrigeração que utilizam fontes alternativas, como as baterias de lítio. Este tipo de

armazenamento apresenta custos elevados e vida útil limitada. Além disso, o descarte inadequado dessas baterias pode resultar em impactos ambientais, devido aos materiais tóxicos presentes em sua composição (MILLER et al., 2020). Como alternativa, Pokhrel et al. (2020) recomendam o uso de armazenamento térmico por gelo em vez de sistemas de baterias, destacando o menor custo de investimento, a maior economia operacional e o período de retorno reduzido.

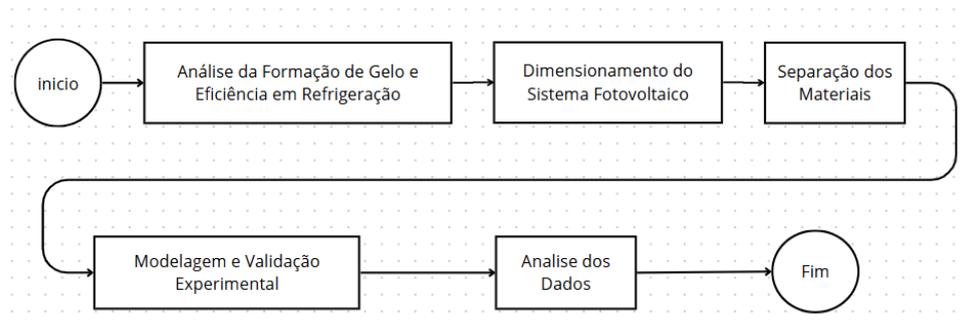
De forma complementar, Xu et al. (2018) relatam resultados experimentais positivos ao substituir bancos de baterias por sistemas de estocagem de gelo no processo de armazenamento de energia, evidenciando o potencial dessa abordagem em sistemas de refrigeração alimentados por fontes renováveis. Pesquisas recentes, como as de Kumar et al. (2018), apontam que a combinação de sistemas de compressão de vapor com tecnologias de estocagem de gelo pode aumentar a eficiência dos sistemas, além de contribuir para a redução dos custos operacionais e dos impactos ambientais.

Portanto, embora o sistema de compressão de vapor continue sendo a escolha predominante em muitas aplicações, o desenvolvimento de soluções alternativas como a estocagem de gelo apresenta potencial para transformar o mercado, oferecendo uma abordagem mais sustentável e eficiente para sistemas de refrigeração.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia utilizada para a execução do trabalho pode ser vista no fluxograma da Figura 5.

Figura 5 – Fluxograma da metodologia implementada.



Fonte: Próprio autor (2025).

3.1 Análise da Formação de Gelo e Eficiência em Refrigeração

3.1.1 Caracterização da geladeira

Com o objetivo de calcular a formação de gelo e as perdas térmicas do refrigerador inicialmente foi necessário descrever o refrigerador usado para o trabalho, que consiste em um refrigerador da marca CONSUL modelo CRC12ABBNA, com capacidade para 120 L e potência nominal de 65W, e foi dividido em 2 (duas) partes sendo a primeira o congelador e a segunda o refrigerador como apresentado na Figura 6:

Figura 6 – Geladeira da marca Consul: 1- congelador; 2 – refrigerador.



Fonte: Próprio Autor (2025).

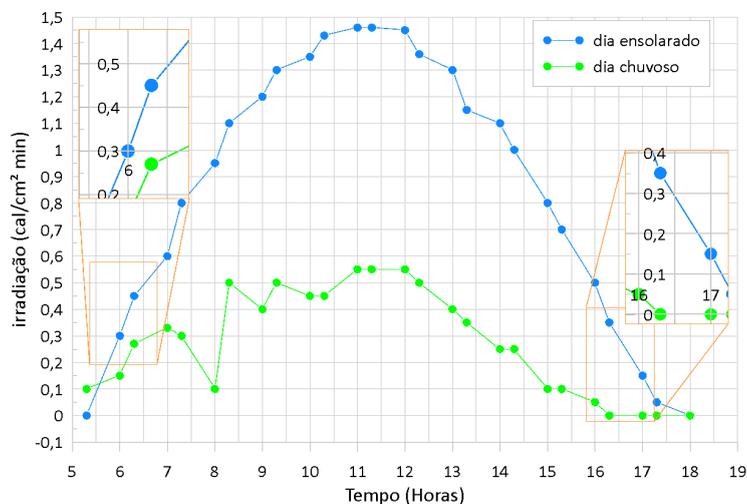
3.1.2 Cálculo da Perda de Calor (Q)

Com base nos valores e nas curvas de irradiação solar da Paraíba Figura 7, tanto em dias ensolarados quanto em dias chuvosos, foi possível calcular a quantidade média de irradiação disponível ao longo do dia. As curvas foram ajustadas no software Origin, permitindo a obtenção das equações correspondentes e o cálculo da área sob cada curva, o que representa a energia solar incidente diária.

A partir dessa análise, identificou-se o intervalo de tempo em que a irradiação solar atinge níveis suficientes para possibilitar a geração de energia elétrica necessária ao funcionamento de um refrigerador.

Com base na disponibilidade energética estimada nesse intervalo e considerando o superdimensionamento dos painéis solares, foi possível realizar o dimensionamento do sistema fotovoltaico. O objetivo foi garantir o suprimento contínuo da potência exigida pelo refrigerador, que opera com potência máxima durante o intervalo mencionado.

Figura 7 – Irradiação solar da Paraíba.



Fonte: Estação solarimétrica UFPB (Adaptada 2025).

A quantificação das perdas térmicas no refrigerador é fundamental para a modelagem energética do sistema, permitindo estimar a demanda de resfriamento necessária para manter o desempenho dentro dos parâmetros operacionais estabelecidos. Essa análise fornece a base para o dimensionamento dos componentes de armazenamento térmico, contribuindo para a eficiência do sistema como um todo.

Para esse procedimento, foram calculadas as perdas térmicas individuais tanto do congelador quanto do compartimento refrigerado. Consideraram-se as propriedades térmicas dos materiais, a área de transferência de calor, a diferença de temperatura entre os ambientes e a espessura das paredes isolantes. Após a obtenção dos valores correspondentes a cada componente, foi realizada a soma das perdas térmicas parciais, resultando na determinação da perda térmica total do sistema.

Esse valor agregado é essencial para o correto dimensionamento da massa de gelo necessária, assegurando a capacidade do refrigerador de operar em condições de autonomia térmica, especialmente durante períodos em que a alimentação elétrica não esteja disponível.

3.1.3 Cálculo da Massa de Gelo Necessária

A quantificação das perdas térmicas no refrigerador é uma etapa fundamental para a modelagem energética do sistema, permitindo a estimativa das demandas de resfriamento. A partir do cálculo das perdas térmicas individuais do congelador e do refrigerador, foi possível determinar a perda total do sistema. Esse procedimento é essencial para estabelecer a quantidade de energia necessária para compensar as perdas condutivas e assegurar a manutenção das condições termodinâmicas dentro dos parâmetros de projeto.

Com as perdas térmicas totais conhecidas, procedeu-se à estimativa da massa de gelo necessária para garantir a autonomia térmica do sistema durante o período noturno, quando o funcionamento passivo se torna predominante. A determinação dessa massa considerou a energia exigida para a fusão do gelo, com base nas propriedades térmicas da água. Esse cálculo é de grande relevância para assegurar a eficiência operacional do refrigerador em condições de ausência de alimentação elétrica.

O conhecimento preciso da massa de gelo necessária permite otimizar o dimensionamento dos elementos de armazenamento térmico, contribuindo para a estabilidade térmica do sistema. Essa estratégia viabiliza a operação contínua do refrigerador sem comprometer a conservação dos produtos armazenados, mesmo durante períodos em que a geração de energia não é possível.

3.2 Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico

O dimensionamento do sistema fotovoltaico constitui uma etapa decisiva para o sucesso da implementação de soluções energéticas sustentáveis em áreas sem

acesso à rede elétrica convencional. Esse processo exige a consideração rigorosa da demanda energética, das condições climáticas locais e das características técnicas dos componentes utilizados, sempre em conformidade com as normas aplicáveis ao setor.

O primeiro passo consistiu no levantamento detalhado da demanda energética, com a identificação dos equipamentos que seriam alimentados e o levantamento de suas respectivas potências e tempos médios de funcionamento. Neste estudo, o sistema foi dimensionado para atender exclusivamente uma geladeira com potência de 65 W, operando continuamente, em regime de 24 horas por dia.

O consumo energético diário da carga foi calculado e, a partir desse valor, considerou-se uma margem adicional para cobrir perdas intrínsecas ao sistema, como aquelas associadas à conversão de energia, resistência dos cabos e sujeira nos módulos. Em seguida, dimensionou-se a capacidade do banco de baterias, levando-se em conta dois dias de autonomia e respeitando a profundidade de descarga adequada para baterias chumbo-ácido, que não devem ser descarregadas além de 50% para preservar sua vida útil.

A potência necessária dos painéis solares foi estimada a partir da energia diária requerida e da média de horas de sol pleno do local de instalação. Com o objetivo de assegurar a confiabilidade do sistema, uma margem adicional foi aplicada para compensar perdas diversas, como variações de temperatura e inclinação inadequada dos módulos. O dimensionamento do controlador de carga e a escolha do inversor também seguiram critérios técnicos, buscando assegurar a eficiência e a segurança operacional do sistema.

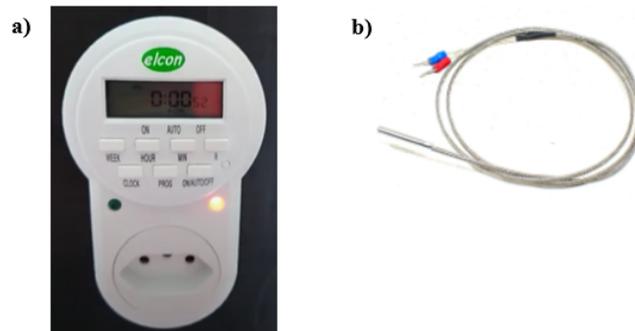
Finalmente, a seleção dos componentes complementares, como cabos, conectores e suportes, foi realizada de modo a garantir a durabilidade e o desempenho do sistema fotovoltaico, promovendo sua operação segura e eficiente durante todo o seu ciclo de vida útil.

3.3 Separação dos Materiais

Além do refrigerador apresentado na Figura 6, o sistema experimental incorporou um temporizador programável da marca Elcon, modelo TM-22, utilizado para simular o funcionamento de painéis fotovoltaicos durante o período de insolação, estimado em 10 horas diárias, pois não houve recursos para comprar o sistema fotovoltaico, devidamente conectado à rede elétrica (Figura 8a), em conjunto com sensores de temperatura PT100, para monitoramento térmico contínuo (Figura 8b).

Foram utilizados recipientes para armazenamento de água Figura 9, garantindo o controle das variáveis térmicas ao longo dos ensaios e juntamente com os termopares um sistema de aquisição de dados formado por um Spider8, o qual foi acoplado a um notebook marca: *TOSHIBA* Figura 10, para coletar e armazenar de dados.

Figura 8 – Conjunto de monitoramento: a) Temporizador; b) Sensor PT100



Fonte: Próprio Autor (2025).

Figura 9 – Recipientes para armazenamento de gelo



Fonte: Próprio Autor (2025).

Figura 10 – Sistema de aquisição de dados



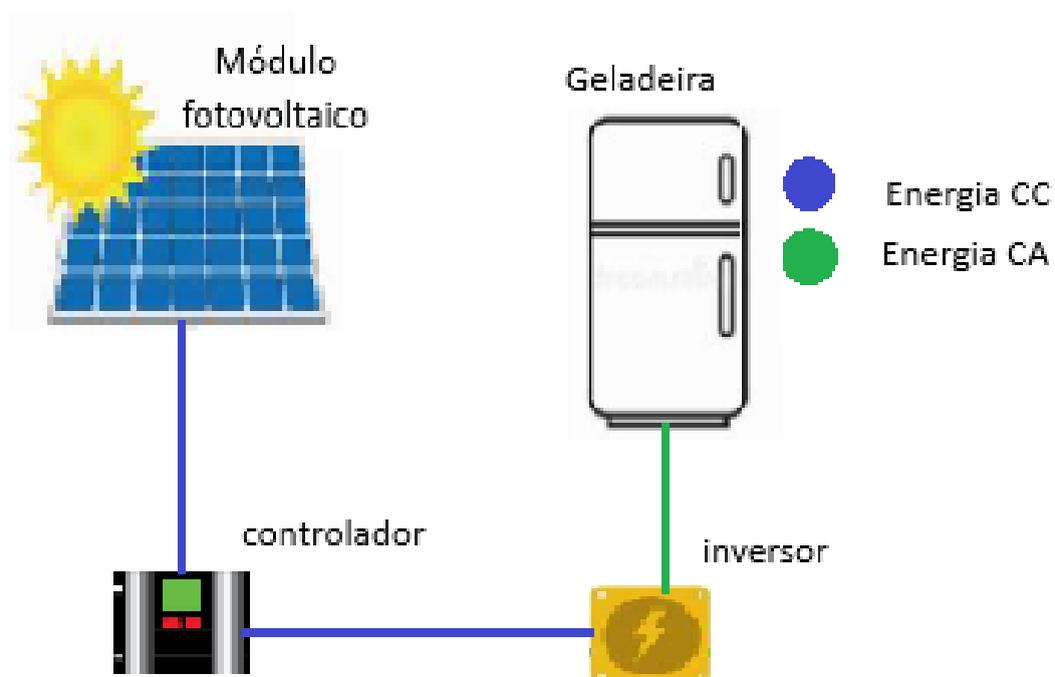
Fonte: Próprio Autor (2025).

3.4 Construção e Validação Experimental

3.4.1 Construção do sistema

A construção do sistema proposto foi concebida com o objetivo de emular um sistema de geração fotovoltaica autônomo Figura 11 , composto por painéis solares, inversor, controlador de carga e um refrigerador como carga principal. Para essa simulação, utilizou-se um temporizador programável Figura 8a), conectado à rede elétrica convencional, cuja função foi emular o funcionamento da fonte solar. O temporizador foi configurado para ativar o sistema no início do dia, simulando o nascer do sol, e desativá-lo ao final da tarde, representando o pôr do sol.

Figura 11: sistema de geração fotovoltaica autônomo



Fonte: Próprio Autor (2025).

O refrigerador utilizado no experimento foi monitorado por meio de sensores de temperatura PT100 (Figura 8b), posicionados na primeira fase dos testes estrategicamente: o primeiro no interior do compartimento do congelador, o segundo na parte inferior interna do refrigerador, e o terceiro em um ambiente controlado.

Já na segunda fase dos testes: o primeiro foi colocado no interior do compartimento do congelador (fora do gelo), o segundo foi adicionado em um recipiente

cheio de água dentro do congelador, o terceiro na parte inferior interna do refrigerador dentro de outro recipiente cheio de água, e o quarto no ambiente controlado.

Esses sensores foram conectados a um sistema de aquisição de dados Spider8, o qual foi acoplado a um notebook marca: *TOSHIBA* Figura 10, operando com o software Catman. Esse programa foi responsável pela coleta, processamento e organização dos dados obtidos, armazenando-os em planilhas no formato Excel, viabilizando, assim, a análise dos parâmetros térmicos ao longo do ciclo diário de operação do sistema simulado.

3.4.2 Coleta dos Dados

Com base nos cálculos prévios referentes às perdas térmicas e à massa de gelo necessária para manter as condições internas do sistema, os valores obtidos foram utilizados como referência para a condução dos ensaios experimentais. Para essa etapa, adotou-se o uso de três configurações distintas de massa de gelo, representadas por garrafas plásticas preenchidas com aproximadamente 800 gramas de água cada. Foram realizados três testes com duração de 48 horas cada.

No primeiro teste, empregaram-se duas garrafas, totalizando uma massa de 1600 g de gelo. No segundo, utilizaram-se três garrafas, com massa total de 2400 g. Por fim, no terceiro teste, quatro garrafas foram utilizadas, correspondendo a 3200 g de gelo. Em todos os ensaios, o sistema operou com um ciclo composto por 10 horas de resfriamento seguido por 14 horas de aquecimento, registrando as temperaturas de minuto a minuto, de modo a simular as condições reais de funcionamento e avaliar a eficiência térmica do sistema frente às diferentes quantidades de massa de gelo armazenada.

Posteriormente foi realizado um quarto teste, este por sua vez simulando um refrigerador em uso diário com recipientes espalhados pelo seu interior apresentados na Tabela 01 mostrados na Figura 12.

Tabela 01 – Medições de gelo e água no congelador e geladeira

Local	Item	Peso Total (g)	Recipiente (g)	Massa de água (g)
Congelador	Bandeja com o PT 100	1724	291	1433
Congelador	Garrafa	780	33	747
Congelador	Total Congelador	-	-	2180
Geladeira	Garrafa 1	802	33	769
Geladeira	Garrafa 2	748	33	715
Geladeira	Lata 1	497	8	489
Geladeira	Lata 1	497	8	489
Geladeira	Garrafão	2600	101	2499
Geladeira	Total Geladeira	-	-	4961
Total Geral				7141

Fonte: Próprio Autor (2025).

Figura 12 - Recipientes instalados no interior da geladeira



Fonte: Próprio Autor (2025).

3.4.3 Tratamento dos Dados

Os dados obtidos por meio do software Catman foram exportados em formato .xlsx e posteriormente abertos no Microsoft Excel, onde passaram por um processo de formatação e organização. Após essa etapa, os dados foram importados para o software Grapher, utilizado para a construção dos gráficos de temperatura em função do tempo. Esses gráficos permitiram a comparação entre os valores estimados durante a fase de planejamento e os valores registrados experimentalmente, possibilitando uma análise mais precisa do comportamento térmico do sistema em estudo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise da Formação de Gelo e Eficiência em Refrigeração

4.1.1 Perda de calor

Com base nas curvas de irradiação solar medidas no estado da Paraíba Figura 7, obtidas em dias tipicamente ensolarados e chuvosos, determinou-se a irradiância média diária disponível ao longo do período de operação. Para tanto, empregou-se o software Grapher para extração dos valores de irradiância nos instantes correspondentes ao início e ao término de cada dia útil, que de acordo com o Figura 08 foram escolhidos os horários aproximados de 6:30 às 16:30, pois são horários que mesmo sendo extremos possuem valores acima de 200W/m^2 de irradiação em dia de sol, que é um valor que possibilita o acionamento da geladeira.

O cálculo da transferência de calor por condução foi realizado com base na equação onde para o congelador e para o refrigerador foram considerados os seguintes parâmetros: k representa a condutividade térmica do material ($\text{W/m}\cdot\text{K}$), A é a área de transferência de calor (m^2), ΔT é a diferença de temperatura entre as faces do material (K), t é o tempo de exposição (s) que representa as 14 horas (50400s) do equipamento fora da rede elétrica, e d é a espessura do material ($0,03\text{m}$). Com isso, para o congelador tem-se a equação 9:

$$Q_{\text{cong}} = (0,02 \cdot 0,33 \cdot 20 \cdot 50400) / 0,03 \quad (9)$$

Enquanto que para o refrigerador a perda de calor é descrita pela equação 10:

$$Q_{\text{refri}} = (0,02 \cdot 1,67 \cdot 15 \cdot 50400) / 0,03 \quad (10)$$

Na Tabela 02 é apresentado os valores das perdas térmicas em relação às partições da geladeira, além da perda total do equipamento que é calculado pela equação 11:

$$Q_{\text{total}} = Q_{\text{cong}} + Q_{\text{refri}} = 221.760 + 841.680 \quad (11)$$

Tabela 02 – Resultados dos cálculos das Perdas de Calor em função das partições

Partições	Perdas térmicas (J)
congelador	221.760
refrigerador	841.680
Perda total	1.063.440

Fonte: Próprio autor (2025).

A perda de calor do refrigerador é maior que a do congelador devido a sua área ser maior, além do valor de delta T ser menor, o que impacta diretamente no resultado dos mesmos.

4.1.2 Cálculo da Massa de Gelo Necessária

Obtido o valor de Q total, ou seja, da perda térmica total da geladeira, tomando como valor da energia de fusão do gelo (λ) sendo 334.000J, foi calculado a massa de gelo segundo a equação 12.

$$m = Q_{\text{total}} / \lambda = 1.063.440 / 334.000 \approx 3,18 \text{ kg} \quad (12)$$

Para compensar a perda térmica durante o período noturno de 14 horas sem energia elétrica, a geladeira requer aproximadamente 3,18 kg de gelo.

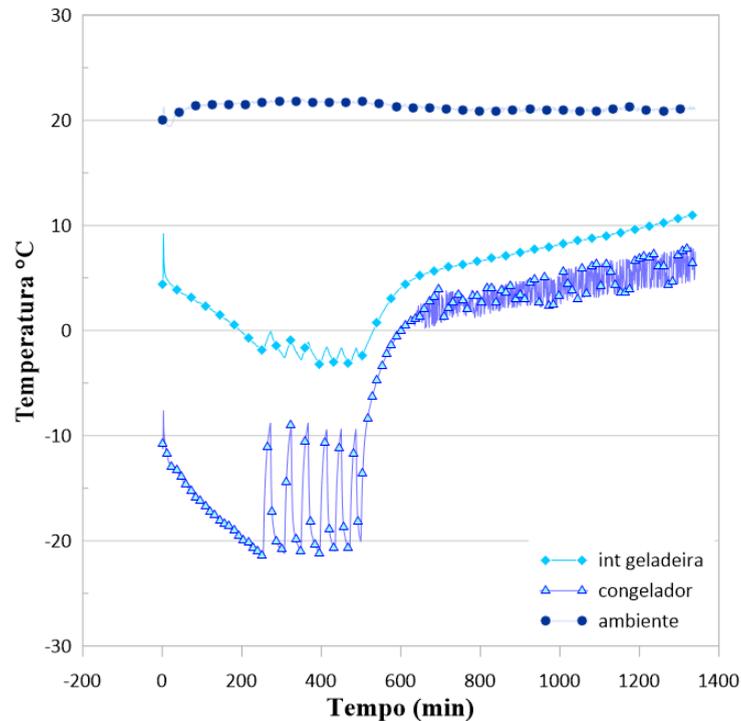
Esse valor pode ser obtido com cerca de alguns pequenos reservatórios de água congelada nas laterais do congelador, posicionadas no interior da geladeira para manter sua eficiência térmica.

4.2 Análise dos dados recebidos

Com o sistema de simulação plenamente operante, foram realizados os testes experimentais. No primeiro ensaio, empregaram-se duas garrafas de água, totalizando aproximadamente 1,6 kg de gelo. O acionamento do refrigerador ocorreu às 6h30, e, após 10 horas de operação contínua (às 16h30), a temperatura interna da câmara atingiu -2,1 °C, enquanto o compartimento do congelador alcançou -19 °C. A temperatura ambiente no período foi de 21 °C, evidenciando a eficiência do sistema na formação de gelo. Durante as 14 horas seguintes sem fornecimento de energia elétrica, observou-se o aumento gradual da temperatura interna, que atingiu 7,49 °C às 6h30 do

dia seguinte, ultrapassando ligeiramente o limite de 7 °. Como pode ser visto na Figura 13.

Figura 13 – Dados do primeiro dia de coleta de dados (2 garrafas).

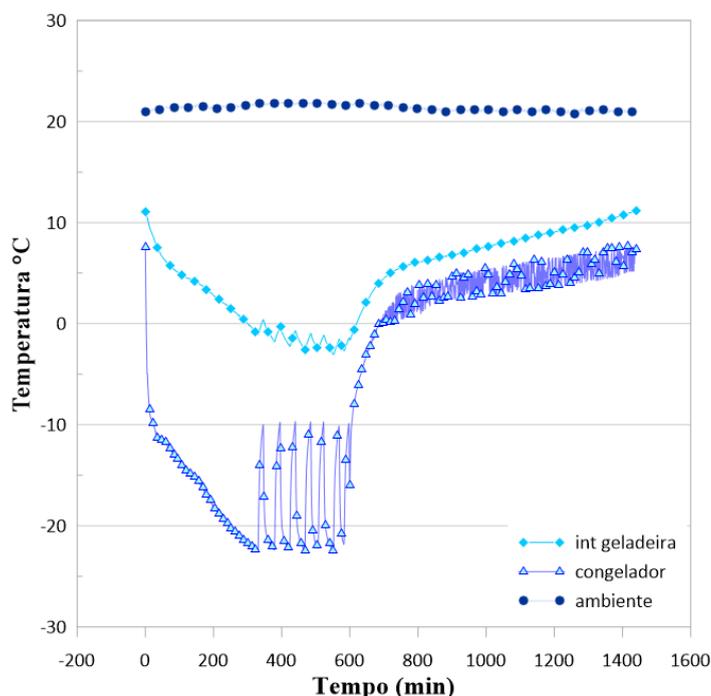


Fonte: Próprio Autor (2025).

Verifica-se que, ao atingir a temperatura mínima de -21°C no compartimento de congelamento, o sistema de controle automático do refrigerador ativa um mecanismo de regulação térmica que permite a elevação gradual da temperatura até cerca de -10°C , momento em que um novo ciclo de resfriamento é iniciado.

No segundo dia de ensaio, o sistema iniciou seu ciclo a partir de uma temperatura interna de $7,49^{\circ}\text{C}$ às 6h30. Após 10 horas de funcionamento, a temperatura foi reduzida para -21°C às 16h30. Ao término do período subsequente de 14 horas sem alimentação elétrica, às 6h30 do dia seguinte, registrou-se uma temperatura de $7,28^{\circ}\text{C}$, conforme ilustrado na Figura 14. Mais uma vez, observa-se que o valor se manteve próximo do limite de 7°C .

Figura 14 – Dados do segundo dia de coleta de dados (2 garrafas).



Fonte: Próprio Autor (2025).

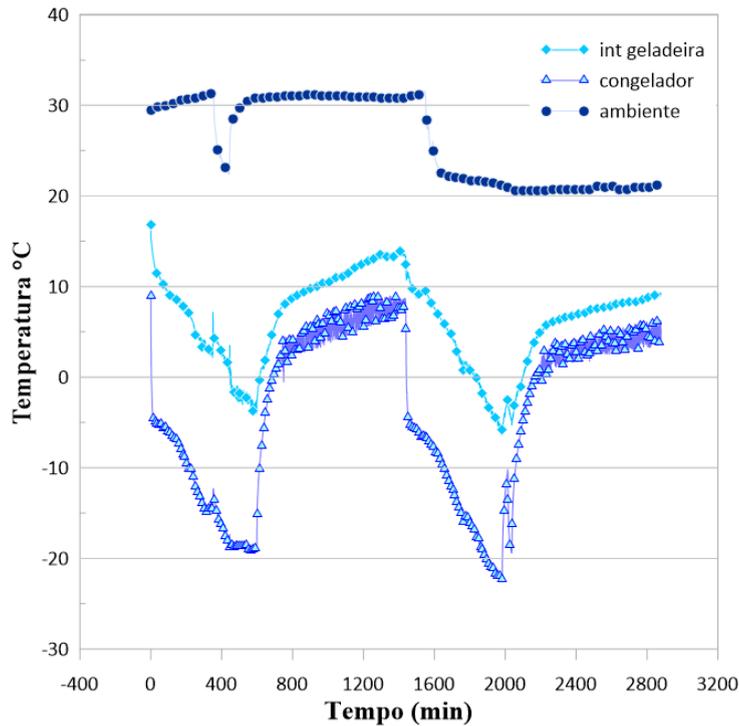
Verifica-se também que, ao atingir a temperatura mínima de -21°C no compartimento de congelamento, o sistema de controle automático do refrigerador ativa um mecanismo de regulação térmica que permite a elevação gradual da temperatura até cerca de -10°C , momento em que um novo ciclo de resfriamento é iniciado.

Em um experimento conduzido com três garrafas contendo aproximadamente 2,4 kg de gelo, o sistema foi submetido a condições ambientais adversas, com o primeiro dia do teste apresentando uma temperatura ambiente de 30°C . Após 10 horas de resfriamento, a temperatura interna alcançou $-2,6^{\circ}\text{C}$, enquanto a temperatura do freezer foi registrada a $-15,2^{\circ}\text{C}$, resultando na formação de uma quantidade de gelo superior à observada no teste anterior. Contudo, durante o pico de aquecimento, a temperatura do freezer subiu para $8,6^{\circ}\text{C}$, ultrapassando a marca de 8°C . Esse aumento de temperatura pode ser atribuído à maior incidência de calor externo.

No segundo ciclo do experimento, realizado sob uma temperatura ambiente reduzida para 21°C , o sistema partiu de uma temperatura interna de $8,6^{\circ}\text{C}$ pela manhã.

Após o processo de resfriamento, às 16h30, a temperatura interna atingiu -19°C . No término do ciclo de aquecimento, às 6h30 do dia seguinte, a temperatura estabilizou-se em 5°C . Esses resultados indicam que o sistema com três garrafas é eficaz em condições de temperatura ambiente moderada, mas se revela insuficiente quando exposto a temperaturas externas elevadas, conforme ilustrado na Figura 15.

Figura 15 – Dados das 48 horas da coleta de dados (3 garrafas).



Fonte: Próprio Autor (2025).

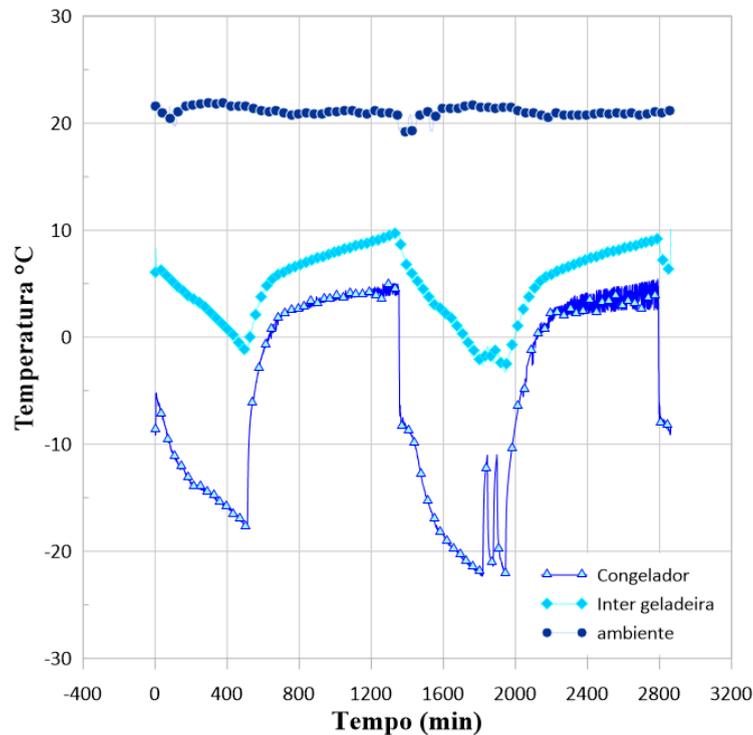
Nota-se também que novamente o controlador de temperatura da geladeira não permite que seu congelador atinja valores menores que -22°C subindo para -10°C e resfriando novamente.

O teste realizado com quatro garrafas, contendo aproximadamente 3,2 kg de gelo, teve início às 6h30, com uma temperatura ambiente de $21,6^{\circ}\text{C}$. Após 10 horas de resfriamento, a temperatura interna da câmara foi registrada em $-1,4^{\circ}\text{C}$, enquanto a temperatura do freezer atingiu $-17,7^{\circ}\text{C}$. Ao final do ciclo de aquecimento, às 6h30 do dia seguinte, a temperatura interna estabilizou-se em $4,3^{\circ}\text{C}$.

No segundo dia de teste, partindo de $4,3^{\circ}\text{C}$, o sistema foi submetido ao processo de resfriamento, alcançando -22°C . Ao término de 14 horas sem fornecimento de energia, a temperatura interna manteve-se em $4,7^{\circ}\text{C}$. Essa configuração demonstrou a

maior estabilidade térmica entre os testes realizados, conseguindo manter a temperatura consistentemente abaixo de 5°C, mesmo diante de variações nas condições ambientais, conforme ilustrado na Figura 16.

Figura 16 – Dados das 48 horas da coleta de dados (4 garrafas).



Fonte: Próprio Autor (2025).

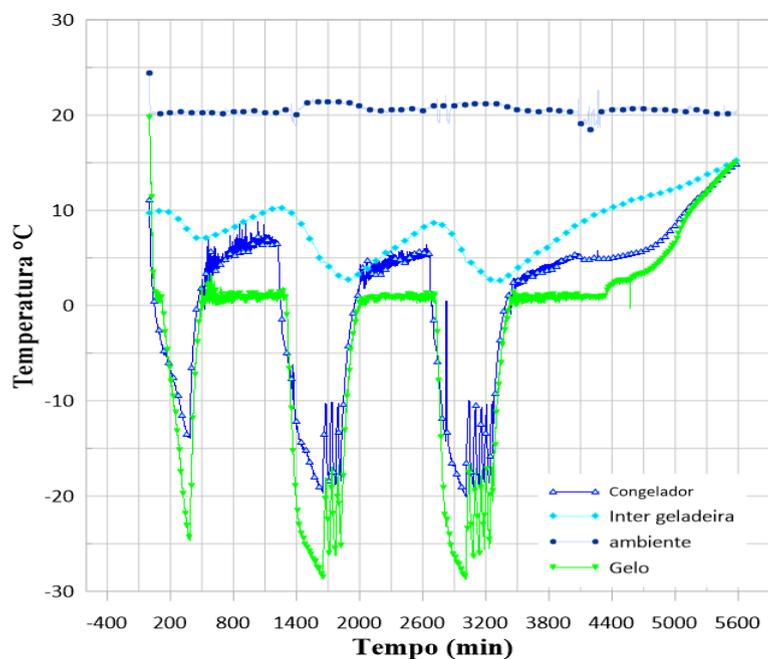
Os resultados obtidos indicam uma relação direta entre a massa de gelo e a eficiência térmica do sistema, conforme descrito a seguir:

- 2 garrafas: Mantêm a temperatura próxima de 7°C, embora com leve excedência em ambos os ciclos realizados.
- 3 garrafas: Apresentam desempenho satisfatório em condições moderadas, com temperatura interna de aproximadamente 5°C, mas mostram-se inadequadas sob temperaturas externas elevadas, resultando em uma temperatura interna de cerca de 8°C.
- 4 garrafas: Demonstram o melhor desempenho global, mantendo temperaturas internas consistentemente inferiores a 5°C em todos os cenários testados.

Portanto, para garantir a segurança alimentar durante o período de utilização do sistema, recomenda-se a utilização de pelo menos três a quatro garrafas, com massas variando entre 2,4 e 3,2 kg de gelo, no compartimento do freezer.

Com a obtenção dos primeiros resultados experimentais e a constatação de sua consonância com os dados teóricos, realizou-se um novo ensaio, com parâmetros mais representativos das condições de uso de refrigeradores domésticos. Para tal, distribuiu-se volumes adicionais de fluido tanto no compartimento do congelador quanto na seção inferior do equipamento posicionados como indicados no tópico 3.4.1. Foi então realizado um experimento de 93 horas de duração onde foram simulados dois dias e meio de sol e um dia e meio sem fornecimento de energia ao sistema, como mostrado na Figura 17.

Figura 17- Quarto experimento completo (93 horas)

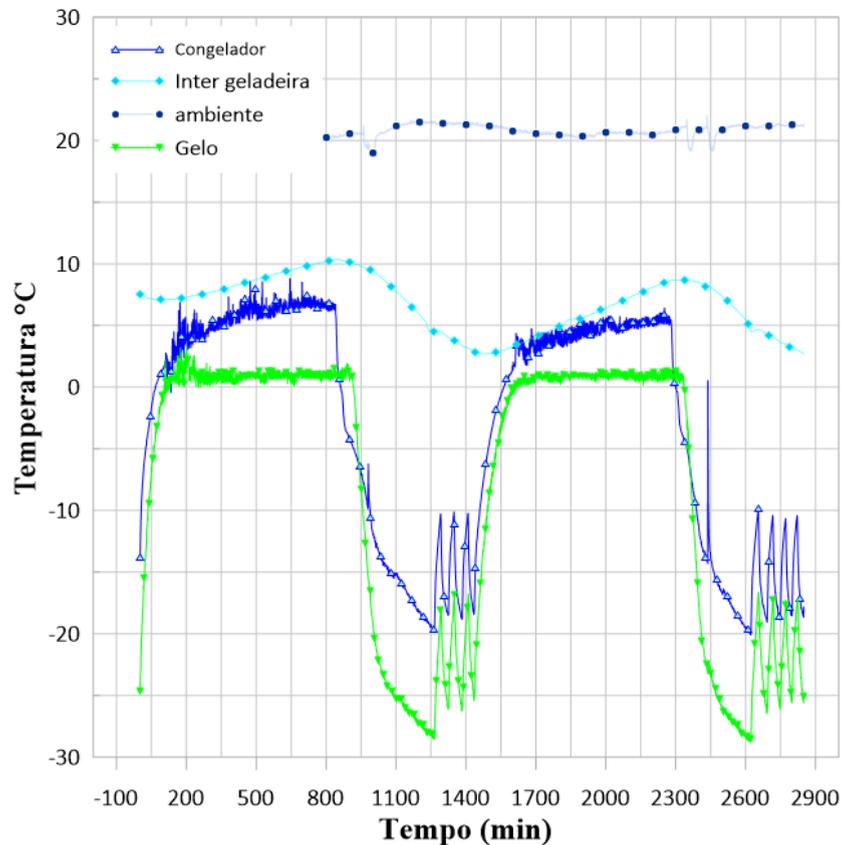


Fonte: Próprio Autor (2025).

Como pode ser observado na Figura 18, que representa um período de 48 horas do quarto experimento, a temperatura da massa congelada no interior do congelador não completa totalmente o seu processo de fusão, mantendo-se próxima de 0°C até o início de um novo ciclo de resfriamento. Observa-se ainda que o restante da região do congelador permanece em torno de 5°C, o que indica um excelente aproveitamento da energia armazenada pelo gelo durante o dia. De maneira semelhante, na parte inferior da geladeira, onde o sensor PT100 foi posicionado dentro de um galão

de água, a temperatura, mesmo durante o período de aquecimento, não ultrapassou os 10 °C.

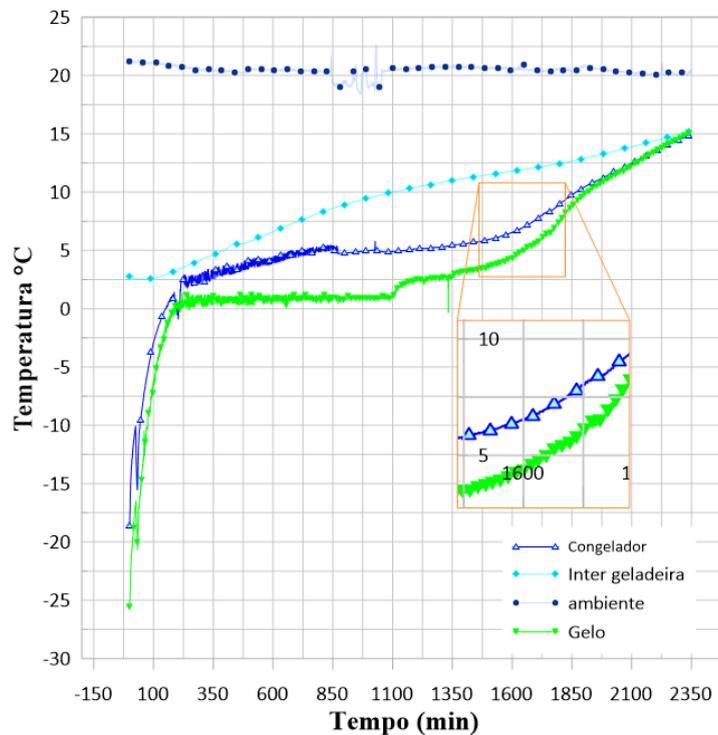
Figura 18 - Quarto experimento energizado (48 horas)



Fonte: Próprio Autor (2025).

Como pode ser observado na Figura 19, que apresenta um período de 38 horas do quarto experimento, os dados ilustram uma situação de completa ausência de fornecimento elétrico ao sistema, simulando dias chuvosos ou falhas na geração de energia. Verifica-se que, mesmo após 26 horas sem qualquer injeção de energia no sistema, foi possível manter a massa de água no interior do congelador a aproximadamente 5 °C, enquanto o restante do congelador permaneceu em torno de 7 °C e a parte inferior da geladeira atingiu 12 °C. Nas 12 horas subsequentes, todo o sistema convergiu para o equilíbrio térmico, estabilizando-se em torno de 15 °C. Esses resultados indicam que, mesmo durante um período prolongado de falta de energia, o sistema apresentou uma autonomia de aproximadamente 26 horas, mantendo o interior da geladeira em temperaturas aceitáveis, sem o uso de baterias.

Figura 19 - Quarto experimento desenergizado (38 horas)



Fonte: Próprio Autor (2025).

4.3 Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico

Para o dimensionamento de um sistema fotovoltaico off-grid destinado a alimentar uma geladeira de 65 W, com tensão nominal de 220 V e funcionamento ininterrupto 24 horas por dia, foi realizada uma análise técnica abrangendo todos os componentes necessários para o pleno funcionamento do sistema.

O primeiro passo consistiu no cálculo do consumo energético diário do equipamento, que totalizou 1.560 Wh/dia ($65 \text{ W} \times 24 \text{ h}$), ou 1,56 kWh/dia. Considerando uma margem de segurança de 30% para compensar perdas relacionadas à eficiência dos componentes, cabeamento e condições ambientais, o consumo final estimado foi de 2.028 Wh/dia como mostrado na Tabela 03.

Tabela 3 – Estimativa de consumo diário da geladeira

Parâmetro	Valor
Potência nominal	65 W
Tempo de funcionamento diário	24 horas
Consumo diário sem perdas	1.560 Wh
Fator de perda (30%)	+468 Wh
Consumo diário total estimado	2.028 Wh

Fonte: Próprio Autor(2025)

Visando assegurar o fornecimento de energia mesmo durante períodos sem insolação, adotou-se como critério de projeto dois dias de autonomia. Assim, a energia total a ser armazenada no banco de baterias foi calculada em 4.056 Wh (2.028 Wh/dia × 2 dias). Utilizando baterias de 12V, a capacidade necessária foi estimada em 364 Ah. Considerando a recomendação de limitar a descarga das baterias chumbo-ácido a no máximo 50%, a capacidade final do banco de baterias foi ajustada para 728 Ah, como mostrado na Tabela 4.

Tabela 4 – Dimensionamento do banco de baterias

Parâmetro	Valor
Energia para 2 dias	4.056 Wh
Tensão nominal do sistema	12 V
Capacidade necessária (sem correção)	338 Ah
Fator de descarga (50%)	×2
Capacidade total recomendada	676 Ah

Fonte: Próprio Autor (2025)

Quanto à geração de energia, adotou-se uma média de 5 horas diárias de sol pleno, de acordo com dados típicos de irradiação solar no Brasil. Para atender ao consumo diário de 2.028 Wh, seria necessária uma potência mínima de 405 Wp em painéis solares. Considerando uma margem de segurança de 25%, devido a fatores como temperatura elevada, inclinação inadequada e acúmulo de sujeira, a potência total recomendada foi de 546 Wp, como mostrado na Tabela 5.

Tabela 5 – Dimensionamento dos painéis solares

Parâmetro	Valor
Consumo diário a suprir	2.028 Wh
Horas de sol pleno estimadas	5 h/dia
Potência mínima dos painéis	405 Wp
Margem de segurança (25%)	+102 Wp
Potência total recomendada	507 Wp

Fonte: Próprio Autor (2025)

Assim, recomenda-se a instalação de duas placas solares de 275 Wp cada ou, alternativamente, três painéis de 200 Wp, resultando em uma potência instalada entre 550 Wp e 600 Wp. O controlador de carga, responsável por regular a energia que chega aos acumuladores, foi dimensionado com base na potência total dos módulos. Com uma entrada de cerca de 550 Wp e tensão de 12 V, a corrente de operação estimada é de aproximadamente 46 A. Dessa forma, especificou-se um controlador MPPT (Maximum Power Point Tracking) com capacidade mínima de 50 A, compatível com sistemas de 12/24 V.

Para a conversão da energia armazenada em corrente contínua (12 V) para corrente alternada (220 V), necessária para alimentar a geladeira, selecionou-se um inversor de onda senoidal pura, com potência entre 300 W e 500 W. Essa escolha visa garantir a operação estável do equipamento e suportar eventuais picos de corrente na partida do compressor, como mostrado na Tabela 6.

Tabela 6 – Resumo dos componentes e custo estimado

Componente	Especificação	Quantidade	Preço (R\$)	Subtotal (R\$)
Painel solar	275 W _p	2	650,00	1.300,00
Controlador de carga	12 V / 50 A	1	800,00	800,00
Baterias em paralelo	12 V / 370 Ah	2	2.400,00	4.800,00
Inversor	12 V → 220 V, 500 W	1	600,00	600,00
Cabos, estrutura, conectores	Diversos	-	-	700,00
Instalação	Mão de obra	-	-	800,00
Total				9.000,00

Fonte: Próprio Autor (2025).

5 CONCLUSÃO

A realização deste trabalho permitiu atender ao objetivo geral proposto, que consistia em estudar um sistema fotovoltaico autônomo capaz de operar um refrigerador doméstico de maneira contínua, sem a utilização de banco de baterias, utilizando o gelo como reserva térmica para a manutenção da temperatura interna durante o período noturno. A metodologia aplicada, aliando modelagem energética, experimentação e análise técnica, possibilitou a validação do conceito, demonstrando a eficiência do sistema tanto no aproveitamento da energia solar quanto na conservação térmica. A seguir, apresentam-se as considerações específicas em relação aos objetivos do projeto:

- O projeto e a implementação do sistema fotovoltaico autônomo com painéis solares superdimensionados demonstraram viabilidade para a alimentação contínua de um refrigerador doméstico. A configuração mínima identificada, composta por um painel fotovoltaico de 546 Wp ou dois painéis de 300 Wp, associada a um controlador de carga MPPT e a um inversor de 500 W, mostrou-se adequada para operar o compressor da geladeira durante o período de disponibilidade solar.
- O dimensionamento energético foi realizado considerando a demanda contínua do refrigerador e a variação da irradiação solar ao longo do dia. A potência calculada permitiu a escolha adequada dos componentes do sistema off-grid, assegurando a autonomia do equipamento sem a necessidade de banco de baterias. A substituição do armazenamento elétrico convencional pelo armazenamento térmico, por meio da formação de gelo, resultou em uma solução funcional, reduzindo o custo total e simplificando a manutenção.
- A formação de aproximadamente 3,18 kg de gelo no compartimento do congelador foi validada experimentalmente, permitindo a conservação da temperatura interna do refrigerador abaixo de 5 °C durante o período noturno. As perdas energéticas foram compensadas pela capacidade térmica do gelo formado, validando o isolamento térmico e a eficiência do conceito proposto.
- A análise técnica evidenciou que a eliminação do banco de baterias não comprometeu a funcionalidade do sistema. Comparado a sistemas tradicionais, a solução apresentou uma redução superior a 50% no custo total, com perspectiva

de menor tempo de retorno financeiro (payback), alinhando-se aos princípios de sustentabilidade.

- O protótipo, emulado em escala real, comprovou a eficácia do sistema, com medições experimentais que demonstraram a manutenção da temperatura desejada durante a noite. A utilização do gelo como reserva térmica mostrou-se tecnicamente viável para aplicações em regiões remotas, oferecendo uma alternativa sustentável e de baixo custo para a conservação de alimentos e medicamentos.
- A avaliação do desempenho térmico revelou uma relação direta entre a massa de gelo e a eficiência de conservação interna. A utilização de três a quatro garrafas de água congelada, totalizando entre 2,4 kg e 3,2 kg de gelo, foi suficiente para manter a temperatura interna abaixo de 8 °C em diferentes condições ambientais, mesmo sob altas temperaturas externas.
- Em experimento de longa duração, realizado por 93 horas e simulando condições reais de operação, constatou-se que a massa de gelo formada manteve a temperatura interna da geladeira em condições aceitáveis por até 26 horas sem reposição de energia. Durante esse período, o congelador permaneceu abaixo de 7 °C e a parte inferior do refrigerador não ultrapassou 12 °C, demonstrando a eficiência do sistema em dias chuvosos ou nublados.
- Por fim, a análise dos componentes reforçou a importância do superdimensionamento dos painéis solares e da correta seleção do controlador MPPT e do inversor, garantindo o funcionamento ininterrupto do sistema e a formação eficaz da reserva térmica, além de reduzir os custos e a complexidade em comparação aos sistemas off-grid tradicionais.

REFERÊNCIAS

ASHRAE. **ASHRAE Handbook: Refrigeration**. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2014.

BERGMAN, T. L. et al. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica. **Site institucional**. 2015. Disponível em: https://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&catid=91. Acesso em: 23 abr. 2025.

FAO – Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura. **Perdas pós-colheita e segurança alimentar em comunidades tradicionais**. Roma: FAO, 2020.

IDEAL ENERGIA SOLAR. **Painéis solares: quantos preciso?** 2024. Disponível em: <https://criteriaenergia.com.br/paineis-solares-quantos-preciso/>. Acesso em: 23 abr. 2025.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentos de transferência de calor**. São Paulo: Pearson Educação, 2008. Disponível em: http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TMEC030/Prof_Luciano/Fundamentos-de-transferencia-de-calor-e-de-massa-incropera.pdf. Acesso em: 23 abr. 2025.

IRENA – International Renewable Energy Agency. **Innovation Outlook: Thermal Energy Storage**. Abu Dhabi: IRENA, 2022. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2022/Jul/Thermal-energy-storage>. Acesso em: 20 abr. 2025.

KUMAR, S.; SINGH, R.; SHARMA, P. **Enhancing the efficiency of refrigeration systems using ice storage and alternative refrigerants**. *Applied Thermal Engineering*, v. 139, p. 736–746, 2018. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.04.026.

LAMBERTS, R.; GHISI, E.; PEREIRA, C. D.; BATISTA, J. O. **Casa eficiente: consumo e geração de energia**. Florianópolis: LabEEE, 2010. v. 2. 76 p.

MATSUDA, Vinícius. **Título do trabalho**. Ano. Número de folhas. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São

Paulo, ano. Disponível em: https://bdta.abcd.usp.br/directbitstream/bd829611-adce-4242-9ed3-8a1426199a90/Matsuda_Vinicius_tcc.pdf. Acesso em: 27 abr. 2025.

MENEGHETTI, Carlos Renato. **Estratégias de controle em câmara de refrigeração por compressão de vapor**. 2009. 139 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas, 2009. Disponível em: <https://hdl.handle.net/20.500.12733/1611283>. Acesso em: 27 abr. 2025.

MENDES, R. A. et al. **Desempenho energético de compressores em refrigeradores domésticos: uma análise comparativa**. *Revista Brasileira de Energia*, v. 26, n. 2, p. 45–55, 2020.

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.

MILLER, R.; BARNES, T.; SMITH, A. **Environmental impact of battery disposal and recycling in refrigeration systems**. *Environmental Science & Technology*, v. 54, n. 7, p. 4885–4892, 2020. DOI: 10.1021/acs.est.0c00238.

MOURA, P. R. de; ALMEIDA, D. **Refrigerador termoelétrico de Peltier usado para estabilizar um feixe laser em experimentos didáticos**. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 36, n. 1, 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/>. Acesso em: 25 abr. 2025.

OLIVEIRA, E. R. et al. **Uma proposta de sequência didática em website para o ensino de transferência de calor**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

OLIVEIRA, R. **Bancada didática para sistema fotovoltaico off-grid**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

OMS – Organização Mundial da Saúde. **Manutenção da cadeia de frio de vacinas: desafios e soluções**. Genebra: OMS, 2021.

OUR WORLD IN DATA. **Energy Access**. 2024. Disponível em: <https://ourworldindata.org/energy-access>. Acesso em: 20 abr. 2025.

PITA, E. G. **HVAC: equações, dados e regras práticas**. São Paulo: LTC, 2001.

POKHREL, Sajjan; KUYUK, Ali Fahrettin; KALANTARI, Hosein; GHOREISHI-MADISEH, Seyed Ali. **Techno-economic trade-off between battery storage and ice thermal energy storage for application in renewable mine cooling system**. Applied Sciences, v. 10, n. 17, p. 1-17, 2020. DOI: 10.3390/app10175985.

QUITES, E. E. C.; LIA, L. R. B. **Introdução à transferência de calor**. São Paulo, 2005.

RIBEIRO, G. **Dimensionamento de um sistema fotovoltaico off-grid em um motorhome**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – UniCEUB, Brasília, 2020.

RODRIGUES, T. E. F. **Utilização do efeito Peltier para resfriamento de água**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br>. Acesso em: 25 abr. 2025.

SANTOS, A. F. dos; OLIVEIRA, M. A. de; SOUZA, R. M. de. **Desenvolvimento de um dispositivo para ciclagem térmica usando módulos Peltier**. 2018. Disponível em: <https://www.researchgate.net>. Acesso em: 25 abr. 2025.

SANTOS, A. F. et al. **Avaliação do desempenho de sistemas fotovoltaicos com armazenamento**. *Cadernos de Energia*, 2020.

SANTOS, R. **Estudos de caso e comparação da viabilidade econômica para a implementação de um sistema fotovoltaico on-grid e off-grid**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – UNIFACVEST. Disponível em: <https://www.unifacvest.edu.br/assets/uploads/files/arquivos/33936-santos,-r.-a.-estudo-d-e-caso-e-comparacao-da-viabilidade-economica-para-a-implementacao-de-um-sistema-fotovoltaico-on-grid-e-off-grid.-tcc.-2019..pdf>. Acesso em: 17 abr. 2025.

SILVA, Í. S. da. **Utilização de um controle PID de temperatura para estudo de resfriamento termoelétrico**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em

Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022.
Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br>. Acesso em: 25 abr. 2025.

STOECKER, W. F.; JONES, J. W. **Refrigeração e ar condicionado**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1985.

TONIN, R. et al. **Sistemas de armazenamento de energia em aplicações isoladas**. In: *Congresso Brasileiro de Energia Solar*, 2017.

VILLAIVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia fotovoltaica: conceito e aplicação em sistemas isolados e conectados à rede**. 2. ed. rev. e atual. São Paulo: Editora Saraiva, 2017.

XU, Yongfeng; LI, Ming; LUO, Xi; MA, Xun; WANG, Yunfeng; LI, Guoliang. **Experimental investigation of solar photovoltaic operated ice thermal storage air-conditioning system**. *International Journal of Refrigeration*, v. 86, p. 258-272, 2018. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2017.11.018.

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. **Sears & Zemansky: Física 2 – Termodinâmica e Ondas**. São Paulo: Pearson Education, 2008.

ZHANG, Y.; LIU, Y.; WANG, L. **Ice storage technology in refrigeration systems: A review**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 101, p. 321–329, 2019. DOI: 10.1016/j.rser.2018.11.027.