

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MATHEUS SILVA DE CARVALHO

**INTEGRAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS OFF-GRID E INTERNET VIA
SATÉLITE PARA SUPORTE À TELEMEDICINA EM ÁREAS ISOLADAS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

São Luis
2025

MATHEUS SILVA DE CARVALHO

**INTEGRAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS OFF-GRID E INTERNET VIA
SATÉLITE PARA SUPORTE À TELEMEDICINA EM ÁREAS ISOLADAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao curso de graduação em Engenharia Elétrica,
como parte dos requisitos necessários à obtenção
do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: MSc. Marcos Tadeu Rezende de
Araújo

São Luis
2025

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Carvalho, Matheus Silva de.

Integração de Sistemas Fotovoltaicos Off-Grid e
Internet via Satélite para Suporte à Telemedicina em Áreas
Isoladas / Matheus Silva de Carvalho. - 2025.
95 f.

Orientador(a): Marcos Tadeu Rezende Araújo.
Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica,
Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2025.

1. Telemedicina. 2. Energia Solar Off-grid. 3.
Internet Via Satélite. 4. Áreas Isoladas. I. Araújo,
Marcos Tadeu Rezende. II. Título.

MATHEUS SILVA DE CARVALHO

INTEGRAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS OFF-GRID E INTERNET VIA
SATÉLITE PARA SUPORTE À TELEMEDICINA EM ÁREAS ISOLADAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
curso de graduação em Engenharia Elétrica, como
parte dos requisitos necessários à obtenção do título
de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovado em 28 de agosto de 2025.

Banca Examinadora

Professor Mestre Marcos Tadeu Rezende Araújo – UFMA (Orientador)

Professor Doutor Francisco das Chagas de Souza – UFMA (Membro)

Professor Doutor Luciano Buonocore – UFMA (Membro)

Agradecimentos

A Deus, primeiramente, por ter sustentado meus passos, iluminado minhas decisões e me concedido forças nos momentos de incerteza.

Ao meu pai, Aldair, e à minha mãe, Adriana, por nunca medirem esforços para que eu pudesse alcançar meus objetivos e chegar até aqui. Foram eles que acreditaram nos meus sonhos mesmo quando pareciam distantes, e não pouparam dedicação para me ver formado.

À minha vó Antônia, por ser uma parte essencial da minha motivação, pelo apoio incondicional e pelas contribuições financeiras que foram fundamentais para tornar esta conquista possível.

À minha namorada, Sara, por dividir comigo medos, incertezas e dificuldades, por ser parceira em todos os momentos e sempre me aconselhar com sabedoria e amor. Seu apoio foi essencial para que eu chegasse até aqui.

Aos meus irmãos, por serem companheiros de vida, por me inspirarem, apoiarem e por compartilharem comigo os desafios e as alegrias dessa trajetória.

Aos meus tios Aldemir e Antônia, e às minhas primas Akila e Athina, por me acolherem em sua casa durante este período, oferecendo todo o conforto e carinho que me permitiram seguir firme nos estudos.

Ao meu orientador, professor Marcos Tadeu, pela orientação segura, paciência e pela disponibilidade em me guiar durante todo o desenvolvimento deste trabalho, contribuindo de forma indispensável para o seu resultado.

Aos meus amigos, que foram fundamentais e tornaram essa caminhada muito mais leve e especial: Danielle Portela, Jeferson Oliveira, Bianca Mota, Ronne Gouveia, Mikelly Camargo, Magnólia Silva, Carlos André, Caio Messias, Thamires Fernandes e Iandara Porto. Obrigado por cada conversa, por cada incentivo e pelos momentos que tornaram a jornada mais alegre.

Ao curso de Engenharia Elétrica e a todos os colegas e professores do departamento, pela convivência, pelos aprendizados diários e pela formação que levarei para toda a vida.

A todos vocês, meu mais sincero e profundo agradecimento.

“Consagre ao Senhor tudo o que você faz, e os seus planos serão bem-sucedidos.”
Provérbios 16:3

Resumo

A desigualdade no acesso a serviços de saúde em regiões remotas do Brasil permanece um desafio estrutural, agravado pela ausência de infraestrutura elétrica e de conectividade. Neste contexto, a presente monografia propõe uma solução integrada baseada na utilização de sistemas fotovoltaicos off-grid e conectividade via satélite para viabilizar o funcionamento de unidades móveis de telemedicina em áreas isoladas. Para isso, realizou-se o levantamento das cargas elétricas típicas de um consultório em áreas rurais, o dimensionamento completo do sistema de geração e armazenamento de energia, a seleção de um kit portátil com painéis solares e baterias, além da simulação de desempenho por meio do software PV*SOL. A conectividade foi avaliada por meio de testes práticos com a antena Starlink Mini, medindo parâmetros como velocidade de upload e download, latência e jitter. Os resultados demonstraram que a solução proposta é tecnicamente viável, assegurando uma autonomia energética de aproximadamente 1,5 dia sob condições conservadoras de irradiação e garantindo banda larga estável para aplicações clínicas remotas. Conclui-se que a integração entre geração de energia limpa e conectividade satelital representa uma alternativa eficaz e sustentável para expandir o acesso à saúde em regiões desassistidas, contribuindo para a redução das desigualdades e alinhando-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

Palavras-chave: Telemedicina; Energia solar off-grid; Internet via satélite; Áreas isoladas

Abstract

Inequality in access to healthcare services in remote regions of Brazil remains a structural challenge, worsened by the lack of electrical infrastructure and internet connectivity. In this context, the present monograph proposes an integrated solution based on off-grid photovoltaic systems and satellite internet to enable the operation of mobile telemedicine units in isolated areas. The study includes the identification of typical electrical loads for a remote clinic, the complete sizing of the energy generation and storage system, the selection of a portable solar kit with batteries, and performance simulations using the PV*SOL software. Connectivity was assessed through practical tests with the Starlink Mini antenna, measuring parameters such as upload and download speeds, latency, and jitter. The results indicate that the proposed solution is technically feasible, ensuring approximately 1.5 days of energy autonomy under conservative irradiance conditions and providing stable broadband for remote clinical applications. It is concluded that the integration of clean energy generation and satellite connectivity offers an effective and sustainable alternative to expand healthcare access in underserved areas, contributing to the reduction of inequalities and aligning with the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs).

Keywords: Telemedicine; Off-grid solar energy; Satellite internet; Isolated areas.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Linha do tempo: Telemedicina 2011-Atualmente	21
Figura 2 – Estrutura de uma célula fotovoltaica	25
Figura 3 – Esquema de um sistema fotovoltaico autônomo	26
Figura 4 – Organização e componentes de um sistema fotovoltaico residencial conectado à rede elétrica.	28
Figura 5 – Diagrama de funcionamento de um sistema fotovoltaico híbrido	30
Figura 6 – Esquema de ligação de módulos em série	32
Figura 7 – Esquema de ligação de módulos em paralelo	32
Figura 8 – Esquema de ligação de módulos em série-paralelo	33
Figura 9 – Associação de baterias	39
Figura 10 – Modo de utilização de um controlador de carga	41
Figura 11 – Níveis de irradiação solar por região brasileira	45
Figura 12 – Esquema de funcionamento da internet via satélite	51
Figura 13 – Antena Satrlink Mini	76
Figura 14 – Resultados dos testes próximo à antena (Speedtest à esquerda e App Starlink à direita)	77
Figura 15 – Resultados dos testes a cerca de 20 metros da antena	78
Figura 16 – Estação Bluetti AC200P L	80
Figura 17 – Disposição frontal e lateral dos conectores e controles do BLUETTI AC200P L	81
Figura 18 – Interface LED do BLUETTI AC200P L e identificação das principais funções de monitoramento	82
Figura 19 – Dimensões do painel solar BLUETTI PV350 (dobrado e aberto)	83
Figura 20 – Esquema representativo do sistema proposto em operação	85

Lista de gráficos

Gráfico 1 – Participação percentual do consumo de cada equipamento	69
Gráfico 2 – Irradiação por área do módulo	74
Gráfico 3 – Previsão de rendimento do sistema	75

Lista de tabelas

Tabela 1 – Critérios Técnicos para Seleção do Inversor	62
Tabela 2 – Critérios Técnicos para Seleção do Controlador de Carga	62
Tabela 3 – Critérios Técnicos para Seleção do Kit Solar Portátil	63
Tabela 4 – Critérios Operacionais e Mercadológicos para Seleção do Kit Portátil	64
Tabela 5 – Parâmetros técnicos recomendados para desempenho adequado em teleconsulta	66
Tabela 6 – Equipamentos selecionados e estimativa de consumo energético diário . . .	68
Tabela 7 – Parâmetros de saída da simulação	73
Tabela 8 – Intervalos de desempenho do primeiro teste	77
Tabela 9 – Intervalos de desempenho do segundo teste	78
Tabela 10 – Principais características elétricas da estação Bluetti AC200P L	80
Tabela 11 – Características elétricas dos módulos fotovoltaicos BLUETTI PV350	83
Tabela 12 – Comparativo entre os requisitos do projeto e kit proposto	84

Lista de abreviaturas e siglas

3G	Terceira Geração
4G	Quarta Geração
5G	Quinta Geração
ABNT	ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
Ah	Ampère-hora
BMS	Battery Management System
CA	Corrente Alternada
CAPEX	Capital Expenditures
CC	Corrente Contínua
CFM	Conselho Federal de Medicina
COVID-19	Corona Vírus
CO	Dióxido de carbono
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica
DSL	Digital Subscriber Line
ECG	Eletrocardiograma
ECO	Ecocardiografia
ERB	Estação Rádio Base
GEO	Órbita Geoestacionária
HSP	Horas de Sol Pleno
IBGE	INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IP	Internet Protocol
KOH	Hidróxido de potássio
LAN	Local Area Network

LED	Light Emitting Diode
LEO	Low Earth Orbit
LGPD	Lei Geral de Proteção de Dados
MC4	Multi-Contact 4
MPPT	Maximum Power Point Tracking (Rastreamento do Ponto de Máxima Potência)
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PWC	PricewaterhouseCoopers
PWM	Pulse Width Modulation (Modulação por Largura de Pulso)
RF	Radiofrequência
SUS	Sistema Único de Saúde
THD	Total Harmonic Distortion
TIC	Tecnologias da Informação e Comunicação
USB-C	Barramento Serial Universal
V	Volt
VSAT	Very Small Aperture Terminal
W	Watt
kW	Quilowatt-hora
kWp	Quilowatt-pico
°C	Graus Célsius

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DA PROBLEMÁTICA	15
1.2	MOTIVAÇÃO E DELIMITAÇÃO DO ESTUDO	16
1.3	OBJETIVOS	17
1.3.1	Objetivo Geral	17
1.3.2	Objetivos Específicos	17
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	TELEMEDICINA: FUNDAMENTOS, EVOLUÇÃO E APLICAÇÕES ESTRATÉGICAS	19
2.1.1	Definição e Evolução Histórica da Telemedicina no Brasil	19
2.1.2	Funcionamento, Aplicações e Infraestrutura Mínima para Telemedicina . . .	21
2.1.3	Telemedicina em Áreas Remotas	24
2.2	ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA: PRINCÍPIOS, SISTEMAS E APLICAÇÕES	25
2.2.1	Fundamentos da Energia Solar Fotovoltaica	25
2.2.2	Tipos de Sistemas Fotovoltaicos	26
2.2.2.1	<i>Sistema Off-Grid (Isolado e Autônomo)</i>	26
2.2.2.2	<i>Sistema Conectado à Rede Elétrica (On-Grid)</i>	27
2.2.2.3	<i>Sistema Híbrido</i>	29
2.2.3	Componentes e Conceitos Fundamentais para o Dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos Off-Grid	30
2.2.3.1	<i>Módulos Fotovoltaicos</i>	31
2.2.3.2	<i>Baterias</i>	34
2.2.3.3	<i>Controlador de Carga</i>	39
2.2.3.4	<i>Inversor</i>	42
2.2.3.5	<i>Conceitos Fundamentais</i>	44
2.3	CONECTIVIDADE EM REGIÕES REMOTAS: TECNOLOGIAS E PARÂMETROS CRÍTICOS	47
2.3.1	Panorama da Conectividade em Regiões Remotas	47
2.3.2	Tecnologias de Acesso à Internet em Áreas Isoladas	47
2.3.3	Arquitetura e Funcionamento da Internet via Satélite	49
2.3.4	Parâmetros Técnicos de Qualidade de Conexão de Internet	52
3	METODOLOGIA	54
3.1	TIPO E NATUREZA DO TRABALHO	54

3.2	PROCEDIMENTOS DE COLETA E ANÁLISE DE DADOS	55
3.3	LEVANTAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DA CARGA ELÉTRICA . . .	55
3.3.1	Cálculo da Energia Consumida	56
3.4	DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO	57
3.4.1	Dimensionamento da Bateria	58
3.4.2	Cálculo do Gerador Fotovoltaico	59
3.4.3	Seleção do Controlador de Cargas e Inversor	61
3.4.4	Parâmetros para Escolha do Kit Portátil	62
3.4.5	Simulação de Geração Fotovoltaica	64
3.5	CARACTERIZAÇÃO DA CONECTIVIDADE	65
3.5.1	Requisitos Técnicos de Conectividade para Aplicações em Telemedicina . .	65
3.5.2	Avaliação Experimental de Conectividade	66
4	RESULTADOS	68
4.1	LEVANTAMENTO DE CARGA E CONSUMO ENERGÉTICO DO SISTEMA	68
4.2	DIMENSIONAMENTO DO ARMAZENAMENTO DE ENERGIA	71
4.3	GERAÇÃO FOTOVOLTAICA E DESEMPENHO ENERGÉTICO	72
4.4	ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS TESTES DE CONECTIVIDADE	
	SATELITAL	75
4.4.1	Teste de Conectividade Próximo à Antena	76
4.4.2	Teste de Conectividade a uma Distância Aproximada de 20 Metros da Antena	78
4.5	AVALIAÇÃO TÉCNICA E SELEÇÃO DO KIT FOTOVOLTAICO PORTÁTIL	79
4.6	VIABILIDADE ECONÔMICA E IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS DA	
	SOLUÇÃO	86
4.7	LIMITAÇÕES DO ESTUDO	87
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	89
5.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	90
	REFERÊNCIAS	92

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta a problemática investigada, sua relevância científica e social, bem como os objetivos que norteiam a pesquisa. Busca-se contextualizar o cenário em que a investigação está inserida, destacando os principais desafios enfrentados e a necessidade de soluções inovadoras para superar as limitações existentes.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DA PROBLEMÁTICA

A desigualdade no acesso a serviços de saúde permanece um desafio global, particularmente crítico em regiões remotas, onde a infraestrutura médica e tecnológica é limitada ou até mesmo inexistente. Populações que vivem em áreas isoladas frequentemente enfrentam barreiras significativas para obter atendimento adequado, o que pode resultar em diagnósticos tardios e no agravamento de doenças evitáveis. No caso brasileiro, um levantamento do Instituto de Estudos para Políticas de Saúde (IEPS, 2024) revelou que aproximadamente 34% da população não dispõe de acesso regular à atenção básica de saúde, o que equivale a cerca de 72,69 milhões de pessoas sem cobertura pela Estratégia Saúde da Família.

Nesse cenário, a telemedicina apresenta-se como alternativa estratégica para expandir o alcance dos serviços de saúde, permitindo consultas e monitoramento remoto de pacientes. Segundo o Conselho Federal de Medicina (CFM, 2022), a telemedicina corresponde ao “exercício da medicina mediado por Tecnologias Digitais, de Informação e de Comunicação (TDIC)”, viabilizando a democratização do atendimento, reduzindo deslocamentos e promovendo a continuidade dos cuidados médicos. Durante a pandemia de COVID-19, sua adoção foi acelerada, evidenciando sua relevância para aliviar a sobrecarga sobre sistemas tradicionais de saúde (Oliveira, 2024). Contudo, para que seus benefícios sejam plenamente aproveitados em comunidades remotas, é imprescindível garantir suporte tecnológico robusto, especialmente no que diz respeito ao acesso à energia e à conectividade.

Para viabilizar a telemedicina em áreas isoladas, torna-se indispensável assegurar um fornecimento energético confiável e sustentável. Nesse contexto, a energia solar desponta como alternativa altamente promissora, sobretudo no Brasil, país que dispõe de elevado potencial para geração fotovoltaica, com índices de irradiação solar elevados em grande parte do território, notadamente nas regiões Nordeste e Centro-Oeste. Essa vantagem natural, somada aos avanços tecnológicos no setor, torna a energia solar uma solução atraente para suprir a demanda energética de comunidades rurais onde a extensão da rede elétrica convencional é economicamente inviável (Silva, 2019).

De forma complementar, a internet via satélite surge como solução viável para garantir conectividade em locais remotos, onde a implantação de infraestruturas convencionais, como redes de fibra óptica, apresenta custos proibitivos ou é tecnicamente impraticável. Essa tecnologia oferece velocidades compatíveis com banda larga, estabilidade e segurança, permitindo uma

experiência digital similar à observada em áreas urbanas. Sua capacidade de ajustes remotos para mitigar efeitos climáticos adversos amplia ainda mais a continuidade do serviço, tornando-a ferramenta essencial para possibilitar aplicações sensíveis como a telemedicina (Magavi, 2024).

Diante desse contexto, este estudo investiga a integração entre sistemas fotovoltaicos autônomos e comunicação via satélite como estratégia para ampliar o acesso à saúde em regiões remotas. Busca-se, além de analisar os impactos técnicos, econômicos e sociais dessa abordagem, demonstrar como a convergência dessas tecnologias pode fortalecer a telemedicina e contribuir para a redução das desigualdades no atendimento médico. Ao discutir os desafios inerentes e propor soluções viáveis, este trabalho pretende oferecer subsídios que fomentem políticas públicas e iniciativas voltadas à inclusão digital e ao desenvolvimento sustentável dessas comunidades.

1.2 MOTIVAÇÃO E DELIMITAÇÃO DO ESTUDO

Este trabalho tem como motivação central a necessidade de ampliar o acesso a serviços de saúde em regiões remotas e isoladas, onde a escassez de infraestrutura médica e tecnológica dificulta diagnósticos precoces e tratamentos adequados, aprofundando desigualdades sanitárias. A carência de profissionais e unidades de saúde nesses territórios acentua um cenário já marcado por vulnerabilidades estruturais.

Nesse contexto, a telemedicina apresenta-se como alternativa eficaz para superar barreiras geográficas e estender o atendimento a populações distantes, sobretudo em países com dimensões continentais, como o Brasil, e em áreas críticas, a exemplo da Amazônia Legal, onde os recursos permanecem concentrados em grandes centros urbanos (Lisboa, 2023). Entretanto, sua viabilização depende fundamentalmente da existência de fornecimento elétrico confiável e de conectividade estável, requisitos frequentemente ausentes em comunidades rurais e localidades afastadas.

Soluções de internet via satélite oferecem conectividade em regiões sem cobertura convencional, enquanto sistemas fotovoltaicos off-grid despontam como alternativa sustentável para assegurar o suprimento energético necessário ao funcionamento de equipamentos médicos e de comunicação. Dados recentes do IBGE indicam que cerca de 5,9 milhões de domicílios brasileiros ainda não utilizavam a internet em 2023, evidenciando a persistência da exclusão digital e reforçando a demanda por tecnologias capazes de expandir o acesso em áreas desassistidas (IBGE, 2024).

Além disso, o contexto pós-pandemia destacou o papel estratégico da telemedicina no atendimento a populações vulneráveis e apontou a necessidade de políticas públicas que articulem saúde, conectividade e energia limpa. Diante desse cenário, o presente estudo concentra-se no desenvolvimento e na avaliação, por meio de dimensionamento e simulações computacionais, de uma proposta técnica para fornecer energia elétrica e internet a um consultório de telemedicina localizado em ambiente isolado, integrando um sistema fotovoltaico off-grid a uma solução de conectividade via satélite.

Este estudo limita-se à análise da viabilidade técnica e socioambiental do modelo proposto, restringindo-se à geração e ao armazenamento de energia elétrica e à conectividade satelital. Questões regulatórias, clínicas ou éticas associadas à prática da telemedicina não integram o escopo deste estudo por serem regidas por normativas específicas, como a Resolução CFM nº 2.314/2022.

1.3 OBJETIVOS

Esta seção apresenta os objetivos do trabalho, divididos em objetivo geral e específicos, de forma a orientar o desenvolvimento da pesquisa e a validação da proposta.

1.3.1 Objetivo Geral

Desenvolver e validar, por meio de dimensionamento técnico e simulações especializadas, uma solução autônoma baseada em energia fotovoltaica off-grid e internet via satélite, capaz de viabilizar o suporte à telemedicina em regiões remotas e desprovidas de infraestrutura elétrica e de conectividade.

1.3.2 Objetivos Específicos

- **Levantar e caracterizar as cargas elétricas** indispensáveis ao funcionamento dos equipamentos e sistemas necessários para a execução de atividades de telemedicina em locais isolados, abrangendo recursos de informática, comunicação e iluminação.
- **Dimensionar o sistema fotovoltaico off-grid**, considerando cenários conservadores de irradiância solar e períodos de autonomia adequados, assegurando o funcionamento contínuo do suporte à telemedicina mesmo em condições meteorológicas adversas.
- **Selecionar um kit fotovoltaico portátil** que atenda aos requisitos identificados, avaliando critérios de portabilidade, robustez e conformidade técnica para uso em campo.
- **Validar o desempenho energético do sistema por meio de simulações no software PV*SOL**, estimando a geração mensal e anual, bem como o potencial de redução nas emissões de CO₂, destacando o caráter sustentável da proposta.
- **Realizar testes práticos de conectividade**, coletando dados de velocidade de download, upload, latência, jitter e perdas de pacotes, para verificar a qualidade do enlace e sua adequação às demandas de videoconferências médicas.
- **Realizar uma análise econômico-ambiental simplificada da solução**, apresentando o investimento inicial estimado (CAPEX) e discutindo seus benefícios em relação a alternativas tradicionais de extensão de infraestrutura elétrica e de dados, situando também

a contribuição do projeto frente aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em cinco capítulos, visando oferecer uma leitura fluida e coerente acerca do tema proposto.

O Capítulo 1 apresenta uma contextualização geral do problema investigado, destacando a relevância do estudo, seus objetivos principais e as delimitações adotadas, além de apontar a motivação que sustenta a pesquisa.

No Capítulo 2, são explorados os conceitos essenciais que embasam o desenvolvimento do projeto, contemplando a revisão da literatura sobre telemedicina, sistemas fotovoltaicos off-grid, internet via satélite e parâmetros técnicos de desempenho, estabelecendo o suporte teórico necessário para a análise subsequente.

O Capítulo 3 descreve detalhadamente os procedimentos adotados ao longo do trabalho, incluindo o levantamento das cargas elétricas, o dimensionamento do sistema fotovoltaico, a escolha dos equipamentos, as simulações realizadas e a estratégia para os testes de conectividade.

No Capítulo 4 são apresentados e analisados os principais achados do estudo, consolidando dados do dimensionamento, dos testes práticos e das análises econômicas e socioambientais, além de discutir as limitações observadas ao longo da pesquisa.

Por fim, o Capítulo 5 reúne as considerações finais, sintetizando as contribuições do trabalho, avaliando o alcance dos objetivos propostos e sugerindo perspectivas para estudos futuros, bem como destacando o potencial do projeto como modelo replicável para políticas públicas e iniciativas em saúde e energia sustentável.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção reúne o embasamento teórico que orientou o estudo, contemplando os principais conceitos relacionados ao tema. Inicialmente, são discutidos os fundamentos da telemedicina, destacando sua evolução e aplicações estratégicas no contexto brasileiro. Em seguida, serão explorados os aspectos técnicos associados às soluções energéticas baseadas em sistemas fotovoltaicos off-grid e ao uso da internet via satélite, tecnologias fundamentais para viabilizar o atendimento médico em regiões remotas e desprovidas de infraestrutura elétrica e de conectividade.

2.1 TELEMEDICINA: FUNDAMENTOS, EVOLUÇÃO E APLICAÇÕES ESTRATÉGICAS

A telemedicina tem se destacado como estratégia essencial para ampliar o acesso à saúde em locais remotos. Nesta subseção, apresentam-se seus fundamentos, evolução e principais aplicações, com ênfase no contexto brasileiro.

2.1.1 Definição e Evolução Histórica da Telemedicina no Brasil

Definida pelo Conselho Federal de Medicina (CFM, 2022) como o “exercício da medicina mediado por Tecnologias Digitais, de Informação e de Comunicação (TDICs)”, a telemedicina configura-se como uma estratégia contemporânea voltada à ampliação do acesso aos serviços de saúde, especialmente em regiões remotas ou com infraestrutura deficiente. Essa modalidade permite a realização de consultas, monitoramentos, emissão de laudos e troca de informações clínicas a distância, reduzindo a necessidade de deslocamentos e promovendo a continuidade do cuidado médico de forma eficaz e segura.

O termo telemedicina é frequentemente encontrado na literatura em associação com o conceito de telessaúde, sem que haja, contudo, uma padronização conceitual clara entre eles. Diversos autores adotam definições distintas, que variam quanto à abrangência funcional, aos profissionais envolvidos, ao papel das instituições e aos objetivos pretendidos. De maneira geral, ambos os termos se referem ao uso das tecnologias da informação e comunicação (TICs) aplicadas ao contexto da saúde, sendo muitas vezes utilizados como sinônimos, embora apresentem diferenças conceituais relevantes quando analisados em profundidade (Kur, 2023).

Dal Ponte (2024) aponta que a telessaúde é um conceito amplo que abrange o uso das TIC para oferecer suporte a diversas ações em saúde, como educação em saúde, gestão, suporte diagnóstico, prevenção, monitoramento e capacitação profissional, estendendo-se para além da relação direta entre médico e paciente. Ainda segundo o autor, a telemedicina, por sua vez, é considerada um subconjunto da telessaúde, com foco exclusivo no exercício da medicina a distância, ou seja, envolve diretamente a atuação médica por meio de plataformas digitais para acompanhamento clínico remoto. Portanto, a principal diferença entre os dois termos está na abrangência: enquanto a telessaúde envolve diversas áreas e profissionais da saúde, a telemedicina

refere-se estritamente a atos médicos realizados por profissionais registrados no Conselho Federal de Medicina.

A telemedicina, embora considerada uma prática recente no contexto brasileiro, tem origem histórica que remonta à década de 1960. Inicialmente desenvolvida em resposta às demandas por monitoramento à distância em missões espaciais, sua evolução acompanhou o progresso das tecnologias da informação e comunicação aplicadas à saúde. (Lisboa , 2023)

No entanto, conforme destaca Domingues (2014), as primeiras experiências estruturadas de telemedicina e telessaúde no Brasil datam da década de 1990, período em que iniciativas pioneiras começaram a explorar o potencial das tecnologias de comunicação aplicadas à prática clínica. Em 1994, foi implantada a Telecardio, empresa especializada na realização de eletrocardiogramas a distância, por meio de soluções que permitiam a transmissão remota de sinais cardíacos para avaliação médica. No ano seguinte, o Instituto do Coração (InCor) introduziu o serviço ECG Fax, que possibilitava o envio de eletrocardiogramas via fax para interpretação por especialistas da instituição. Ainda em 1995, a Rede Sarah de Hospitais adotou um sistema de videoconferência que integrava suas diversas unidades, com o objetivo de viabilizar a troca de informações clínicas em tempo real.

Até aproximadamente 2008, Zanesco (2023) observou uma ampliação significativa dos serviços vinculados à telemedicina no Brasil. Nesse período, começaram a surgir iniciativas mais estruturadas, como laboratórios remotos, serviços de teleconsultoria, teleconferências clínicas e até procedimentos cirúrgicos assistidos a distância, impulsionados pelo avanço das tecnologias de informação e comunicação. Foi nesse contexto de expansão e consolidação das práticas que se estabeleceu, em 7 de agosto de 2002, a primeira regulamentação oficial da telemedicina no país, por meio da Resolução nº 1.643/2002, publicada pelo Conselho Federal de Medicina (CFM). Essa norma definiu os parâmetros técnicos e éticos para a prestação de serviços médicos a distância, conferindo respaldo institucional à modalidade em pleno desenvolvimento no cenário nacional.

Conforme ilustrado na figura 1, um novo marco regulatório de grande relevância para a consolidação da telemedicina no Brasil ocorreu em 2020, como resposta direta à emergência sanitária provocada pela pandemia de COVID-19. A Portaria nº 467/2020, emitida pelo Ministério da Saúde, autorizou de forma excepcional e temporária a prática da telemedicina como estratégia de enfrentamento da crise sanitária. Na sequência, a Lei nº 13.989/2020, sancionada em 15 de abril de 2020, ampliou essa autorização ao reconhecer legalmente o uso da telemedicina em todas as atividades da área de saúde, enquanto perdurasse a situação de emergência em saúde pública no país.

Figura 1 – Linha do tempo: Telemedicina 2011-Atualmente



Fonte: LISBOA et al., 2023

Atualmente, a prática da telemedicina no Brasil é regida pela Resolução CFM nº 2.314/2022, que substituiu a antiga norma de 2002. Publicada pelo Conselho Federal de Medicina, essa resolução estabelece os princípios éticos, técnicos e operacionais para o exercício da medicina mediada por tecnologias digitais.

Dessa forma, observa-se que a evolução da telemedicina no Brasil se deu de forma gradual, passando por experiências pioneiras, marcos históricos e avanços legais significativos, até alcançar sua regulamentação plena atualmente. A consolidação dessa modalidade, especialmente impulsionada pela crise sanitária da COVID-19, demonstra sua relevância estratégica para a ampliação do acesso à saúde, particularmente em regiões remotas e carentes de infraestrutura. O panorama atual evidencia que a telemedicina não apenas se firmou como uma solução emergencial, mas se estabeleceu como um componente permanente e essencial do sistema de atenção à saúde no país.

2.1.2 Funcionamento, Aplicações e Infraestrutura Mínima para Telemedicina

O funcionamento da telemedicina está ancorado no uso das TDIC, que viabilizam a interação remota entre médicos e pacientes, bem como entre profissionais da saúde. Essa prática envolve uma infraestrutura mínima composta por conexão estável à internet, plataformas seguras de comunicação, sistemas de prontuário eletrônico e, em alguns casos, dispositivos médicos conectados. De acordo com a Resolução CFM nº 2.314/2022, é imprescindível que essas tecnologias assegurem a confidencialidade dos dados, o sigilo profissional e a integridade

do ato médico, de modo a garantir que a prática da telemedicina mantenha os mesmos padrões éticos e técnicos da medicina presencial (CFM, 2022).

A referida resolução reconhece oficialmente diferentes modalidades de telemedicina, cada uma com finalidades específicas no exercício profissional. Entre as principais, destacam-se:

- Teleconsulta: atendimento direto entre médico e paciente realizado de forma remota, por meio de videoconferência ou outro recurso digital síncrono;
- Teleinterconsulta: troca de informações clínicas entre médicos, visando subsidiar diagnósticos, condutas terapêuticas ou encaminhamentos;
- Telediagnóstico: emissão de laudos a distância, com base em dados e imagens enviados por profissionais de saúde, especialmente em exames complementares;
- Telemonitoramento: acompanhamento contínuo de pacientes, com base em parâmetros fisiológicos monitorados por dispositivos ou sistemas remotos;
- Prescrição eletrônica: emissão de receitas médicas digitais com certificação eletrônica, consoante os requisitos legais de validade;
- Segunda opinião formativa: solicitação de parecer técnico adicional, geralmente por especialistas, para apoio em casos clínicos de maior complexidade.
- Telecirurgia: realização de procedimentos cirúrgicos a distância, por meio de sistemas robóticos e tecnologias de comunicação de alta precisão e baixa latência. Permite que cirurgiões especializados atuem remotamente em pacientes localizados em diferentes regiões, ampliando o acesso a procedimentos complexos em locais desprovidos de profissionais ou infraestrutura adequada.

Essas modalidades consolidam um conjunto de práticas que ampliam significativamente o alcance e a resolutividade da assistência médica, especialmente em regiões com acesso restrito a especialistas ou infraestrutura hospitalar (CFM, 2022).

No contexto brasileiro, as aplicações práticas da telemedicina têm desempenhado um papel estratégico na superação de desigualdades regionais no acesso à saúde. Sua implementação é especialmente relevante em áreas remotas ou com escassez de profissionais especializados, como comunidades ribeirinhas, indígenas, populações rurais e pequenas cidades do interior. Programas públicos, como o Telessaúde Brasil Redes, desenvolvido pelo Ministério da Saúde, utilizam a telemedicina para viabilizar a segunda opinião médica, promover o telediagnóstico em atenção básica e otimizar a logística de encaminhamentos. Além disso, a telemedicina vem sendo aplicada com êxito em contextos específicos, como em unidades móveis de saúde, serviços penitenciários, monitoramento de pacientes crônicos, e em respostas a emergências de saúde pública, como ocorreu amplamente durante a pandemia da COVID-19 (Kur, 2023; Lisboa, 2023).

A infraestrutura técnica mínima para a realização de teleatendimentos médicos deve garantir condições seguras, eficazes e adequadas à prática clínica a distância. De acordo com o Portal Telemedicina (2021), o funcionamento básico desse tipo de atendimento exige, no mínimo, três pilares essenciais: um dispositivo com câmera e microfone (como notebook, smartphone ou tablet), uma conexão de internet estável e uma plataforma digital confiável para realizar a comunicação entre paciente e profissional. Esses recursos tecnológicos viabilizam a realização de consultas síncronas (em tempo real), com boa qualidade de áudio e vídeo, e permitem o envio e compartilhamento de informações clínicas, como exames e prescrições. Além disso, para contextos clínicos mais avançados, é possível integrar à consulta remota dispositivos médicos digitais, como estetoscópios eletrônicos, termômetros infravermelhos e oxímetros, ampliando o escopo de avaliação à distância.

Conforme estabelece a Resolução CFM nº 2.314/2022, os serviços de telemedicina devem garantir o sigilo profissional, a confidencialidade dos dados e a integridade dos atos médicos realizados por meios digitais, assegurando que tais práticas sigam os mesmos padrões éticos e técnicos da medicina presencial. Para isso, as plataformas digitais utilizadas devem incorporar mecanismos robustos de segurança da informação, como criptografia ponta a ponta, autenticação de acesso, rastreabilidade das operações e armazenamento seguro dos registros clínicos.

Complementarmente, a Lei Geral de Proteção de Dados (Lei nº 13.709/2018) reforça a obrigatoriedade do tratamento responsável e transparente de dados pessoais sensíveis, como aqueles relacionados à saúde, estabelecendo diretrizes legais para sua coleta, armazenamento, compartilhamento e eliminação. A conformidade com essas normativas constitui requisito indispensável para a legitimidade, a segurança e a sustentabilidade jurídica dos serviços de saúde mediada por tecnologia.

A utilização de plataformas de telemedicina em nuvem, como a da Telemedicina Morsch, permite o armazenamento seguro e o acesso remoto a dados clínicos, otimizando custos e facilitando o trabalho de profissionais de saúde. Para garantir o bom funcionamento, especialmente em videoconferências, é essencial contar com internet estável e de qualidade. Ferramentas como Zoom e Google Meet exigem boa conexão para manter a fluidez do atendimento, tornando a infraestrutura de conectividade um elemento crucial, especialmente em regiões remotas (Morsch, 2023).

Entre as principais plataformas utilizadas para telemedicina destacam-se o Zoom Saúde, que oferece videoconferências em alta definição, gravação de consultas e compartilhamento de exames; o Google Meet, integrado ao Google Workspace, com recursos como legendas automáticas e armazenamento seguro; e o Microsoft Teams Saúde, que permite chamadas, troca de mensagens e gestão de documentos com criptografia. A Doctoralia Especialistas também se destaca por integrar agendamento, envio automático de links e conformidade com a LGPD. Além disso, ferramentas mais acessíveis como WhatsApp Business, Skype e Telegram são utilizadas em atendimentos simples, possibilitando chamadas, envio de arquivos e comunicação rápida entre médico e paciente (PORTAL PÓS, 2021).

2.1.3 Telemedicina em Áreas Remotas

A necessidade de ampliar o acesso à saúde em áreas isoladas e rurais representa um desafio crescente, como destaca Silva Júnior (2024). Essas regiões frequentemente enfrentam limitações severas em termos de infraestrutura física, energética e tecnológica, além da escassez de profissionais de saúde. Esse cenário compromete a oferta de serviços médicos contínuos e de qualidade, evidenciando a importância de soluções alternativas, como a telemedicina, para garantir o atendimento à população em contextos de difícil acesso. Nesse contexto, a implementação da telemedicina configura-se como uma estratégia viável e inovadora para mitigar as barreiras geográficas e estruturais, contribuindo de forma significativa para a ampliação do acesso aos cuidados de saúde em localidades remotas e de difícil alcance.

A utilização de dispositivos conectados à internet viabiliza, por meio da telemedicina, uma ampla gama de serviços, que vão desde consultas de baixa complexidade até o monitoramento contínuo de doenças crônicas e o acompanhamento terapêutico. Essa modalidade de atendimento contribui não apenas para facilitar o acesso aos cuidados de saúde, mas também para garantir a continuidade do tratamento, fator essencial na gestão adequada de diversas patologias. Além disso, pacientes que anteriormente precisavam percorrer longas distâncias para obter atendimento médico, mesmo para condições simples, agora podem ser diagnosticados remotamente, o que reduz significativamente tanto os custos quanto o desgaste físico e emocional associado às viagens (Oliveira, 2024).

A infraestrutura de telecomunicações, no entanto, é um dos principais elementos que condicionam o acesso desigual à telemedicina no Brasil. Estudos demonstram que a conectividade à internet e a qualidade das redes são significativamente superiores em áreas urbanas, resultado de maior investimento em tecnologias da informação e comunicação. Em contrapartida, regiões rurais, em especial no Norte e Nordeste do país, ainda enfrentam sérias limitações de cobertura, com sinal instável e acesso restrito a dispositivos digitais adequados ao uso de plataformas de saúde digital (Oliveira, 2024). Tais obstáculos comprometem a efetividade da implementação da telemedicina, restringindo a realização de consultas remotas e outros atendimentos clínicos mediados por tecnologia.

Os autores completam ainda que, segundo Ferreira et al. (2022), além dos problemas relacionados à infraestrutura, fatores socioeconômicos também contribuem significativamente para dificultar o acesso à telemedicina. Em comunidades de regiões menos desenvolvidas, é comum que a população tenha renda mais baixa, o que limita a possibilidade de adquirir dispositivos eletrônicos necessários, como celulares, computadores ou tablets. Essa realidade acaba restringindo o uso efetivo das tecnologias de saúde remota, comprometendo a inclusão dessas pessoas nos atendimentos médicos à distância. Diante desse cenário, torna-se imprescindível a adoção de soluções práticas, confiáveis e energeticamente autônomas, que viabilizem o atendimento médico remoto mesmo em contextos adversos.

2.2 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA: PRINCÍPIOS, SISTEMAS E APLICAÇÕES

A energia solar fotovoltaica destaca-se como uma alternativa sustentável para a geração de eletricidade em regiões isoladas, onde a ausência de infraestrutura elétrica representa um desafio. Sua aplicação torna-se particularmente relevante no suporte à telemedicina, pois garante o fornecimento de energia necessário para o funcionamento de equipamentos médicos, sistemas de comunicação e conectividade em áreas remotas.

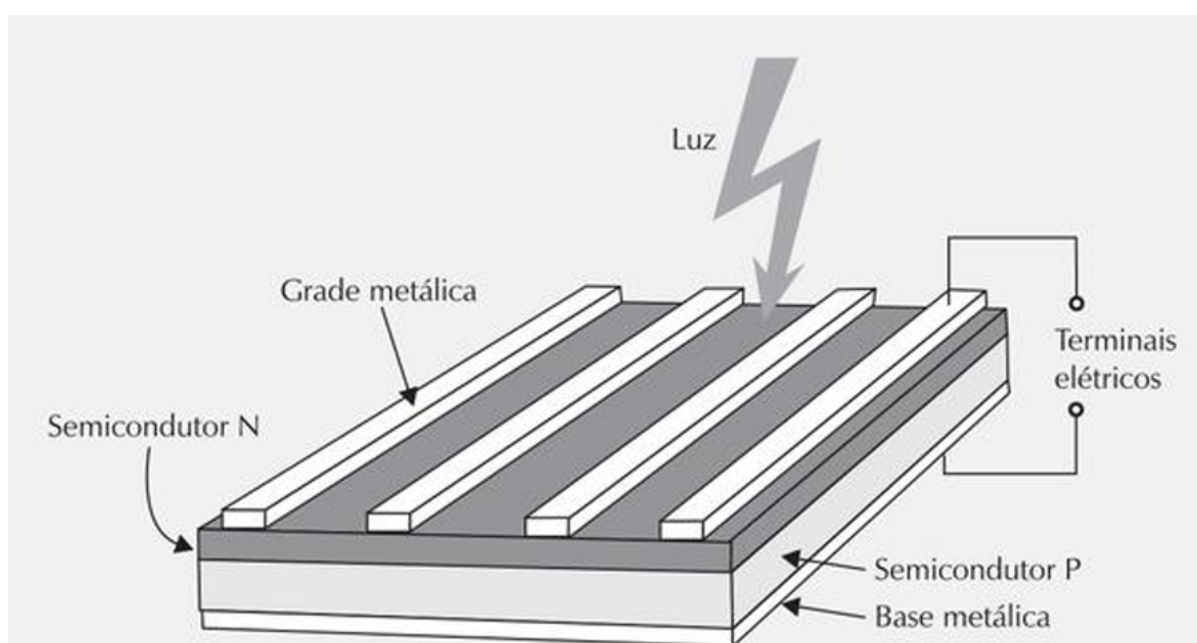
2.2.1 Fundamentos da Energia Solar Fotovoltaica

A energia solar fotovoltaica baseia-se na conversão direta da radiação solar em energia elétrica por meio do chamado efeito fotovoltaico. Para Villalva (2015), esse fenômeno ocorre quando a luz incide sobre materiais semicondutores com propriedades específicas (geralmente o silício), promovendo a movimentação de elétrons e, assim, gerando corrente elétrica contínua.

As células fotovoltaicas — unidades básicas dos módulos solares — são geralmente compostas por duas camadas de material semicondutor dopadas de forma diferente: tipo P (positiva) e tipo N (negativa), formando uma junção PN. Essa estrutura é complementada por uma grade metálica superior, que permite a entrada da luz e atua como terminal elétrico coletor, e por uma base metálica inferior, feita com materiais como alumínio ou prata, que fecha o circuito elétrico (Villalva, 2015).

A estrutura básica de uma célula fotovoltaica pode ser observada na figura 2, que apresenta seus principais componentes e o caminho percorrido pela radiação solar até a conversão em energia elétrica.

Figura 2 – Estrutura de uma célula fotovoltaica



Quando exposta à luz, a célula fotovoltaica gera um campo elétrico que direciona os elétrons livres, produzindo uma diferença de potencial entre seus terminais. A união de várias células forma os módulos fotovoltaicos, que podem ser conectados em série ou paralelo, conforme as necessidades de tensão e corrente do projeto. A interligação desses módulos compõe o gerador fotovoltaico, responsável por captar a radiação solar e convertê-la em energia elétrica. A eficiência do sistema depende da intensidade da radiação, da área ativa e das características eletroeletrônicas do arranjo, como o tipo de célula e a configuração adotada (Ferreira, 2022).

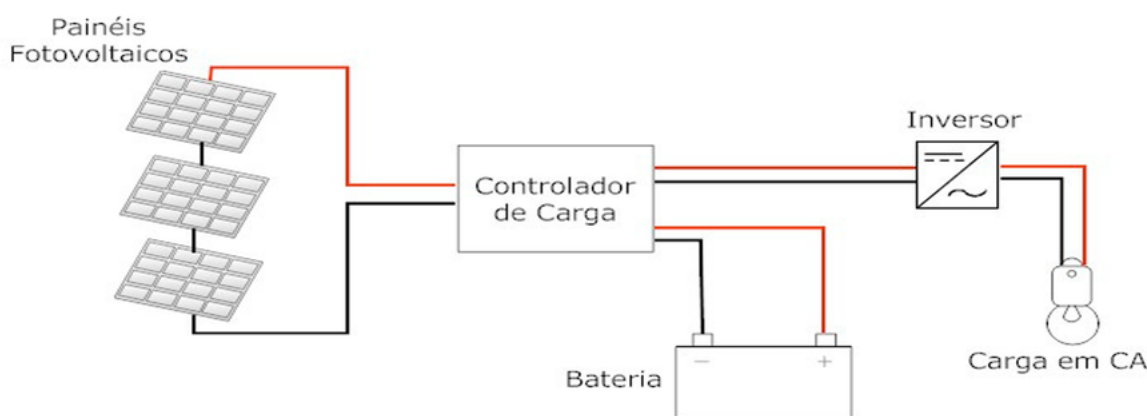
2.2.2 Tipos de Sistemas Fotovoltaicos

Esta seção apresenta os tipos de sistemas fotovoltaicos e suas aplicações, ressaltando a importância dos sistemas off-grid para garantir o fornecimento de energia em regiões remotas, especialmente quando associados ao suporte da telemedicina.

2.2.2.1 Sistema Off-Grid (Isolado e Autônomo)

O sistema fotovoltaico off-grid (figura 3), também conhecido como sistema isolado e autônomo, é projetado para operar de forma completamente independente da rede elétrica convencional. Ijaille (2021) destaca que os sistemas fotovoltaicos isolados constituem uma solução estratégica para o fornecimento de energia elétrica em localidades que não são atendidas pela rede convencional de distribuição.

Figura 3 – Esquema de um sistema fotovoltaico autônomo



Fonte: SERRÃO, 2010

Sua aplicação é especialmente indicada em áreas remotas ou de difícil acesso, onde a expansão da infraestrutura elétrica se revela tecnicamente inviável, economicamente desvantajosa ou ambientalmente sensível. Em tais contextos, os sistemas off-grid representam uma alternativa autônoma e sustentável, possibilitando o suprimento energético sem a necessidade de conexão

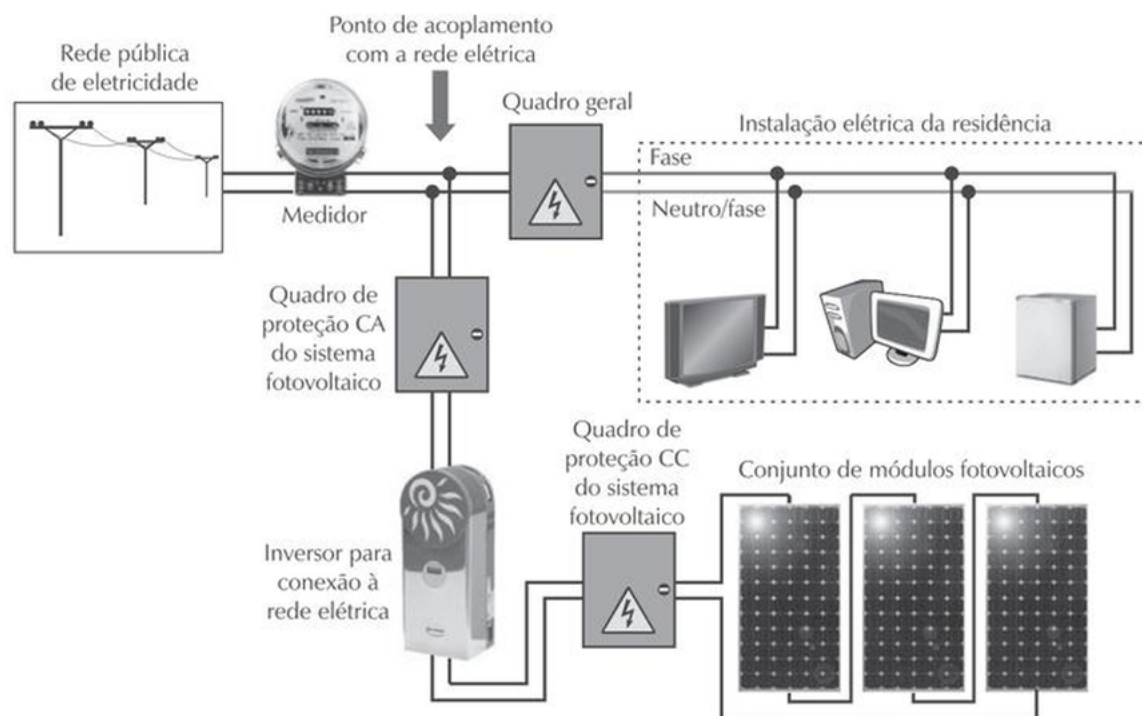
com a concessionária, sendo, portanto, fundamentais em regiões que enfrentam restrições logísticas, operacionais ou ecológicas (Ijaille, 2021).

Além de essenciais em locais sem acesso à rede elétrica, os sistemas fotovoltaicos autônomos também se destacam por sua versatilidade e confiabilidade em aplicações que exigem independência energética. Segundo Vilalva (2015), são utilizados em iluminação pública, sinalização viária, telecomunicações, recarga de veículos elétricos, embarcações, equipamentos portáteis, estruturas temporárias, bases científicas, áreas militares e até em sistemas aeroespaciais. Sua adoção vai além da falta de infraestrutura, atendendo a demandas técnicas, logísticas e ambientais específicas.

Nesse tipo de sistema, a energia solar captada pelos módulos é utilizada diretamente pelos equipamentos ou armazenada em um banco de baterias, assegurando o fornecimento mesmo durante períodos de baixa irradiação solar ou à noite. Essa característica torna o modelo particularmente eficaz para locais em que a geração instantânea não é suficiente para suprir o consumo, exigindo, portanto, uma solução de armazenamento energética confiável (Ferreira, 2022).

2.2.2.2 *Sistema Conectado à Rede Elétrica (On-Grid)*

Os sistemas fotovoltaicos on-grid, representados na figura 4, são conectados diretamente à rede pública e amplamente utilizados em áreas urbanas com infraestrutura elétrica consolidada. Sua operação depende da presença da rede, pois a geração e a injeção de energia ocorrem de forma sincronizada com o fornecimento da concessionária. Dessa forma, deixam de funcionar durante interrupções no fornecimento, mesmo com radiação solar disponível. São recomendados para locais com fornecimento elétrico estável e regulamentação favorável à microgeração distribuída, conforme as diretrizes da ANEEL (Alves, 2024).

Figura 4 – Organização e componentes de um sistema fotovoltaico residencial conectado à rede elétrica.

Fonte: VILLALVA, 2015

O funcionamento de um sistema fotovoltaico on-grid, conforme explica Alves (2024), baseia-se na conversão da energia solar captada pelos módulos em eletricidade utilizável por meio de um inversor interligado à rede pública. A energia gerada em corrente contínua (CC) é convertida em corrente alternada (CA) pelo inversor, tornando-se compatível com os padrões da rede elétrica convencional. Essa energia, então, é direcionada a um medidor bidirecional, o qual registra simultaneamente a quantidade de energia injetada na rede pelo sistema fotovoltaico e a energia consumida da rede pela unidade consumidora.

Dessa forma, o sistema opera sob o regime de compensação de energia elétrica, regulamentado pela Resolução Normativa nº 1000/2021 da ANEEL, que estabelece os critérios para o acesso, medição e faturamento da energia gerada e consumida pelos sistemas de microgeração distribuída. Nesse modelo, o consumidor é faturado apenas pela diferença líquida entre a energia injetada e a consumida da rede, permitindo uma significativa economia na conta de luz. No entanto, como depende da rede pública para operar, o sistema on-grid interrompe seu funcionamento em caso de queda no fornecimento elétrico, mesmo havendo irradiação solar disponível.

Na figura 4, observam-se os três principais componentes que constituem um sistema fotovoltaico do tipo on-grid: os módulos fotovoltaicos, o inversor e o medidor de energia interligado à rede elétrica pública.

- **Módulos fotovoltaicos:** desempenham a função de converter a radiação solar incidente em energia elétrica em corrente contínua (CC). Essa etapa é fundamental para o aprovei-

tamento da energia solar, porém, a eletricidade gerada nesse formato não é compatível com a maioria dos equipamentos eletroeletrônicos convencionais, os quais operam em corrente alternada (CA).

- **Inversor:** assume papel essencial ao realizar a conversão da corrente contínua para corrente alternada, ajustando a frequência e a tensão de modo compatível com a rede elétrica. Além disso, o inversor garante o sincronismo entre o sistema fotovoltaico e a rede pública, viabilizando o envio de excedentes de energia gerada para a concessionária quando a produção supera o consumo local.
- **Medidor de energia:** responsável por quantificar o fluxo bidirecional de eletricidade, registrando tanto o consumo de energia oriunda da rede quanto a energia excedente injetada pelo sistema fotovoltaico. Esse monitoramento é indispensável para a contabilização e compensação energética, conforme previsto nas regulamentações brasileiras de micro e minigeração distribuída.

Segundo Villalva (2015), esses componentes, juntamente com os quadros de proteções, operam de forma integrada, permitindo que os sistemas fotovoltaicos conectados à rede sejam altamente eficientes, econômicos e compatíveis com o perfil de consumo energético das edificações urbanas.

2.2.2.3 *Sistema Híbrido*

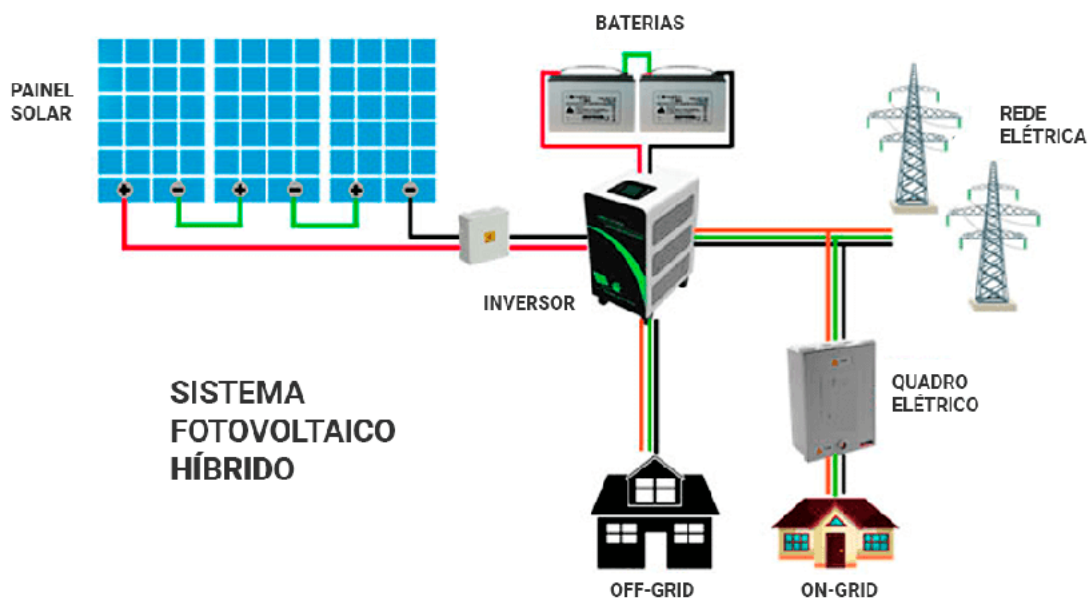
Conforme Pinho e Galdino (2014), os sistemas híbridos de energia são caracterizados pela utilização de mais de uma fonte primária de geração — renovável ou não — com o objetivo de atender às demandas energéticas de forma coordenada, eficiente e com menor incidência de interrupções. Essa configuração permite explorar a complementaridade entre as fontes disponíveis, otimizando o uso dos recursos energéticos conforme sua disponibilidade, o que contribui para a redução de custos operacionais e para a melhoria da qualidade no fornecimento de energia elétrica.

Esses sistemas, que podem combinar módulos fotovoltaicos, turbinas eólicas e geradores a diesel, exigem controles avançados para integrar dinamicamente as diferentes fontes, considerando os perfis de carga e geração. Devido à sua flexibilidade, são ideais para regiões remotas ou aplicações que demandam alto grau de confiabilidade. Também podem ser implementados em residências conectadas à rede pública, operando em modo on-grid com backup — configuração em que o sistema permanece interligado à rede elétrica, mas conta com suporte de baterias ou outras fontes auxiliares para garantir o fornecimento em eventuais falhas da concessionária. (Pinho e Galdino, 2014).

Na figura 5, apresenta-se um exemplo de sistema híbrido que combina configurações on-grid e off-grid, integrando fontes de energia renovável com sistemas de armazenamento, de

modo a garantir a continuidade e a confiabilidade do fornecimento energético em diferentes condições operacionais.

Figura 5 – Diagrama de funcionamento de um sistema fotovoltaico híbrido



Fonte: SEC POWER, 2024

2.2.3 Componentes e Conceitos Fundamentais para o Dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos Off-Grid

Como discutido na subseção 2.2.2.1, os sistemas fotovoltaicos off-grid destacam-se como solução ideal para localidades desprovidas de acesso à rede elétrica convencional, bem como para aplicações que demandam autonomia energética, como o presente estudo. A efetividade desses sistemas está diretamente relacionada ao correto entendimento de seus princípios de funcionamento e da interação entre os seus principais componentes.

Assim, esta seção tem por objetivo apresentar os elementos estruturais que compõem um sistema off-grid, descrevendo suas respectivas funções no processo de conversão da radiação solar em energia elétrica, no armazenamento da energia gerada e em sua posterior disponibilização para consumo. Além disso, serão abordados os conceitos técnicos fundamentais que subsidiam o correto dimensionamento e operação desses sistemas, assegurando seu desempenho adequado nas condições propostas.

2.2.3.1 *Módulos Fotovoltaicos*

Os módulos fotovoltaicos dos sistemas off-grid, assim como nos sistemas on-grid, são os componentes responsáveis pela captação da radiação solar e sua conversão direta em energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico. São compostos por associações de células fotovoltaicas interligadas em série e paralelo, o que permite atingir tensões e correntes adequadas ao uso. As conexões em série garantem a elevação da tensão de saída, enquanto as ligações em paralelo aumentam a corrente elétrica e contribuem para mitigar perdas por sombreamento parcial (Fortunato, 2023).

Nos sistemas autônomos, é comum o uso de módulos com tensão de operação em 12 V, o que exige a utilização de dispositivos compatíveis, como inversores, controladores de carga e baterias específicos. Para essas aplicações, os módulos de 36 células são os mais indicados, devido à sua menor tensão de saída. Por outro lado, os módulos de 60 células são mais frequentemente utilizados em sistemas conectados à rede elétrica (on-grid), pois operam com tensões mais elevadas (Villalva, 2015).

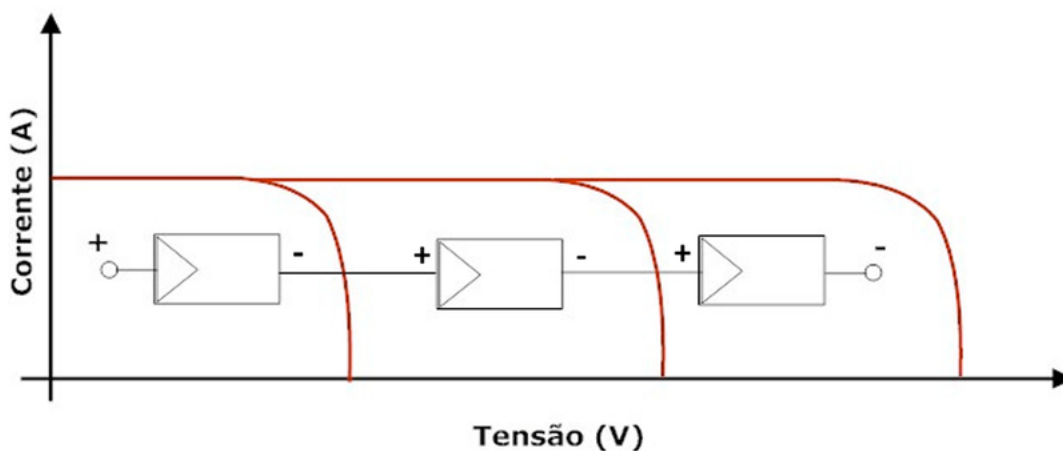
De acordo com Villalva (2014), os módulos fotovoltaicos podem ser organizados em diferentes arranjos de modo a atender às exigências de tensão e corrente do sistema. Esses arranjos (compostos por ligações em série, paralelo ou combinações entre ambas), são fundamentais para o dimensionamento adequado de sistemas fotovoltaicos, especialmente nos modelos isolados. A escolha da topologia de ligação deve considerar o perfil de carga, as condições de irradiância local, os riscos de sombreamento parcial e as características elétricas dos equipamentos utilizados.

Tais critérios influenciam diretamente no desempenho e na confiabilidade do sistema. A seguir, com base nas descrições técnicas fornecidas por Serrão (2014), são apresentadas as principais formas de associação de módulos fotovoltaicos, suas propriedades elétricas, modos de ligação e implicações operacionais.

- **Associação em Série**

Na associação em série (figura 6), os terminais positivos e negativos dos módulos são interligados sequencialmente: o terminal positivo de um módulo conecta-se ao terminal negativo do próximo, e assim sucessivamente. Nessa configuração, as tensões dos módulos se somam, enquanto a corrente permanece constante em toda a cadeia. É adequada quando se deseja elevar a tensão do sistema, o que permite a utilização de condutores com menor seção transversal, reduzindo perdas elétricas. Contudo, essa topologia é mais sensível a sombreamentos: o desempenho de toda a série pode ser comprometido por um único módulo afetado.

Figura 6 – Esquema de ligação de módulos em série

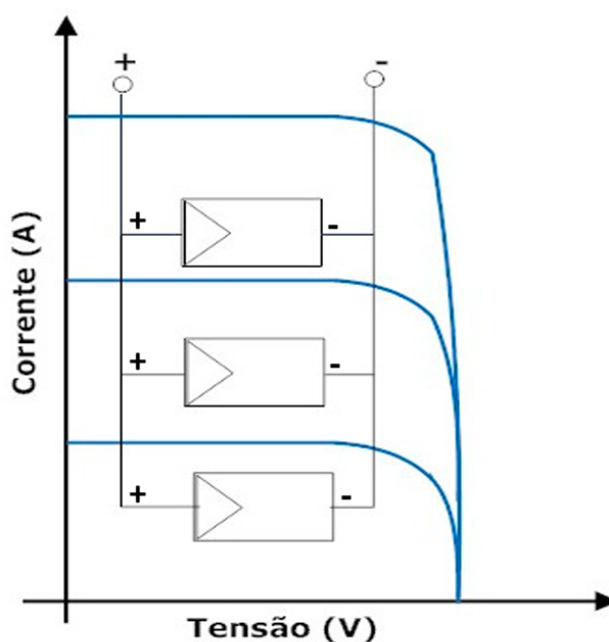


Fonte: Adaptada de SERRÃO, 2010

- Associação em Paralelo

Na associação em paralelo (figura 7), os terminais positivos dos módulos são ligados entre si, e o mesmo ocorre com os terminais negativos. Nessa disposição, as correntes se somam, enquanto a tensão permanece igual à de um único módulo. Essa configuração é indicada para sistemas que operam em baixa tensão, como os off-grid de 12 V, e apresenta maior tolerância a sombreamentos parciais, já que a perda de desempenho em um módulo não compromete os demais.

Figura 7 – Esquema de ligação de módulos em paralelo

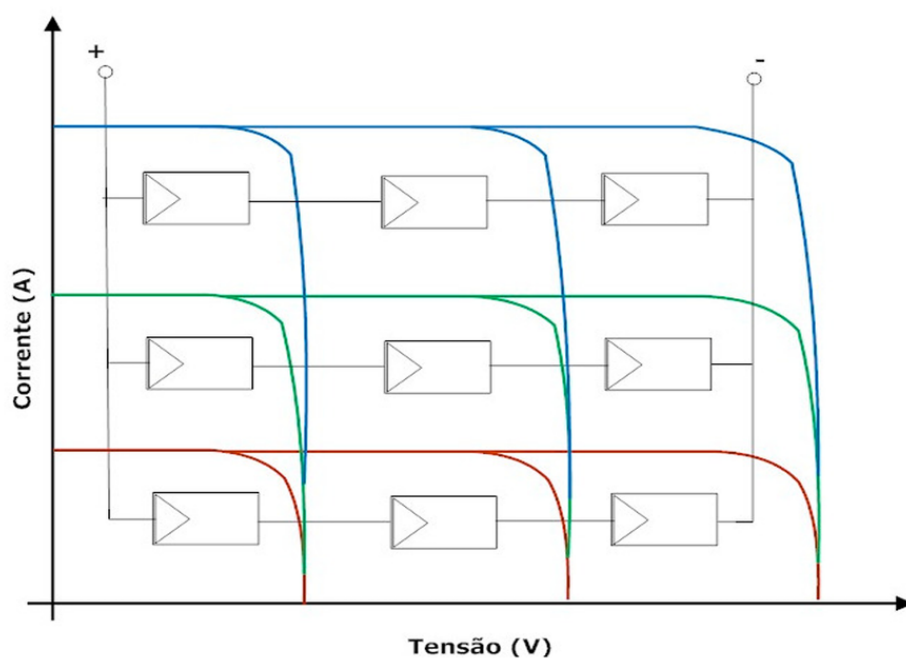


Fonte: Adaptada de SERRÃO, 2010

- **Associação em Série e Paralelo**

A combinação de ligações em série e paralelo é amplamente utilizada em sistemas que demandam tanto ajuste de tensão quanto de corrente. Nessa configuração, grupos de módulos ligados em série são conectados entre si em paralelo, conforme ilustrado na figura 8. Essa abordagem permite maior flexibilidade no dimensionamento do arranjo, adequando-o às características dos inversores, controladores de carga e bancos de baterias utilizados no sistema. A conexão mista favorece um equilíbrio entre eficiência energética e segurança operacional.

Figura 8 – Esquema de ligação de módulos em série-paralelo



Fonte: SERRÃO, 2010

Além das características construtivas dos módulos fotovoltaicos, Pinho e Galdino (2014) destacam que a caracterização elétrica desses dispositivos é essencial para compreender seu desempenho e definir sua adequação a diferentes tipos de sistemas. Essa caracterização é realizada principalmente por meio da análise das curvas I–V (corrente versus tensão) e P–V (potência versus tensão), obtidas a partir de ensaios conduzidos sob condições padrão de teste. A partir dessas curvas, são extraídos parâmetros elétricos fundamentais, dentre os quais, para os autores, se destacam:

- **Potência Máxima (P):**

Representa o valor máximo de potência elétrica que o módulo é capaz de fornecer quando operando em condições ideais. Esse ponto é conhecido como ponto de máxima potência (MPP – Maximum Power Point), e ocorre na combinação ótima entre corrente e tensão.

- **Corrente no Ponto de Máxima Potência (I):**

Corresponde à corrente elétrica fornecida pelo módulo quando este está operando exatamente em seu ponto de máxima potência.

- **Tensão no Ponto de Máxima Potência (V):**

É a tensão correspondente ao ponto de máxima potência. Juntamente com I_{mp} , determina a potência ideal entregue pelo módulo.

- **Tensão de Circuito Aberto (V_c):**

Refere-se à tensão máxima disponível entre os terminais do módulo quando este não está conectado a nenhuma carga (isto é, quando a corrente é nula). É útil para análise de diagnóstico e segurança.

- **Corrente de Curto-Circuito (I_c):**

É a corrente elétrica que flui quando os terminais do módulo são diretamente conectados entre si, sem resistência. Representa a corrente máxima possível sob irradiância plena.

- **Eficiência do Módulo (%):**

Define a capacidade do módulo de converter a energia solar incidente em energia elétrica. Esse valor depende da tecnologia das células, da temperatura de operação e das condições de irradiância. Em geral, é obtido pela razão entre a potência elétrica gerada e a potência solar incidente na área do módulo.

A eficiência dos sistemas fotovoltaicos pode ser significativamente comprometida por sombreamentos, mesmo que parciais. Como as células fotovoltaicas são geralmente conectadas em série, a redução de radiação em uma única célula limita a corrente elétrica de todo o módulo. Para evitar tais perdas e riscos, é essencial que os módulos sejam instalados em locais com baixa incidência de sombreamento ao longo do dia, considerando fatores como edificações, vegetação ou sujeira acumulada (Pinho e Galdino, 2014).

2.2.3.2 Baterias

As baterias constituem o principal meio de armazenamento de energia em sistemas fotovoltaicos off-grid, operando em corrente contínua e com tensões nominais típicas de 12 V, 24 V ou 48 V. Sua função é garantir o fornecimento contínuo de energia elétrica durante períodos de baixa ou nenhuma irradiação solar, como durante a noite ou em dias nublados. Diversas tecnologias são empregadas na fabricação desses acumuladores, destacando-se as baterias de chumbo-ácido (tradicional e selada), níquel-cádmio (Ni-Cd), íon de lítio (Li-ion) e fosfato de ferro-lítio (LiFePO_4), sendo estas últimas especialmente valorizadas por sua elevada vida útil, segurança térmica e maior profundidade de descarga (Silva, 2025).

- **Baterias de chumbo-ácido:** Leal (2024) descreve que as baterias de chumbo-ácido funcionam a partir de reações eletroquímicas entre eletrodos de chumbo metálico (ânodo) e dióxido de chumbo (cátodo), submersos em uma solução de ácido sulfúrico que atua como eletrólito. As baterias de chumbo-ácido apresentam, entre suas principais vantagens, o baixo custo por Wh, ampla disponibilidade no mercado, elevada confiabilidade, razoável densidade energética e elevado potencial de reciclabilidade, podendo alcançar até 99% de reaproveitamento de seus materiais constituintes.

No entanto, essa tecnologia também possui limitações significativas. Destaca-se, por exemplo, sua sensibilidade à elevação da temperatura, fator que compromete o desempenho eletroquímico e reduz a vida útil do acumulador. Por essa razão, recomenda-se sua aplicação em ambientes com temperatura controlada, preferencialmente na faixa de 25°C a 30°C. Além disso, essas baterias apresentam vida útil mais curta em comparação com outras tecnologias modernas, além de possuírem maior peso e volume, e risco potencial de emissão de gases tóxicos em caso de sobrecarga ou falhas estruturais. A seguir, são apresentadas as características mais dos principais tipos de baterias usadas em sistemas fotovoltaicos (Leal, 2024; Silva, 2025).

- **Baterias de Níquel-Cádmio:** apresentam uma estrutura física semelhante à das baterias de chumbo-ácido, porém com diferenças significativas em sua composição eletroquímica. Nessa tecnologia, as placas catódicas são constituídas por hidróxido de níquel (Ni(OH)_2), enquanto as placas anódicas utilizam cádmio metálico (Cd) ou ligas de cádmio e ferro. O eletrólito, por sua vez, é uma solução aquosa de hidróxido de potássio (KOH), com concentrações típicas variando entre 20% e 34%, atuando como meio condutor iônico entre os eletrodos (Pinho e Galdino, 2014).

Quando comparadas às baterias de chumbo-ácido, as baterias de níquel-cádmio apresentam um custo inicial aproximadamente 5,24% superior, contudo, esse investimento é compensado por vantagens operacionais relevantes, como a menor necessidade de manutenção e um ciclo de vida significativamente mais longo. Além disso, essa tecnologia demonstra maior tolerância térmica, sendo menos sensível ao aumento de temperatura ambiente. Em função disso, é recomendada para aplicações em ambientes com temperaturas de até 35°C a 40°C, mantendo estabilidade operacional e desempenho eletroquímico satisfatório (Ferreira, 2021).

- **Baterias de íon-lítio:** utilizam o mesmo processo eletroquímico básico das baterias de chumbo-ácido, operando por meio da transferência reversível de íons entre os eletrodos durante os ciclos de carga e descarga. No processo de carregamento, os íons de lítio migram do eletrodo positivo (cátodo), geralmente composto por óxido de cobalto de lítio, para o eletrodo negativo (ânodo), tipicamente formado por grafite, acumulando energia no sistema. Durante a descarga, os íons retornam ao cátodo, liberando energia elétrica para alimentar os dispositivos conectados (Leal, 2024).

Entre as vantagens mais expressivas dessa tecnologia, destacam-se a alta densidade de energia, que permite armazenar maior quantidade de energia por unidade de volume ou massa; a baixa taxa de autodescarga, que minimiza perdas durante o tempo em repouso; e a ausência do efeito memória, possibilitando ciclos de carga e descarga parcial sem prejuízo ao desempenho. Por outro lado, as desvantagens incluem o risco de superaquecimento e combustão em caso de falhas térmicas ou elétricas, além do impacto ambiental associado à extração do lítio e à complexidade do descarte, uma vez que esse tipo de bateria apresenta menor potencial de reciclagem em comparação às baterias de chumbo-ácido (Leal, 2024).

- **Baterias de fosfato de ferro-lítio:** pertencentes à classe das baterias de íons de lítio, operam por meio da migração reversível de íons de lítio entre dois eletrodos durante os ciclos de carga e descarga. Sua composição eletroquímica utiliza o LiFePO como material ativo no cátodo e carbono (geralmente grafite) no ânodo, além de um eletrólito formado por sal de lítio dissolvido em solventes orgânicos. Durante a carga, os íons de lítio se deslocam do cátodo para o ânodo, onde são armazenados; na descarga, retornam ao cátodo, liberando energia para alimentar a carga. (STA Eletrônica, 2023).

Entre suas principais vantagens, destacam-se a longa vida útil, que pode ultrapassar 6.000 ciclos de carga e descarga completos, a alta eficiência energética, a baixa taxa de autodescarga e a capacidade de operação em uma ampla faixa de temperaturas, normalmente entre -20°C e 60°C. Além disso, as baterias LiFePO₄ não sofrem com o chamado efeito memória, permitindo recargas parciais sem comprometimento da capacidade total, e apresentam baixa resistência interna, o que proporciona carregamento mais rápido e menor dissipação de calor. Outro aspecto relevante é sua menor toxicidade ambiental, pois não utilizam metais pesados como chumbo ou cádmio, e são relativamente mais fáceis de reciclar, apesar de ainda enfrentarem desafios no processo de reaproveitamento industrial (STA Eletrônica, 2023).

Compreender e monitorar os parâmetros operacionais das baterias é uma etapa fundamental para garantir a eficiência, a segurança e a longevidade dos sistemas de armazenamento de energia. Segundo Leal (2024), o controle adequado dessas variáveis permite não apenas otimizar o desempenho das baterias, mas também assegurar sua operação dentro dos limites técnicos recomendados, minimizando perdas e aumentando a confiabilidade da solução energética adotada. Dessa forma, a seguir, são apresentados e discutidos os principais parâmetros técnicos que devem, na perspectiva do autor, ser considerados no dimensionamento, na seleção e na operação de baterias em sistemas fotovoltaicos off-grid.

1. Capacidade Nominal (Ah)

Refere-se à quantidade total de carga elétrica que a bateria é capaz de armazenar, expressa em ampère-hora (Ah). Esse valor influencia diretamente a autonomia do sistema e, quando multiplicado pela tensão nominal, fornece a energia total armazenada em watt-hora (Wh).

2. Energia Armazenada (Wh)

Corresponde à energia disponível na bateria, sendo resultado do produto entre a capacidade nominal (Ah) e a tensão de operação (V). É o parâmetro mais utilizado no dimensionamento energético de sistemas solares off-grid.

3. Profundidade de Descarga (DoD – Depth of Discharge)

Indica a proporção da capacidade total que é utilizada em um ciclo de descarga. Uma DoD de 80% significa que a bateria pode ser descarregada até 80% de sua carga total. Baterias com maior tolerância à profundidade de descarga, como as LiFePO_4 , oferecem melhor aproveitamento energético sem comprometer a vida útil.

4. Estado de Carga (SoC – State of Charge)

Representa o nível atual de carga da bateria em relação à sua capacidade total, geralmente expresso em porcentagem. Um SoC de 100% indica carga completa, enquanto um SoC de 0% representa descarga total.

5. Eficiência Energética (%)

É a razão entre a energia liberada durante a descarga e a energia absorvida na recarga. Altos índices de eficiência (acima de 90%) são desejáveis, pois indicam menor perda de energia no processo de armazenamento e liberação.

6. Ciclo de Vida Útil

Refere-se ao número de ciclos completos de carga e descarga que uma bateria pode realizar antes de sofrer redução significativa de sua capacidade nominal.

7. Faixa de Temperatura de Operação

Define os limites térmicos nos quais a bateria pode operar de maneira segura e eficiente. A operação fora dessa faixa pode comprometer o desempenho, a capacidade de carga e a vida útil. As baterias de fosfato de ferro-lítio (LiFePO_4), por exemplo, operam entre $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ com estabilidade térmica elevada.

8. Taxa de Autodescarga

Refere-se à perda natural de carga quando a bateria está em repouso, sem uso. Quanto menor essa taxa, maior a capacidade de armazenamento a longo prazo. Em baterias de lítio, essa taxa é tipicamente inferior a 3% ao mês.

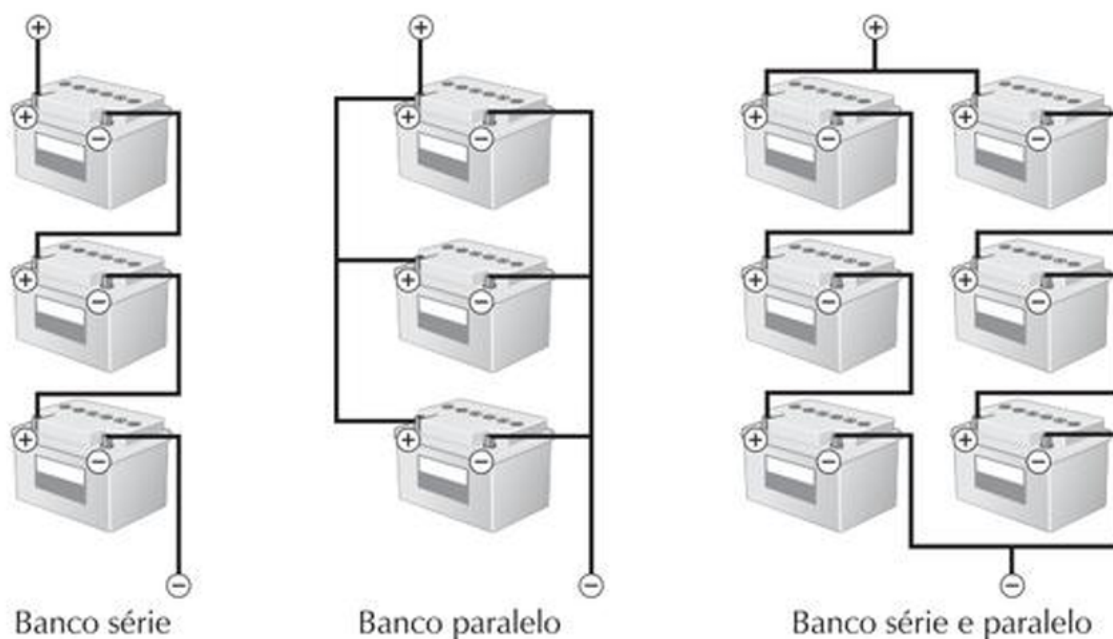
9. Tensão Nominal (V)

É a tensão típica fornecida pela bateria em regime normal de operação. A escolha da tensão deve ser compatível com os demais componentes do sistema (inversores, controladores etc.).

Villalva (2015) afirma que em sistemas fotovoltaicos off-grid, a capacidade de armazenamento de energia pode ser ajustada por meio da associação de múltiplas baterias, formando assim um banco de baterias. Essa configuração é essencial quando a energia necessária para o sistema supera os limites de uma única unidade de armazenamento, tanto em termos de tensão quanto de capacidade de corrente. Para o autor, as baterias podem ser conectadas de três formas principais: em série, em paralelo ou por meio de uma combinação de ambas, conforme descrito abaixo e na figura 9.

- 1) **Associação em série:** as tensões de cada bateria são somadas, enquanto a corrente permanece constante. Essa configuração é utilizada quando se deseja aumentar a tensão total do banco, mantendo a capacidade em ampère-hora (Ah) inalterada. A ligação é feita conectando-se o terminal positivo de uma bateria ao terminal negativo da próxima, sucessivamente, até formar o arranjo completo. Os terminais livres nas extremidades (o negativo da primeira bateria e o positivo da última) representam os polos do banco. Por exemplo, quatro baterias de 12 V e 100 Ah conectadas em série resultarão em um banco de 48 V e 100 Ah. Essa elevação da tensão é importante para reduzir perdas por efeito Joule e para compatibilidade com inversores e controladores que operam em tensões mais altas, como 48 V.
- 2) **Associação em paralelo:** a tensão do sistema permanece a mesma da bateria individual, mas as correntes são somadas, o que resulta em maior capacidade de armazenamento (Ah). A conexão é realizada ligando em comum todos os terminais positivos entre si e todos os terminais negativos entre si. Dessa forma, cria-se um barramento em que todas as baterias contribuem com corrente para a mesma tensão. Essa estratégia é indicada quando se busca aumentar a autonomia do sistema ou suprir cargas que demandam maiores correntes, mantendo a tensão em um nível padronizado.
- 3) **Associação mista (série-paralelo):** combina as vantagens das duas anteriores. Nessa configuração, agrupam-se baterias em série para atingir a tensão desejada e, em seguida, replicam-se esses grupos em paralelo para aumentar a capacidade do banco. A montagem segue o princípio de conectar baterias em série dentro de cada grupo, e posteriormente interligar os terminais positivos entre si e os negativos entre si entre os grupos. Essa solução é recomendada quando o sistema exige simultaneamente tensão elevada e elevada capacidade de fornecimento de energia, como é o caso de aplicações de média potência em ambientes isolados. Essa estrutura proporciona flexibilidade de dimensionamento, sendo amplamente adotada em projetos que exigem confiabilidade, modularidade e possibilidade de expansão.

Figura 9 – Associação de baterias



Fonte: VILLALVA, 2015

2.2.3.3 Controlador de Carga

O Controlador de carga é uma peça-chave em sistemas fotovoltaicos com baterias, pois ele gerencia de forma inteligente a energia entre os módulos e o armazenamento. Sua principal função é proteger as baterias contra condições operacionais prejudiciais, como a sobrecarga e a descarga excessiva, sendo essencial para garantir sua durabilidade e desempenho. Para Villalva (2015), as funções principais do controlador de carga envolvem:

- 1) **Proteção contra sobrecarga** – Impede que a bateria seja carregada além do seu limite de segurança. No caso das baterias estacionárias de chumbo-ácido, essa proteção atua quando a tensão atinge valores entre 14,4 V e 15,5 V. O controlador interrompe o carregamento ao desconectar o painel solar, evitando danos ao acumulador.
- 2) **Proteção contra descarga excessiva** – Também chamada de desconexão por baixa tensão, essa função desliga automaticamente o consumo do sistema quando a tensão da bateria atinge níveis críticos, geralmente por volta de 10,5 V em baterias de chumbo-ácido. Isso evita a descarga profunda, que pode comprometer significativamente a vida útil da bateria.
- 3) **Gerenciamento inteligente da carga da bateria** – Alguns controladores mais avançados realizam o carregamento em múltiplos estágios, respeitando o perfil da bateria. Esse gerenciamento melhora a eficiência da carga e prolonga a durabilidade do sistema de armazenamento.

- 4) **Estágio de absorção** – Quando a tensão da bateria atinge cerca de 14,4 V a 15,5 V, o controlador mantém a tensão constante, enquanto a corrente diminui gradualmente. Esse processo permite que a bateria atinja 100% de sua carga de forma controlada e segura.
- 5) **Estágio de flutuação** – Após a carga total, o controlador mantém a tensão da bateria entre 13,2 V e 13,8 V, garantindo que ela permaneça carregada sem sofrer sobrecarga. Nessa fase, a tensão é ajustada conforme a temperatura ambiente, respeitando as especificações do fabricante.

Além das funções de proteção, existem dois tipos principais de controladores de carga, cada um com características específicas e vantagens distintas, conforme explicado pelo Canal Solar (2025):

1) **Controlador PWM (Modulação por Largura de Pulso):**

Esse tipo de controlador atua como um interruptor eletrônico entre o painel fotovoltaico e a bateria. Sua operação é relativamente simples: quando a bateria atinge uma determinada tensão, o controlador reduz a corrente de carga por meio de pulsos, evitando a sobrecarga. É uma opção mais acessível e comumente utilizada em pequenos sistemas, embora apresente menor eficiência energética, já que não aproveita toda a potência fornecida pelo módulo.

2) **Controlador MPPT (Rastreamento do Ponto de Máxima Potência):**

Esse tipo de controlador é mais avançado tecnologicamente. Ele é capaz de rastrear continuamente o ponto de máxima potência do sistema fotovoltaico, ajustando a tensão de entrada de forma a extrair a maior quantidade possível de energia dos módulos. Isso o torna ideal para sistemas em que a tensão do painel difere da tensão do banco de baterias ou em condições de baixa irradiância, oferecendo uma eficiência significativamente maior em comparação ao PWM.

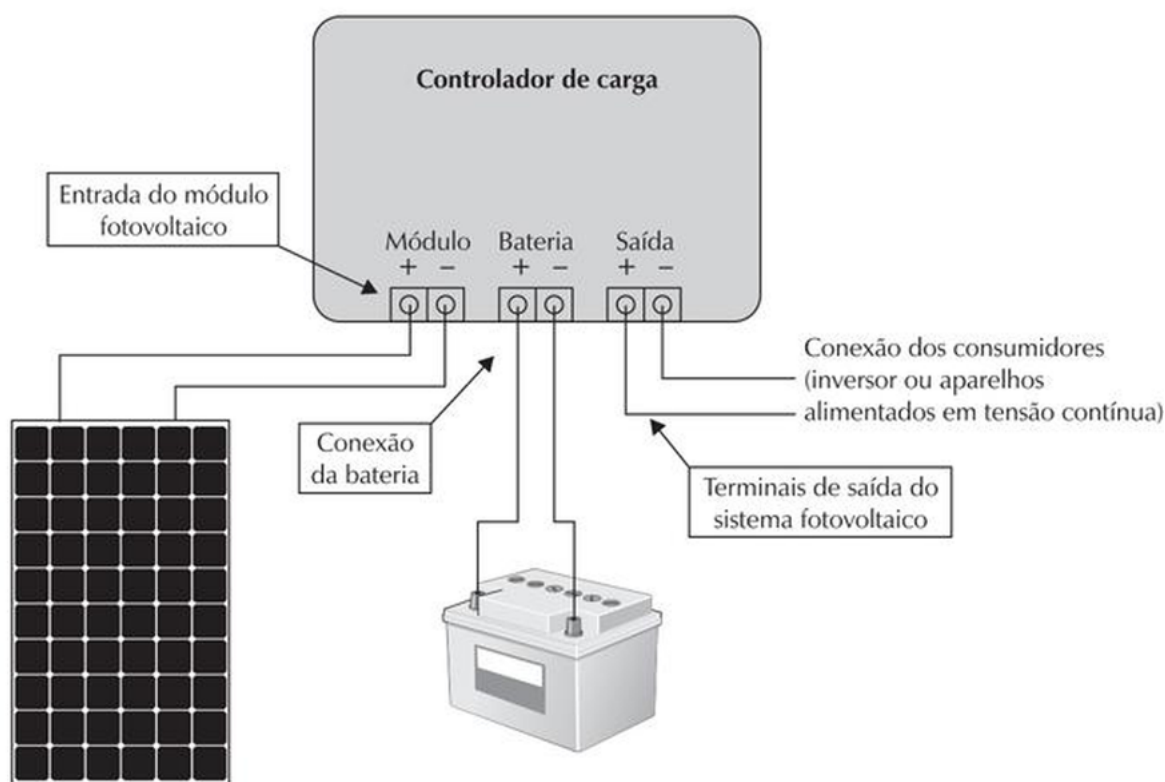
As especificações técnicas dos controladores de carga são determinantes para sua correta aplicação e desempenho no sistema fotovoltaico. Entre os principais parâmetros que devem ser observados, Alves (2024) destaca:

- 1) **Tensão nominal** – Valor padrão de operação para o qual o controlador foi projetado. Deve ser compatível com a tensão do sistema fotovoltaico (como 12 V, 24 V ou 48 V), garantindo a adequada integração entre os componentes.
- 2) **Tipo de bateria** – Refere-se à compatibilidade do controlador com o tipo de bateria utilizada, como chumbo-ácido, AGM, gel ou lítio. Essa correspondência é fundamental para que os ciclos de carga e descarga ocorram conforme as características específicas do acumulador.
- 3) **Corrente de carga** – Representa a corrente máxima que o controlador pode suportar durante o carregamento. O valor deve ser superior ou igual à corrente fornecida pelo arranjo fotovoltaico, a fim de evitar sobreaquecimento e falhas no equipamento.

- 4) **Potência de carga** – É a potência máxima que o controlador pode receber dos módulos fotovoltaicos. Deve ser dimensionada de acordo com a potência total do sistema, prevenindo sobrecarga e prolongando a vida útil do dispositivo.
- 5) **Tensão máxima de circuito aberto (Voc)** – Indica o limite superior de tensão de entrada suportado pelo controlador. Este parâmetro deve ser igual ou superior à tensão de circuito aberto do arranjo fotovoltaico, considerando variações ambientais como temperatura e irradiância.

A figura 10 representa a configuração de uso de um controlador de carga em um sistema fotovoltaico off-grid. Nesse arranjo, a energia elétrica gerada pelo módulo fotovoltaico é direcionada inicialmente ao controlador de carga, que regula a distribuição adequada dessa energia no sistema. A bateria, conjuntamente com o módulo fotovoltaico, fornece tensão e corrente para a alimentação de um inversor ou de dispositivos que operam em corrente contínua, assegurando a autonomia energética da carga conectada.

Figura 10 – Modo de utilização de um controlador de carga



Fonte: VILLALVA, 2015

No controlador MPPT, a conexão dos consumidores deve ser realizada diretamente nos terminais de saída do controlador, e não na própria bateria. Essa prática permite que o controlador monitore continuamente o nível de carga do banco de baterias e atue automaticamente quando

forem atingidos limites críticos de descarga, interrompendo temporariamente o fornecimento de energia para proteger a integridade da bateria. Caso os consumidores sejam conectados diretamente à bateria, sem intermediação do controlador, essa função de segurança é perdida, o que pode acarretar em sobrecargas, danos ao acumulador e redução significativa de sua vida útil (Villalva, 2015).

2.2.3.4 *Inversor*

Inversores são dispositivos fundamentais em sistemas fotovoltaicos autônomos, pois realizam a conversão da energia elétrica de corrente contínua (CC) — gerada pelos módulos fotovoltaicos ou armazenada no banco de baterias — em corrente alternada (CA), padrão utilizado pela maioria dos equipamentos eletroeletrônicos convencionais. Embora existam aparelhos desenvolvidos para operar diretamente em corrente contínua, esses ainda são pouco acessíveis no mercado, possuem custos elevados e, muitas vezes, apresentam menor eficiência, o que limita sua aplicação em larga escala. Por essa razão, a adoção de inversores se torna essencial para garantir a compatibilidade do sistema fotovoltaico com a infraestrutura elétrica tradicional (Pinho e Galdino, 2014; Villalva, 2015).

Inversores eletrônicos destinados a sistemas fotovoltaicos off-grid estão disponíveis em uma ampla gama de potências e faixas de tensão de entrada, com valores típicos de 12 V, 24 V ou 48 V. A escolha da tensão de entrada está relacionada à configuração do banco de baterias e à potência demandada pela carga, sendo os modelos de 48 V os mais indicados para sistemas de maior porte ou que necessitam de maior eficiência energética. A correta especificação do inversor deve considerar aspectos como a potência nominal, capacidade de sobrecarga (potência de v_i), eficiência de conversão, forma de onda de saída (preferencialmente senoidal pura) e recursos de proteção eletrônica, a fim de garantir segurança, desempenho e confiabilidade ao sistema (Villalva, 2015).

Os inversores utilizados em sistemas fotovoltaicos off-grid possuem características operacionais específicas, que são indicadas nos catálogos técnicos disponibilizados pelos fabricantes e devem ser rigorosamente respeitadas para garantir uma instalação correta, segura e eficiente. Esses parâmetros são fundamentais para assegurar a compatibilidade entre o inversor, os módulos fotovoltaicos e o banco de baterias, além de evitar falhas operacionais ou perda de desempenho. Villalva (2025) apresenta as principais características dos inversores empregados comercialmente, como descrito a seguir.

- **Potência Nominal**

Representa a potência que o inversor pode fornecer de forma contínua, em condições normais de operação. Deve ser compatível com a soma das potências dos equipamentos que serão alimentados simultaneamente pelo sistema.

- **Potência Máxima**

Indica a potência que o inversor consegue fornecer por um curto período, geralmente alguns segundos, em situações de pico de demanda, como na partida de motores elétricos (geladeiras, bombas d'água, etc.). Essa capacidade extra evita sobrecarga e garante maior robustez ao sistema.

- **Tensão de Entrada (CC)**

Refere-se à faixa de tensão contínua que o inversor suporta na entrada, proveniente do banco de baterias. Os valores mais comuns são 12 V, 24 V e 48 V. A escolha deve ser compatível com os demais componentes do sistema, como o controlador de carga e as baterias.

- **Tensão de Saída (CA)**

Corresponde à tensão alternada que o inversor disponibiliza na saída. Pode ser fixa ou selecionável (por chave comutadora), sendo compatível com os padrões de tensão elétrica utilizados no país — no Brasil, geralmente 127 V ou 220 V.

- **Frequência de Saída**

Representa a frequência da onda alternada gerada pelo inversor. No Brasil, os equipamentos devem operar com frequência de 60 Hz, em conformidade com o sistema elétrico nacional.

- **Regulação de Tensão**

Trata-se da capacidade do inversor de manter a tensão de saída estável mesmo com variações na carga. Bons inversores apresentam baixa variação de tensão (regulação de 0% a 10%), garantindo maior estabilidade ao sistema e segurança aos aparelhos conectados.

- **Eficiência**

Expressa a relação entre a energia de saída e a energia de entrada, geralmente em porcentagem. Inversores de boa qualidade apresentam eficiência superior a 90%, sendo os modelos mais modernos capazes de alcançar até 98%. Isso reflete diretamente no melhor aproveitamento da energia gerada.

- **Forma de Onda de Saída**

Define o formato do sinal alternado gerado pelo inversor. Os tipos mais comuns são:

- 1) Onda senoidal pura: reproduz com precisão a forma de onda da rede elétrica, sendo a mais indicada para aparelhos sensíveis.
- 2) Onda senoidal modificada: uma forma intermediária de distorção e de geração de ruídos entre a onda senoidal pura e a onda quadrada

- 3) Onda Quadrada: apresentam maior distorção e podem causar problemas em equipamentos eletrônicos delicados.

- **Distorção Harmônica**

É um indicador da qualidade da forma de onda da tensão alternada. Inversores com distorção harmônica total (THD) inferior a 5% são considerados adequados para aplicações críticas e sensíveis.

- **Proteção contra Curto-Circuito**

Recurso de segurança que evita danos ao equipamento em caso de curto-circuito na saída. Pode ser implementada por meio de fusíveis ou sistemas eletrônicos automáticos de desligamento e reinicialização.

- **Proteção contra Reversão de Polaridade**

Protege o inversor contra danos causados por ligações incorretas nos terminais de entrada CC. Essa função é essencial para evitar a queima de componentes internos por conexão invertida da bateria ou dos painéis.

2.2.3.5 *Conceitos Fundamentais*

Cunha (2024) destaca que, para que o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos off-grid ocorra de maneira segura e eficiente, é indispensável compreender os conceitos teóricos fundamentais, o funcionamento dos principais dispositivos do sistema e a correta análise dos dados técnicos. Esse conhecimento constitui a base para o desenvolvimento de projetos estruturados e adaptados às necessidades energéticas específicas, considerando também as variáveis ambientais locais. Dessa forma, os conceitos a seguir, juntamente com outros já apresentados anteriormente, são considerados fundamentais para um dimensionamento adequado e eficiente do sistema.

- **Irradiação Solar**

Irradiação solar é a quantidade de energia proveniente do Sol que incide sobre uma determinada área em um dado intervalo de tempo. A unidade mais comum para sua medição é o watt-hora por metro quadrado (Wh/m^2) (Neris, 2023).

Na figura 11, é possível observar os valores médios anuais do total diário de irradiação solar nas cinco regiões do Brasil. A Região Nordeste destaca-se por apresentar o maior potencial solar, com média diária de irradiação global horizontal de $5,49 \text{ kWh/m}^2$ e componente direta normal de $5,05 \text{ kWh/m}^2$. As regiões Sudeste e Centro-Oeste apresentam valores semelhantes de irradiação global horizontal, com médias diárias em torno de $5,07 \text{ kWh/m}^2$ (Pereira et al., 2017, p.67)

Figura 11 – Níveis de irradiação solar por região brasileira



Fonte: PEREIRA et al., 2017, p.67

• Horas de Sol Pleno (HSP)

A quantidade de Horas de Sol Pleno (HSP) representa o número de horas durante as quais a irradiância solar deveria permanecer constante e igual a 1 kW/m², de forma que o total de energia acumulada ao longo do dia seja equivalente à energia solar efetivamente disponível no local. Assim, a HSP não corresponde ao tempo real de exposição ao sol, mas sim a uma

equivalência energética que facilita o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos, padronizando a análise da irradiação solar diária (Sousa, 2021).

- **Demanda Energética**

A demanda é a média das potências elétricas que os equipamentos em operação em uma unidade consumidora solicitam do sistema elétrico durante um intervalo de tempo específico. Essa medição é crucial porque, ao ser multiplicada pelo tempo de uso, ela determina o consumo total de energia elétrica necessário para suprir todas as cargas previstas no sistema tradicional (Pinho e Galdino, 2014)

- **Consumo Médio Diário**

O consumo médio diário de energia elétrica representa a quantidade total de energia que os equipamentos elétricos consomem em um dia típico de uso, levando em conta o tempo médio diário de funcionamento de cada aparelho e sua respectiva potência. Esse valor é obtido multiplicando-se a potência (em watts) de cada equipamento pelo tempo de uso diário (em horas), somando-se os resultados de todos os dispositivos utilizados. Esse é um dos primeiros passos no dimensionamento de um sistema fotovoltaico, pois define a demanda energética diária que o sistema deve atender, servindo como base para o dimensionamento dos módulos solares, controladores de carga, inversores e banco de baterias (quando aplicável) (Ribeiro, 2020).

- **Capacidade de Armazenamento (Baterias)**

A capacidade de armazenamento de uma bateria refere-se à quantidade total de energia elétrica que o sistema de armazenamento é capaz de reter após o processo de carga, sendo expressa normalmente em watt-hora (Wh) ou quilowatt-hora (kWh). Esse parâmetro determina a autonomia do sistema, ou seja, por quanto tempo as cargas conectadas poderão ser alimentadas em períodos sem geração solar. Vale destacar que a capacidade efetiva disponível para uso pode variar conforme a profundidade de descarga (DoD), a temperatura de operação, a idade da bateria e outros fatores operacionais que afetam seu desempenho ao longo do tempo (Campos, 2024).

- **Perdas no Sistema**

As perdas em sistemas fotovoltaicos, para a Academia do Sol (2021), referem-se à diferença entre a energia teórica que poderia ser gerada sob condições ideais e a energia efetivamente entregue pelo sistema. Essas perdas ocorrem em diferentes etapas da conversão e transmissão da energia solar, abrangendo fatores como sombreamento parcial, sujeira nos módulos, aquecimento excessivo (efeito térmico), perdas nos cabos, eficiência dos inversores e tolerância de fabricação dos módulos. Também entram nesse conjunto as perdas associadas à degradação dos componentes com o tempo e às condições ambientais adversas. A quantificação adequada dessas perdas é essencial para o dimensionamento realista e para a avaliação da viabilidade técnica do sistema, influenciando diretamente no rendimento global da instalação.

2.3 CONECTIVIDADE EM REGIÕES REMOTAS: TECNOLOGIAS E PARÂMETROS CRÍTICOS

Nesta seção é abordada a conectividade em regiões remotas, evidenciando os principais desafios relacionados à limitação de infraestrutura digital e de cobertura de rede. Destaca-se a relevância de soluções tecnológicas que possam superar essas barreiras, garantindo o acesso à informação e viabilizando a oferta de serviços essenciais, como a telemedicina.

2.3.1 Panorama da Conectividade em Regiões Remotas

As disparidades no acesso às Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC) no Brasil evidenciam, segundo a PwC Brasil (2022), um grave desequilíbrio na distribuição da infraestrutura digital, sobretudo em áreas rurais, comunidades isoladas e regiões com baixa densidade populacional. Nesses cenários, a ausência de cobertura de banda larga, a precariedade das redes móveis e a limitação de investimentos públicos e privados comprometem o direito à conectividade enquanto vetor de inclusão social, econômica e sanitária.

Ainda conforme a PwC Brasil (2022), embora se observe avanço na cobertura digital em áreas urbanas, milhares de localidades permanecem tecnicamente desconectadas ou subatendidas, dificultando a implementação de políticas públicas baseadas em tecnologia, como os serviços de telemedicina. Frente a esse desafio, tornam-se fundamentais soluções de conectividade que prescindam da infraestrutura terrestre convencional, a exemplo das redes de satélites de órbita baixa, capazes de oferecer acesso estável e de longo alcance geográfico, viabilizando a comunicação em tempo real mesmo em ambientes remotos.

Em áreas rurais e remotas, a expansão da conectividade enfrenta sérias limitações estruturais. A ausência de cabeamento óptico, a escassez de torres e estações rádio-base, além da baixa atratividade econômica para operadoras, resultam em investimentos insuficientes na infraestrutura de telecomunicações. Fatores geográficos, como matas densas, terrenos irregulares e grandes distâncias entre comunidades, elevam os custos de implantação e dificultam a manutenção. A falta de acesso confiável à energia elétrica agrava a instabilidade dos serviços, comprometendo o funcionamento contínuo dos equipamentos. Como consequência, essas regiões permanecem excluídas de soluções digitais essenciais, como a telemedicina (OPT TELECOM, 2024).

2.3.2 Tecnologias de Acesso à Internet em Áreas Isoladas

O acesso à internet em áreas remotas representa um desafio recorrente para a inclusão digital no Brasil. Para enfrentar essa questão, diversas tecnologias vêm sendo adotadas, cada uma com características específicas, vantagens e limitações.

1) **Redes Móveis (3G, 4G e 5G)**

As redes móveis funcionam por meio da comunicação entre dispositivos móveis (como celulares e modems) e antenas terrestres conhecidas como Estações Rádio-Base (ERB). Embora 3G e 4G já estejam amplamente difundidos, sua cobertura em áreas isoladas é limitada pela necessidade de instalação dessas antenas. O 5G, especialmente em sua versão FWA (Fixed Wireless Access), é uma evolução que permite o uso de antenas fixas para prover acesso a internet de alta velocidade a domicílios e instituições, mesmo em locais onde a fibra não chega. Essa alternativa tem se mostrado promissora, sobretudo para conectar escolas em algumas regiões rurais (Ministério das Comunicações, 2025). No entanto, o custo de implantação da infraestrutura 5G ainda é elevado, o que pode retardar sua expansão em áreas remotas.

2) Redes de Rádio (Wi-Fi ponto-a-ponto de longa distância e enlaces ponto-a-ponto WiMAX)

As redes de rádio utilizam radiação eletromagnética transmitidas entre antenas. Os enlaces ponto-a-ponto funcionam como uma ponte direta entre dois locais, exigindo visada livre (linha reta sem obstáculos) entre os equipamentos. O WiMAX é uma tecnologia de banda larga sem fio que cobre longas distâncias, ideal para prover acesso comunitário, porém está cada vez mais em desuso devido ao seu alto custo e pouca disponibilidade no mercado. Essas soluções são eficientes e de baixo custo operacional, mas exigem conhecimento técnico e manutenção especializada para garantir estabilidade (FUTURECOM, 2024).

3) Fibra Óptica ou Cabo Metálico

A fibra óptica funciona através da transmissão de sinais de luz por cabos feitos de vidro ou plástico, permitindo velocidades altíssimas e latência extremamente baixa. Já o cabo metálico (geralmente par trançado ou coaxial) transmite sinais elétricos e é mais limitado em termos de desempenho. Apesar de serem tecnologias robustas, a instalação física em áreas remotas é cara e complexa, muitas vezes economicamente inviável devido à topografia ou ausência de infraestrutura básica (FUTURECOM, 2024).

4) Internet via Satélite

Essa tecnologia funciona com a comunicação entre uma antena parabólica instalada no local do usuário e satélites em órbita da Terra. O sinal viaja da antena até o satélite e depois até uma estação terrestre ligada à internet global. Com a chegada de satélites de órbita baixa (LEO), como as constelações da Starlink, Kuiper e Space Sail, a latência foi significativamente reduzida, tornando essa opção cada dia mais eficiente. A principal vantagem é a abrangência: satélites podem cobrir regiões completamente isoladas. Contudo, o alto custo de aquisição do equipamento e das mensalidades ainda é um obstáculo para comunidades de baixa renda (Franzoni, 2023).

2.3.3 Arquitetura e Funcionamento da Internet via Satélite

Os satélites são corpos que orbitam um astro maior, podendo ser classificados em naturais, como a Lua, ou artificiais, quando desenvolvidos e lançados pelo ser humano com finalidades específicas. No contexto das telecomunicações, os satélites artificiais são dispositivos orbitais empregados para retransmitir sinais de dados, voz e vídeo, viabilizando a comunicação em larga escala e superando limitações geográficas da infraestrutura terrestre convencional (Pires, 2023).

A internet via satélite, em concordância com Duarte (2023) e Magalhães (2024), constitui uma solução tecnológica robusta para prover conectividade em localidades remotas, com infraestrutura terrestre limitada ou inexistente. Diferentemente dos modelos tradicionais baseados em cabeamento físico ou torres de transmissão, essa tecnologia opera a partir de uma arquitetura que utiliza enlaces de rádio de alta frequência entre a superfície terrestre e satélites de comunicações posicionados em órbita. A estrutura de comunicação via satélite é normalmente baseada em uma topologia em estrela (*star topology*), composta por três segmentos principais: o segmento de usuário, o segmento espacial e o segmento terrestre, conforme explicam Duarte (2023) e Magalhães (2024):

1) Segmento de Usuário (User Segment):

Refere-se à infraestrutura instalada nas dependências do usuário final, denominada CPE (Customer Premises Equipment), cuja principal interface é o terminal VSAT (*Very Small Aperture Terminal*). Esse conjunto técnico é composto por:

- **Antena parabólica externa** (diâmetro entre 75 cm e 1,2 m), responsável pela recepção e emissão de sinais de rádio.
- **Modem satelital**, que realiza a conversão dos pacotes IP em sinais de radiofrequência (RF) e vice-versa.
- **Roteador**, que distribui a conexão internamente via rede local (LAN), seja por cabo ou via Wi-Fi.

2) Segmento Espacial (Space Segment):

Composto pelos satélites de comunicações, que atuam como repetidores de sinal em órbita. Esses satélites podem operar em:

- **Órbita geoestacionária (GEO)**, a 35.786 km de altitude, com cobertura ampla e latência muito alta.
- **Órbita baixa (LEO)**, de 500 a 2.000 km, com menor latência e maior desempenho em aplicações síncronas. Cada satélite é equipado com transponders, que recebem sinais de uplink, amplificam, mudam sua frequência para downlink e retransmitem à Terra.

3) Segmento Terrestre (Ground Segment):

Representado pelas estações de solo ou *gateways*, que conectam o sistema satelital à internet global. Essas estações incluem:

- Antenas de grande porte (entre 5 m e 18 m de diâmetro);
- Sistemas de modulação/demodulação e roteamento;
- Conexão com backbones de fibra óptica de alta capacidade;
- O NOC (Network Operations Center), que gerencia, monitora e controla o tráfego de dados e o desempenho da rede.

Os autores explicam ainda que o fluxo de dados é bidirecional e segue uma cadeia de etapas definidas:

- **Enlace ascendente (uplink do usuário):**

A solicitação de dados originada em um dispositivo (ex.: solicitação de página web) é convertida pelo modem em sinal de RF e transmitida pela antena VSAT terrestre ao satélite.

- **2. Processamento no satélite:**

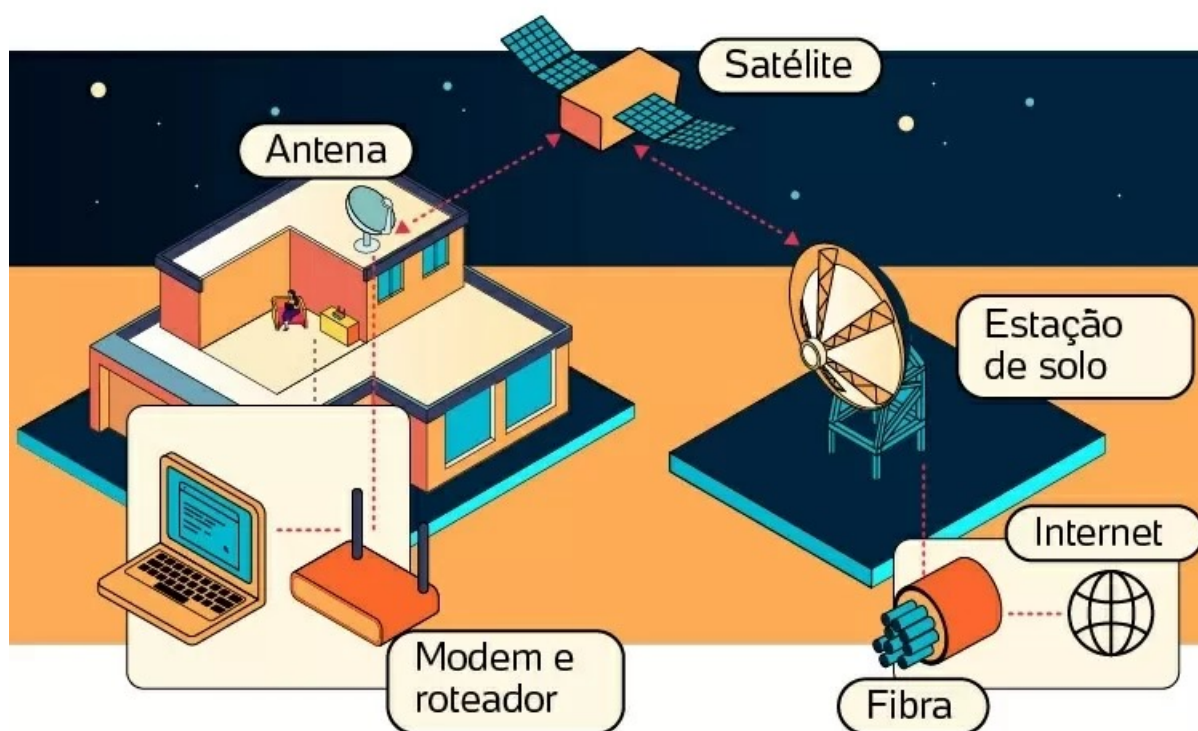
O transponder do satélite recebe o sinal, amplifica e converte sua frequência (para evitar interferência), e o retransmite em downlink para a estação terrestre (gateway).

- **Enlace descendente (CPEs dos clientes):**

A resposta do servidor trafega de volta pelo gateway, é modulada em RF, retransmitida pelo satélite até o terminal do usuário, onde o modem demodula e entrega os dados à rede local (LAN/Wi-Fi).

A figura 12 ilustra a arquitetura da internet via satélite, conforme descrita anteriormente, evidenciando a integração entre os segmentos de usuário, espacial e terrestre que viabilizam a comunicação bidirecional entre dispositivos remotos e a internet global.

Figura 12 – Esquema de funcionamento da internet via satélite



Fonte: Zamaroli, 2023 apud Duarte, 2023

Atualmente, diversas empresas oferecem serviços de internet via satélite, sendo que uma das que mais tem se destacado nesse mercado é a SpaceX, por meio da sua rede Starlink. Como principal fornecedora global de lançamentos espaciais, a SpaceX detém a capacidade exclusiva de lançar seus próprios satélites de acordo com a demanda operacional. Isso permite atualizações frequentes e eficientes, incorporando constantemente tecnologias de ponta. Diferentemente dos sistemas tradicionais, que operam com satélites geoestacionários a aproximadamente 35.786 km da superfície terrestre, resultando em altas latências e limitações para aplicações como streaming, chamadas de vídeo e jogos online, a proposta da Starlink apresenta um diferencial estratégico (Starlink, 2025).

A Starlink consiste em uma constelação de milhares de satélites posicionados em órbitas baixas, aproximadamente a 550 km da Terra. Essa configuração permite uma cobertura global mais eficaz e uma latência variável significativamente inferior, reduzida para cerca de 25 milissegundos — muito abaixo da média superior (de 600ms a 800ms) observada em sistemas convencionais. Como resultado, os serviços proporcionados pela Starlink viabilizam experiências mais estáveis e responsivas para atividades que exigem alta taxa de transferência e comunicação em tempo real (Starlink, 2025).

2.3.4 Parâmetros Técnicos de Qualidade de Conexão de Internet

A qualidade percebida pelos usuários em serviços de internet banda larga, conforme Vieira (2024), depende diretamente de parâmetros técnicos que caracterizam o desempenho da rede. Entre os principais indicadores utilizados para essa avaliação têm-se:

1) **Velocidade de Download**

A velocidade de download corresponde à taxa de transferência de dados da internet para o dispositivo do usuário, sendo um indicador fundamental da qualidade de acesso em aplicações como streaming, navegação em páginas web e downloads de arquivos. Esse parâmetro, usualmente expresso em megabits por segundo (Mbps), está diretamente relacionado à agilidade no carregamento e à fluidez no consumo de conteúdo digital. No entanto, sua eficiência pode ser comprometida por variáveis como o nível de congestionamento da rede, a distância até o ponto de acesso e o tipo de tecnologia empregada na conexão, como fibra óptica, cabo coaxial, DSL ou enlaces via rádio (SILVA, 2025).

2) **Velocidade de Upload**

A velocidade de upload refere-se à taxa de envio de dados do terminal do usuário para a internet, sendo um elemento essencial para atividades que exigem interação em tempo real, como videoconferências, transmissões ao vivo e envio de arquivos para servidores em nuvem. Em ambientes residenciais, é comum que essa velocidade seja significativamente inferior à de download, enquanto em redes corporativas ou em contextos profissionais, uma maior capacidade de upload é imprescindível para garantir a estabilidade e o desempenho adequado nas comunicações digitais (Silva, 2025).

3) **Latência**

Representa o tempo necessário para que um pacote de dados trafegue entre dois pontos da rede, sendo medida em milissegundos (ms). Valores reduzidos de latência indicam maior velocidade e melhor responsividade, sendo especialmente relevantes em aplicações sensíveis a atrasos, como videoconferências e jogos online. Em tais contextos, atrasos superiores a determinados limiares podem comprometer significativamente a experiência do usuário (Briscoe, 2016, apud Vieira, 2024).

4) **Jitter**

Refere-se à variação da latência entre pacotes consecutivos transmitidos por uma mesma origem. Também medido em milissegundos, esse indicador expressa a instabilidade na transmissão dos dados. Valores elevados de jitter causam degradações perceptíveis em serviços que exigem fluxo contínuo e ordenado de dados, como chamadas de vídeo em tempo real, sendo desejável que se mantenha o mais próximo possível de zero (Briscoe, 2016, apud Vieira, 2024).

5) Perda de Pacotes

A perda de pacotes consiste na não entrega de partes dos dados transmitidos entre um emissor e um receptor, sendo expressa em termos percentuais. Esse fenômeno ocorre, principalmente, devido a congestionamentos na rede, interferências eletromagnéticas ou falhas na infraestrutura do provedor de serviços. Uma taxa elevada de perda compromete severamente a qualidade da conexão, resultando em instabilidade em videoconferências, lentidão em processos de download e falhas perceptíveis em aplicações interativas como jogos online. Para mitigar tais efeitos, recomenda-se a reconfiguração da rede, a substituição de equipamentos obsoletos e a adoção de tecnologias mais robustas e confiáveis (Silva, 2025).

Compreender os parâmetros avaliados nos testes de velocidade é essencial para diagnosticar com maior precisão a qualidade da conexão, viabilizando intervenções mais eficazes na infraestrutura de rede. Esse conhecimento permite que usuários e profissionais identifiquem falhas com antecedência, otimizem o desempenho da conectividade no dia a dia e tomem decisões mais embasadas sobre o uso e a melhoria dos serviços contratados. Além disso, ao reconhecer os fatores que impactam negativamente a conexão, é possível adotar medidas corretivas de forma proativa, reduzindo a dependência de suporte técnico e minimizando eventuais transtornos (Silva, 2025).

3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia adotada para o desenvolvimento da pesquisa, detalhando os procedimentos, técnicas e critérios utilizados para orientar sua execução. A proposta metodológica está estruturada de forma a garantir a validação da solução de integração entre sistemas fotovoltaicos off-grid e conectividade via satélite, voltada ao suporte da telemedicina em regiões remotas. São descritos o tipo e a natureza da pesquisa, a abordagem utilizada, bem como os métodos de dimensionamento, simulação e análise empregados para alcançar os objetivos estabelecidos.

3.1 TIPO E NATUREZA DO TRABALHO

Este trabalho caracteriza-se como uma aplicação tecnológica, uma vez que busca empregar conhecimentos científicos e técnicos para resolver problemas concretos relacionados ao fornecimento de energia adequada e boa conectividade para unidades de telemedicina em áreas remotas. A finalidade é desenvolver uma solução prática e replicável, com base em tecnologias existentes no mercado, visando benefícios sociais, ambientais e operacionais, especialmente no contexto de inclusão digital e acesso à saúde.

Quanto à abordagem, a pesquisa é de natureza predominantemente quantitativa, pois se fundamenta em dados mensuráveis, como consumo energético (em Wh), capacidade de armazenamento (Ah), potência dos módulos fotovoltaicos (kWp), velocidades de upload/download (Mbps), entre outros. Também incorpora aspectos qualitativos, ao analisar a adequação tecnológica e funcional de equipamentos como kits solares portáteis e antenas de internet via satélite, sob a perspectiva da viabilidade operacional em ambientes isolados.

Do ponto de vista de seus objetivos, trata-se também de uma pesquisa exploratória e descritiva. É exploratória ao investigar o potencial de soluções móveis sustentáveis para atender demandas energéticas e de conectividade em ambientes remotos, campo ainda pouco consolidado na literatura nacional. É descritiva ao apresentar, quantificar e discutir os dados obtidos por meio de levantamentos, simulações técnicas e testes práticos de equipamentos como a antena Starlink Mini.

Metodologicamente, adota-se um estudo técnico-comparativo, que combina levantamento teórico (referencial técnico e normativo), simulação de dimensionamento energético e validação por meio de ensaio prático, a fim de analisar a viabilidade técnica e econômica da solução proposta. O estudo parte de um cenário de demanda energética realista para um consultório móvel de telemedicina, com o objetivo de verificar a capacidade de atendimento por sistemas portáteis de energia solar integrados a tecnologias de comunicação via satélite.

3.2 PROCEDIMENTOS DE COLETA E ANÁLISE DE DADOS

A coleta de dados foi realizada por meio de levantamento bibliográfico, técnico e documental, com base em fontes oficiais, manuais de fabricantes e experimentação, com o objetivo de embasar o dimensionamento energético, a caracterização da demanda elétrica e a avaliação da viabilidade técnica da proposta.

Os dados de consumo energético dos equipamentos utilizados foram obtidos a partir das especificações técnicas dos próprios dispositivos, considerando uma estimativa realista de tempo de uso diário. Assim, foi calculada a demanda total de energia diária, expressa em Wh/dia, servindo como base para o dimensionamento do sistema fotovoltaico. Esses resultados permitiram determinar a capacidade necessária de geração e armazenamento de energia, garantindo a autonomia e o funcionamento contínuo da estrutura proposta.

Para o dimensionamento da geração solar, adotaram-se dados de irradiação solar média diária ($\text{kWh/m}^2\cdot\text{dia}$) obtidos no Atlas Brasileiro de Energia Solar, publicado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Foram considerados os valores médios mensais para regiões com alto potencial solar, especialmente no contexto do semiárido nordestino, assumindo uma média de 5 horas de sol pleno por dia (HSP).

As especificações técnicas dos kits solares portáteis foram coletadas nos sites oficiais e manuais técnicos das marcas EcoFlow e Bluetti, incluindo informações como capacidade energética (Wh), tensão nominal (V), eficiência dos inversores (%), limite de entrada solar (W/V) e número de ciclos das baterias. Com base nessas informações, foram avaliadas diferentes configurações de kits para atender à carga definida com a autonomia projetada.

Os dados de conectividade foram obtidos a partir de fontes oficiais da empresa Starlink, bem como por meio de testes práticos realizados com a antena Starlink Mini, em sua versão portátil. Durante os testes, foram coletadas métricas como tempo de inicialização, velocidade de download e upload, latência (ping), jitter e perda de pacotes. Para isso, utilizou-se o aplicativo oficial da Starlink e ferramentas de análise de rede, incluindo o aplicativo do Speedtest, que permitiram monitorar o desempenho da conexão em diferentes condições operacionais.

Além disso, os custos de aquisição dos equipamentos foram levantados por meio de consultas em catálogos de fornecedores, lojas online e plataformas técnicas, como Amazon, Mercado Livre, EcoFlow Store e Bluetti Power. A análise normativa foi sustentada por diretrizes da ANEEL, do CRESESB, e por referências técnicas sobre sistemas fotovoltaicos isolados (off-grid), baterias LiFePO_4 e conectividade satelital.

3.3 LEVANTAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DA CARGA ELÉTRICA

Segundo Villalva (2015, p. 139), o ponto de partida para o dimensionamento de qualquer sistema fotovoltaico consiste na estimativa precisa da demanda energética a ser atendida. Esse

levantamento permite determinar o perfil de consumo diário e, conseqüentemente, subsidiar as decisões técnicas relacionadas à capacidade de geração, armazenamento e autonomia do sistema.

Para este estudo, o levantamento da carga elétrica foi conduzido com base na identificação dos equipamentos essenciais ao funcionamento de um ponto de atendimento remoto por telemedicina, localizado em ambiente isolado e sem acesso à rede elétrica convencional. Foram considerados apenas os dispositivos diretamente responsáveis por prover suporte às funções de comunicação, processamento computacional, conectividade e iluminação. Equipamentos médicos que operam com baterias internas autônomas foram desconsiderados do escopo energético, com o intuito de otimizar a eficiência e reduzir a complexidade e os custos do sistema fotovoltaico.

A seleção dos equipamentos foi realizada por meio de pesquisas técnicas, análise de fichas de fabricantes, manuais de operação e catálogos comerciais. Os critérios de escolha priorizaram modelos de baixo consumo energético, que fossem capazes de atender plenamente às exigências operacionais de uma unidade de saúde móvel. Estimou-se uma jornada de operação de 8 horas diárias, correspondente a um turno completo de atendimentos remotos. As potências nominais utilizadas nos cálculos referem-se aos valores fornecidos pelos fabricantes.

A relação completa dos equipamentos utilizados, bem como seus respectivos dados de potência, tempo médio de uso e energia estimada, será apresentada no capítulo 4 (Resultados e Discussão), juntamente com os cálculos de consumo diário total e as análises decorrentes.

3.3.1 Cálculo da Energia Consumida

Para a estimativa do consumo energético diário dos equipamentos utilizados no sistema proposto, foi adotada a fórmula geral da energia elétrica baseada no princípio da potência dissipada ao longo do tempo. Neste trabalho, a metodologia de cálculo considerou todos os equipamentos que compõem a carga do sistema off-grid, levando em conta a potência de cada equipamento, o tempo médio de uso diário e a quantidade de unidades.

A equação 3.1 foi utilizada para o cálculo do consumo total diário de energia.

$$E_{total} = \sum_{i=1}^n P_i \times t_i \times u_i \quad (3.1)$$

Onde:

- E_{total} representa a energia total consumida por dia, em watt-hora (Wh/dia);
- P_i é a potência nominal do i-ésimo equipamento, em watts (W);
- t_i é o tempo de uso diário do i-ésimo equipamento, em horas (h);

- u_i é a quantidade de unidades do i -ésimo equipamento;
- n é o número total de tipos de equipamentos considerados.

A aplicação desta equação permitiu contabilizar o consumo energético individual de cada dispositivo, somando os resultados parciais para determinar a demanda diária total do sistema. Essa etapa foi fundamental para o dimensionamento dos componentes do sistema fotovoltaico, especialmente no que se referiu ao banco de baterias e à capacidade do gerador fotovoltaico.

No dimensionamento adequado de sistemas fotovoltaicos, é fundamental considerar as perdas inerentes ao processo de conversão e distribuição de energia. Essas perdas ocorrem em componentes como inversores, controladores de carga, cabos e conectores, reduzindo a energia efetivamente disponível para o consumo. Para compensar essas perdas, aplica-se um fator de correção (F_c) ao valor do consumo energético bruto, garantindo que o sistema seja dimensionado para suprir a demanda real.

Neste trabalho, adotou-se o valor de F_c igual a 0,9, correspondendo a uma perda estimada de 10% no sistema. Dessa forma, a energia total corrigida (E_{tc}) foi calculada pela seguinte equação 3.2:

$$E_{tc} = \frac{E_{total}}{F_c} \quad (3.2)$$

Onde

E_{tc} = Energia total corrigida (Wh);

E_{total} = Energia total consumida (Wh);

F_c = Fator de correção.

Assim, a energia corrigida representa a quantidade de energia que o sistema fotovoltaico deve gerar para suprir as perdas e atender ao consumo real.

3.4 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

Neste estudo, optou-se pela utilização de kits solares portáteis comerciais, os quais já integram módulos fotovoltaicos, controladores de carga, banco de baterias e inversores em uma única estrutura padronizada. Essa escolha foi motivada pela praticidade de instalação, portabilidade do sistema e pela crescente oferta desses equipamentos no mercado, especialmente voltados para aplicações em áreas remotas ou com infraestrutura limitada. Ressalta-se que, por se tratar da utilização de kits com banco de baterias integrado, não se faz necessário o cálculo da configuração em série ou paralelo de módulos individuais. A capacidade total de armazenamento já é fornecida diretamente pelo fabricante, sendo suficiente, neste estudo, a verificação da equivalência entre a demanda energética estimada e as especificações técnicas do modelo selecionado.

Diante disso, esta etapa buscou estabelecer os parâmetros técnicos fundamentais para garantir o atendimento da carga elétrica identificada, considerando os requisitos de autonomia, capacidade de armazenamento, potência do gerador e compatibilidade com os dispositivos eletrônicos empregados. Para isso, são apresentados, nos subtópicos a seguir, o dimensionamento da bateria, o cálculo da potência fotovoltaica necessária, a seleção de equipamentos auxiliares e, por fim, considerando a proposta de aplicação prática do sistema, esta etapa também contempla a apresentação dos parâmetros utilizados para a escolha de kits solares portáteis disponíveis no mercado.

3.4.1 Dimensionamento da Bateria

Considerando a energia corrigida obtida após a aplicação do fator de perdas, o próximo passo no dimensionamento do sistema é estimar a energia necessária para armazenamento. Para isso, adotou-se o critério de autonomia, que representa o tempo durante o qual o sistema deve continuar operando mesmo na ausência de geração solar, como em períodos nublados ou de baixa irradiação. No presente projeto, foi considerada uma jornada de funcionamento regular de 8 horas diárias (1 dia) e definida uma autonomia adicional de 4 horas (0,5 dia). Assim, adotou-se um valor total de 1,5 dia para o cálculo do armazenamento, garantindo a continuidade dos serviços em eventuais interrupções temporárias, sem encarecer significativamente o sistema. Para preservar a vida útil das baterias, foi adotado como critério técnico o uso de apenas 80% da capacidade nominal (DoD), evitando ciclos profundos de descarga que poderiam comprometer a durabilidade e o desempenho do equipamento.

Dessa forma, a quantidade de energia que deve ser armazenada nas baterias é determinada com base na carga corrigida diária, no tempo total de operação (incluindo autonomia) e no DoD, conforme a equação 3.3:

$$E_a = \frac{E_{tc} \times A}{DoD} \quad (3.3)$$

Onde:

E_a = energia total requerida para armazenamento (em Wh);

E_{tc} = carga corrigida diária (Wh);

A = tempo total de operação considerado (1,5 dia);

DoD = profundidade de descarga (adotado 0,8).

Após a determinação da energia total a ser armazenada pelo banco de baterias, foi necessário convertê-la em capacidade elétrica, expressa em ampère-hora (Ah), a fim de compatibilizá-la

com as especificações técnicas dos módulos de armazenamento disponíveis no mercado. Essa conversão foi feita com base na relação direta entre energia e tensão, conforme expressa a equação 3.4.

$$C_{Bat} = \frac{E_a}{V_{Banco}} \quad (3.4)$$

Sendo:

C_{Bat} = Capacidade da bateria ou banco de baterias (Ah);

E_a = Energia total requerida para armazenamento (em Wh);

V_{Banco} = Tensão operando da bateria ou banco de baterias (V).

Os valores aqui obtidos foram utilizados como referência para o dimensionamento do gerador fotovoltaico, cuja função é garantir a recarga adequada do sistema dentro das condições de operação previamente estabelecidas.

Para este estudo, foi escolhido uma bateria de íons de lítio com tecnologia LiFePO_4 , cuja tensão nominal típica é de 51,2 V, valor adotado como referência para os cálculos de dimensionamento do banco de baterias. Essa escolha se deve às vantagens que essa tecnologia oferece em sistemas off-grid, como alta eficiência energética, maior número de ciclos de vida útil, estabilidade térmica e eletroquímica, além de elevada segurança operacional. Essas características tornam a bateria LiFePO_4 uma solução confiável, durável e compatível com os demais componentes do sistema, especialmente em aplicações que exigem desempenho contínuo e portabilidade.

3.4.2 Cálculo do Gerador Fotovoltaico

Como dado indispensável para o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos, além da potência instalada e do consumo energético diário, o índice de incidência de radiação solar é um parâmetro fundamental para estimar o potencial de geração de energia em diferentes localidades.

Neste estudo, cujo foco é a aplicação de sistemas fotovoltaicos no suporte à telemedicina em áreas isoladas, o dimensionamento não se baseou em um local fixo e específico, uma vez que a solução proposta pode ser implementada em diversas regiões do país. Por esse motivo, optou-se por considerar os valores mínimos médios de irradiação solar diária nas cinco regiões brasileiras — Norte, Nordeste, Centro-Oeste, Sudeste e Sul — com base em dados oficiais do Atlas Brasileiro de Energia Solar, lançado em 2017 pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), conforme apresentado na figura 11 do capítulo 2.

O menor valor observado corresponde à região Sul, com uma média de 4,53 kWh/m²·dia, sendo este adotado como referência para o dimensionamento do gerador fotovoltaico. A utilização desse valor mais conservador garante que, se o sistema for capaz de suprir a demanda energética

mesmo em locais com menor disponibilidade de radiação solar, também será suficiente para operar de forma eficiente nas demais regiões do país, onde os índices de irradiação são superiores.

A partir da demanda energética diária calculada e do valor de irradiação solar média adotado, procedeu-se ao cálculo da potência necessária do gerador fotovoltaico, expressa em quilowatt-pico (kWp). Para isso, utilizou-se a equação 3.5.

$$P_g = \frac{E_a}{R \times P_s} \quad (3.5)$$

Em que:

P_g = Potência mínima do gerador (Wp)

E_a = Energia diária estimada (Wh/dia)

R = Irradiação solar média diária (kWh/m²/dia)

P_s = fator de perdas do sistema (adotado como sendo 0,8 para este cálculo)

A partir do valor obtido para a potência mínima de geração P_g , realizou-se a determinação do número de módulos fotovoltaicos necessários para compor o sistema. Para isso, dividiu-se a potência total requerida pela potência nominal de cada módulo fotovoltaico considerado no estudo, conforme a equação 3.6:

$$N = \frac{P_g}{P_m} \quad (3.6)$$

Em que:

- N é o número mínimo de módulos solares necessários;
- P_g = potência mínima do gerador, em watts-pico (Wp);
- P_m = potência nominal de um módulo fotovoltaico (Wp).

O valor de P_m foi definido com base em modelos comercialmente disponíveis, considerando critérios de portabilidade, eficiência e compatibilidade com o sistema de armazenamento. O resultado obtido orientou a escolha final do kit fotovoltaico portátil a ser adotado.

3.4.3 Seleção do Controlador de Cargas e Inversor

Nesta etapa, definem-se os critérios técnicos utilizados para a seleção do inversor e do controlador de carga do sistema, considerando as necessidades operacionais da carga estimada, as características da bateria dimensionada e a proposta de portabilidade do sistema. Uma vez que a solução adotada prevê o uso de equipamentos solares integrados e portáteis, o inversor e o controlador são componentes que já se encontram acoplados em sistemas comerciais. Entretanto, é imprescindível verificar se suas especificações atendem com segurança aos requisitos do projeto.

Como visto no capítulo 2, o inversor é o equipamento responsável pela conversão da energia elétrica em corrente contínua (CC), fornecida pelas baterias, para corrente alternada (CA), compatível com os dispositivos que serão alimentados. Para garantir o funcionamento adequado da carga, é essencial que o inversor possua potência nominal igual ou superior à potência total simultânea dos equipamentos, além de ser do tipo onda senoidal pura, a fim de assegurar compatibilidade com aparelhos sensíveis e evitar distorções ou perdas de eficiência.

O inversor deve também operar com tensão de entrada compatível com a tensão do banco de baterias e possuir eficiência elevada, preferencialmente acima de 85%, para minimizar perdas no processo de conversão.

Já o controlador de carga tem a função de gerenciar o fluxo de energia entre os módulos fotovoltaicos e o banco de baterias, protegendo os componentes contra sobrecargas, sobrecarga reversa, subtensão e sobretemperatura.

Para o sistema proposto, é recomendado o uso de controladores do tipo MPPT (Maximum Power Point Tracking), que garantem maior eficiência na captação de energia solar ao ajustar dinamicamente o ponto de operação dos módulos. A corrente máxima suportada pelo controlador deve ser compatível com a corrente gerada pelos painéis fotovoltaicos escolhidos, bem como sua faixa de tensão de entrada deve abranger a tensão nominal do arranjo gerador.

Dado que o sistema será transportável e autossuficiente, optou-se por soluções integradas, que reúnem, em um único equipamento compacto, o inversor, o controlador e o banco de baterias, simplificando a instalação e reduzindo o risco de incompatibilidades técnicas. Assim, os critérios apresentados nortearam a escolha do modelo comercial na próxima subseção, assegurando que os dispositivos selecionados sejam tecnicamente compatíveis com a carga, a capacidade de armazenamento e o perfil de geração solar previamente definidos.

As Tabelas 1 e 2 apresentam, respectivamente, os critérios técnicos e as recomendações mínimas adotadas para a seleção do inversor e do controlador de carga, com base nas necessidades energéticas e operacionais do projeto. Esses parâmetros foram definidos considerando as exigências específicas de um sistema fotovoltaico portátil, com foco em eficiência, compatibilidade elétrica, segurança e adequação ao perfil da carga estimada.

Tabela 1 – Critérios Técnicos para Seleção do Inversor

Critério	Parâmetro desejável
Tipo de inversor	Deve usar onda senoidal pura
Potência nominal	Deve suportar toda a carga prevista com folga
Potência de pico (surto)	Suportar picos de corrente na partida de cargas
Tensão de entrada (DC)	Compatível com o banco de baterias utilizado
Tensão de saída (AC)	Compatível com os equipamentos alimentados
Frequência de saída	Conformidade com o padrão nacional (60 Hz)
Eficiência de conversão	Alta eficiência,
Proteções integradas	Contra sobrecarga, subtensão e aquecimento

Fonte: Autor

Tabela 2 – Critérios Técnicos para Seleção do Controlador de Carga

Critério	Parâmetro desejável
Tipo de controlador	Deve usar tecnologia MPPT e ser ideal para sistemas off-grid
Faixa de tensão de entrada	Compatível com os módulos solares e ampla faixa operacional
Corrente máxima de entrada	Deve suportar a corrente total dos módulos solares
Tensão de saída	Compatível com a tensão nominal do banco de baterias
Eficiência de conversão	Alta eficiência, com mínimas perdas no carregamento
Proteções integradas	Deve ter proteções contra sobretensão, sobrecorrente e polaridade reversa
Capacidade de integração	Permitir integração com inversores e sistemas BMS, se necessário

Fonte: Autor

3.4.4 Parâmetros para Escolha do Kit Portátil

Tendo em vista as demandas energéticas estimadas, o perfil de uso previsto e a proposta de portabilidade do sistema, esta subseção estabelece os critérios técnico-operacionais que orientam a seleção de um kit fotovoltaico portátil de mercado. A escolha de um equipamento pré-integrado – que combine banco de baterias, controlador de carga e inversor – atende ao

princípio da simplicidade logística e à necessidade de robustez em aplicações de saúde remota em campo. A análise comparativa entre modelos disponíveis será apresentada posteriormente nos resultados, com base nos parâmetros aqui definidos.

A seguir, nas tabelas 3 e 4, são apresentados os critérios divididos em três grupos: técnicos, operacionais e mercadológicos. Esses critérios visam garantir que o kit escolhido seja eficiente, compatível com a carga estimada e viável para uso em regiões remotas com acesso limitado à infraestrutura energética e de comunicação.

Tabela 3 – Critérios Técnicos para Seleção do Kit Solar Portátil

Critério	Parâmetro desejável
Capacidade útil de armazenamento	Deve suprir a demanda energética diária, considerando a autonomia necessária
Tensão nominal da bateria	Deve ser compatível com a configuração elétrica do sistema
Tipo de bateria	Deve garantir estabilidade, durabilidade e segurança em aplicações off-grid
Inversor integrado	Deve suportar a carga total simultânea, com sinal senoidal puro
Potência de pico do inversor	Deve suportar picos transitórios de corrente (partidas de cargas)
Tipo de controlador de carga	Deve assegurar eficiência máxima na conversão fotovoltaica
Eficiência global do sistema	Deve ter baixas perdas de conversão e alto rendimento energético
Proteções elétricas	Deve dispor de mecanismos contra sobrecarga, subtensão e polaridade invertida

Fonte: Autor

Tabela 4 – Critérios Operacionais e Mercadológicos para Seleção do Kit Portátil

Critério	Parâmetro desejável
Peso e portabilidade	Deve permitir fácil transporte e instalação em campo
Tempo de recarga solar	Capacidade de recarregar rapidamente mesmo em dias de baixa insolação
Compatibilidade com painéis	Deve aceitar conexão com painéis solares externos de diferentes potências
Interface e monitoramento	Deve possuir recursos de visualização em tempo real de status de carga e consumo
Modularidade	Deve permitir expansão futura do banco de baterias ou do gerador
Disponibilidade nacional	Deve ter fornecedores e assistência técnica no Brasil
Suporte técnico e marca	Deve ser fornecido por fabricante com boa reputação e suporte contínuo
Relação custo-benefício	Deve equilibrar adequadamente durabilidade, capacidade e investimento inicial

Fonte: Autor

Os critérios apresentados foram definidos como base metodológica para a análise comparativa entre diferentes kits solares portáteis disponíveis no mercado. A seleção final do modelo, contudo, será apresentada no capítulo de Resultados e Discussão, conforme os parâmetros técnicos, econômicos e operacionais estabelecidos.

3.4.5 Simulação de Geração Fotovoltaica

Para a simulação do desempenho energético do sistema fotovoltaico off-grid, foi utilizado o software PV*SOL, uma ferramenta amplamente reconhecida para projetos e análises de sistemas de energia solar. O PV*SOL permite o dimensionamento preciso de sistemas fotovoltaicos com base em dados climáticos reais, especificações técnicas dos componentes e perfis de consumo previamente definidos. Através da simulação, é possível verificar o atendimento da demanda energética diária, calcular a autonomia do sistema em diferentes cenários e validar a compatibilidade elétrica dos equipamentos. Além disso, o software fornece uma estimativa das emissões de CO evitadas ao longo do tempo em comparação com fontes convencionais de energia, oferecendo uma visão integrada dos benefícios ambientais do sistema proposto. Essa funcionalidade foi utilizada para quantificar o impacto positivo da solução, reforçando seu caráter sustentável.

A simulação foi realizada considerando uma condição de irradiância solar média diária

próxima ao valor utilizado no cálculo teórico do dimensionamento dos módulos fotovoltaicos. Essa escolha assegura coerência entre a abordagem analítica e os parâmetros adotados na simulação, permitindo avaliar o desempenho do sistema em condições representativas do cenário mais conservador previsto no projeto. Os parâmetros considerados na simulação incluíram:

- **Irradiação média diária local** (obtida no banco de dados do próprio PV*SOL e compatível com os dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar);
- **Potência nominal do sistema fotovoltaico**, conforme dimensionamento realizado;
- **Configuração do sistema** (orientação, inclinação e tipo de módulo);
- **Fator de perdas estimado**, incluindo perdas térmicas, sombreamento, sujidade e eficiência dos conversores.

A partir desses dados, o software forneceu estimativas mensais e anuais de geração energética, que serão analisadas posteriormente no capítulo de Resultados e comparadas com a demanda energética diária da aplicação. Esta etapa contribui para demonstrar a viabilidade técnica do sistema mesmo em regiões com baixa incidência solar, fortalecendo a confiabilidade da solução proposta para uso em campo.

3.5 CARACTERIZAÇÃO DA CONECTIVIDADE

A eficácia de atendimentos médicos remotos, por meio de plataformas de telemedicina, depende diretamente da qualidade da conexão à internet disponível no ponto de atendimento. Para garantir que as consultas virtuais ocorram com segurança, estabilidade e qualidade audiovisual adequada, esta seção estabelece os requisitos técnicos mínimos de conectividade, com base em diretrizes de organismos internacionais, fabricantes de plataformas de videoconferência e literatura técnica especializada.

3.5.1 Requisitos Técnicos de Conectividade para Aplicações em Telemedicina

A metodologia adota como referência os parâmetros essenciais que impactam diretamente a experiência do usuário em contextos de teleconsulta, como velocidade de download e upload, latência, jitter, perda de pacotes e largura de banda disponível. Esses fatores determinam a viabilidade operacional das plataformas utilizadas, influenciando diretamente a qualidade da comunicação médico-paciente, a transferência de dados clínicos e o uso de recursos multimídia durante o atendimento. Esses parâmetros são exibidos na tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros técnicos recomendados para desempenho adequado em teleconsulta

Parâmetro	Recomendação Técnica	Referência
Velocidade de download (Mbps)	≥ 15	Holslin (2025)
Velocidade de upload (Mbps)	≥ 5	TecnoBee (2023)
Latência (ping, em ms)	< 100	Redator Macro (2024)
Jitter (ms)	< 30	CloudTalk (2022)
Perdas de pacotes (%)	< 2	Nemchick (2024)

Fonte: Autor

3.5.2 Avaliação Experimental de Conectividade

Com o intuito de verificar a adequação da solução de conectividade proposta às exigências operacionais da telemedicina em ambientes remotos, foi conduzida uma avaliação experimental utilizando a antena Starlink Mini Móvel, fornecida pela empresa SpaceX. A escolha desse equipamento fundamenta-se em suas características de portabilidade, rápida instalação e autonomia funcional, atributos compatíveis com a proposta deste estudo, que visa a implementação de tecnologias sustentáveis e móveis voltadas ao atendimento em saúde em regiões sem infraestrutura convencional.

Os testes foram conduzidos em dois cenários distintos, em uma área aberta na cidade de São Luís – MA, durante o mês de junho de 2025. As condições ambientais incluíam céu limpo, ausência de nuvens e ausência de obstruções visuais diretas, exceto no segundo cenário. Os testes ocorreram entre 9h e 11h da manhã, garantindo boa incidência solar e estabilidade atmosférica.

O primeiro cenário consistiu em medições com o dispositivo cliente posicionado a curta distância da antena (menos de 5 metros), em ambiente externo, plano e com linha de visada totalmente desobstruída. O teste no aparelho celular foi realizado em linha reta, sem barreiras entre o cliente e a antena, que estava com inclinação fixa aproximada de 45° em relação ao

horizonte, valor considerado adequado para a região de São Luís – MA, garantindo visada livre para a constelação de satélites.

O segundo cenário envolveu testes com o aparelho celular posicionado a aproximadamente 20 metros de distância da antena, em área externa. Nessa condição, a visada permaneceu razoavelmente limpa, mas com leve obstrução parcial de elementos próximos, como estruturas e vegetação lateral. Esse teste buscou simular condições mais realistas de uso, considerando o afastamento físico entre o dispositivo cliente e a antena.

As medições foram realizadas por meio de duas plataformas independentes:

- 1) Aplicativo oficial da Starlink, com dados fornecidos diretamente pela operadora do sistema;
- 2) Speedtest by Ookla, ferramenta amplamente reconhecida para avaliação de desempenho de redes.

Os dados obtidos foram organizados e comparados com os requisitos técnicos mínimos definidos na Seção 3.5.1, com o objetivo de verificar se a Starlink Mini Móvel oferece desempenho suficiente para garantir a estabilidade e a qualidade da comunicação audiovisual necessária à realização de teleconsultas em locais sem acesso à internet convencional.

4 RESULTADOS

Neste capítulo, apresentam-se os principais resultados obtidos a partir da aplicação dos procedimentos descritos no capítulo 3, com ênfase na caracterização do consumo energético, desempenho dos sistemas fotovoltaicos e avaliação da conectividade por meio da tecnologia Starlink. As análises são fundamentadas em dados quantitativos levantados por meio de especificações técnicas, testes práticos e estimativas operacionais, além de interpretações qualitativas quanto à viabilidade, eficiência e adequação das soluções propostas.

4.1 LEVANTAMENTO DE CARGA E CONSUMO ENERGÉTICO DO SISTEMA

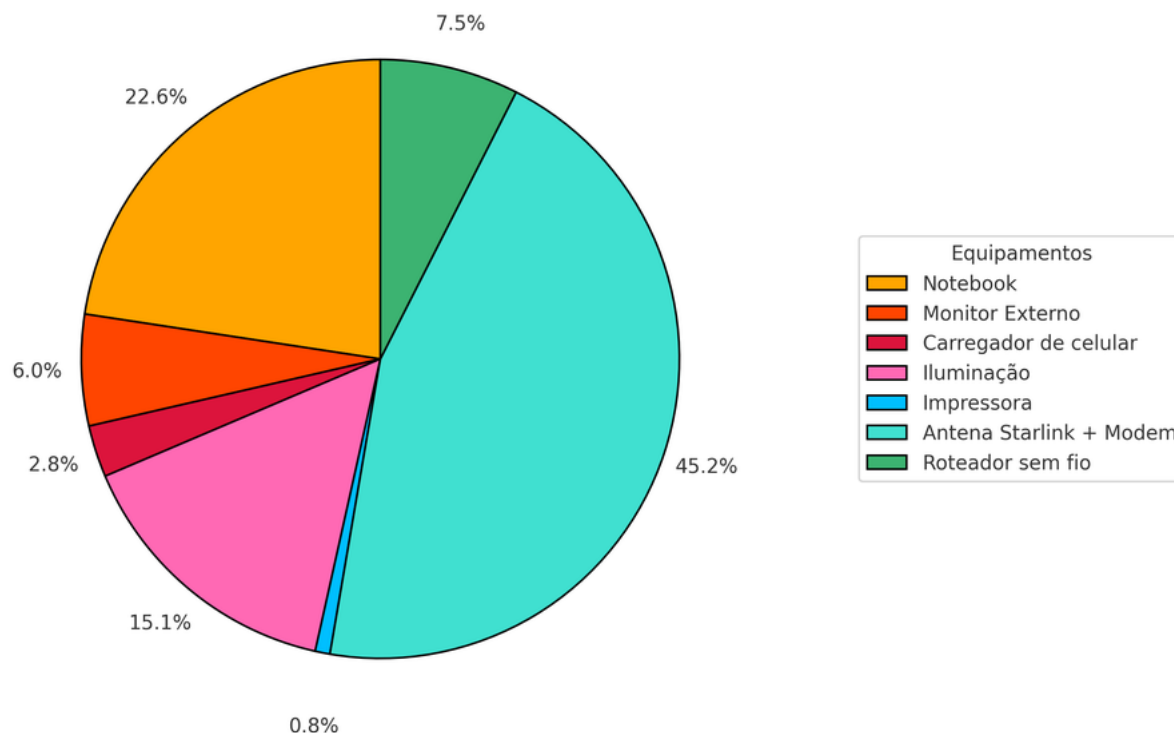
Com base na metodologia adotada, foram selecionados os equipamentos listados na tabela 6, e, a partir deles, estimaram-se as cargas elétricas envolvidas no funcionamento da unidade de telemedicina. Essa estimativa considerou, para cada equipamento, a respectiva potência nominal, o número de unidades utilizadas e o tempo médio diário de operação, conforme os critérios técnicos definidos previamente na etapa de caracterização da carga. Para o cálculo da energia diária consumida por cada dispositivo, foi aplicada a equação 1, apresentada na seção metodológica, a qual relaciona diretamente esses três parâmetros fundamentais (potência, tempo e quantidade).

Tabela 6 – Equipamentos selecionados e estimativa de consumo energético diário

Equipamento	Quantidade (n)	Potência (P) [W]	Tempo (t)[h/dia]	Energia diária ($E = P \times t \times n$) [Wh/dia]
Notebook	1	30	8	$30 \times 8 \times 1 = 240$
Monitor Externo	1	8	8	$8 \times 8 \times 1 = 64$
Antena Starlink + Modem	1	60	8	$60 \times 8 \times 1 = 480$
Iluminação	1	20	8	$20 \times 8 \times 1 = 160$
Carregador de celular	1	15	2	$15 \times 2 \times 1 = 30$
Impressora	1	15	0,5	$15 \times 0,5 \times 1 = 7,5$
Roteador sem fio	1	10	8	$10 \times 8 \times 1 = 80$
Total	7	158	—	1.061,5 Wh/dia

Fonte: Autor

$$E_{total} = \sum_{i=1}^n P_i \times t_i \times u_i = 1.061,5 \text{ Wh/dia}$$

Gráfico 1 – Participação percentual do consumo de cada equipamento

Fonte: Autor

Com base nos dados apresentados na tabela 6, verifica-se que o consumo energético diário da unidade de telemedicina atinge 1.061,5Wh/dia, o que corresponde a aproximadamente 1,06 kWh por dia. Este valor revela um perfil energético enxuto e eficiente, coerente com instalações móveis de pequeno porte. Ainda assim, impõe a necessidade de um sistema fotovoltaico bem dimensionado, especialmente em cenários com variação de irradiação solar ou uso prolongado de dispositivos críticos.

A análise da potência total instantânea, estimada em 158W, indica que, caso todos os equipamentos operem simultaneamente, o sistema deverá estar preparado para fornecer essa carga de forma contínua. Isso evidencia um requisito de estabilidade, especialmente para os componentes do sistema de alimentação (inversor e banco de baterias), que devem suportar essa demanda sem interrupções.

Ao se observar a distribuição percentual do consumo (gráfico 1), nota-se que a Antena Starlink + Modem responde sozinha por aproximadamente 45% do total consumido diariamente, com 480 Wh/dia. Esse dado reforça o peso da conectividade satelital no consumo energético global do sistema, o que é particularmente relevante em um cenário onde o fornecimento de energia precisa ser totalmente autônomo. Assim, a Starlink se configura como o principal fator de pressão sobre a autonomia do sistema, exigindo maior capacidade de armazenamento e recarga rápida durante os períodos de sol.

Na sequência, o notebook apresenta consumo diário de 240Wh, sendo o segundo maior contribuinte individual. Em conjunto com a iluminação (160Wh/dia), essas cargas representam

os elementos de uso constante durante os atendimentos, compondo quase 40% da demanda energética restante. Isso evidencia que, embora menos exigentes que a antena, essas cargas possuem impacto expressivo quando consideradas em operação contínua.

Os demais equipamentos, como roteador, monitor externo, carregador de celular e impressora, somam consumos menores, variando entre 7,5Wh/dia e 80Wh/dia. Ainda assim, sua presença não é desprezível, pois contribuem de forma acumulada com cerca de 17% do consumo total, sendo importantes para o funcionamento completo e integrado da estrutura de atendimento.

A análise do consumo energético revelou um perfil de demanda relativamente enxuto, porém concentrado em equipamentos de alta exigência, com destaque para a antena Starlink, que responde isoladamente por aproximadamente 45% do consumo total. Embora a potência simultânea estimada de 158W não represente um valor elevado em termos absolutos, sua distribuição em momentos críticos de operação — como durante as consultas com transmissão de vídeo em tempo real — demanda um sistema energético robusto, capaz de garantir estabilidade e continuidade no fornecimento, mesmo sob condições ambientais desfavoráveis, como dias parcialmente nublados ou com baixa irradiância.

Considerando os múltiplos fatores que impactam negativamente o desempenho real de sistemas fotovoltaicos (como perdas térmicas, acúmulo de sujeira nos módulos, ineficiências associadas aos controladores e inversores, e variações sazonais de irradiação), optou-se pela aplicação de um fator de correção, conforme estabelecido na metodologia (Capítulo 3), com o objetivo de tornar a estimativa de geração mais aderente à realidade operacional do sistema. Neste estudo, adotou-se um fator de correção $F_c=0,9$, o que representa uma perda estimada de 10% ao longo do ciclo diário de operação. Com base nisso, aplicou-se a Equação 2, conforme visto a seguir.

$$E_{tc} = \frac{1.061,5}{0,9} \approx 1.179,4 \text{ Wh/dia}$$

Esse novo valor representa a meta mínima de geração diária que o sistema fotovoltaico deve atingir para garantir operação ininterrupta, mesmo diante de perdas inevitáveis no processo de conversão e armazenamento. Ele eleva em aproximadamente 11% a exigência energética do sistema e serve como base crítica para o dimensionamento subsequente do banco de baterias e do gerador solar. Essa correção reforça a importância de se considerar não apenas os dados nominais dos equipamentos, mas também as condições reais de campo, permitindo uma abordagem mais robusta e alinhada à realidade das operações em áreas isoladas.

4.2 DIMENSIONAMENTO DO ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

A partir da carga energética corrigida estimada em 1.179,44Wh por dia, calculada com a aplicação de um fator de correção de 10% para representar perdas sistêmicas, procedeu-se à estimativa da energia que deve ser armazenada no banco de baterias do sistema. Essa etapa é essencial para assegurar o fornecimento contínuo de energia elétrica à unidade de telemedicina, mesmo durante períodos em que não há geração solar suficiente para alimentar diretamente a carga.

Conforme explicado na metodologia, a autonomia energética do sistema foi definida em 1,5 dia, como estratégia para garantir a continuidade dos atendimentos mesmo em condições desfavoráveis, como dias nublados, chuvas prolongadas ou sombreamentos temporários. Esse valor corresponde a uma jornada padrão de 8 horas, acrescida de uma margem adicional de 4 horas, totalizando 12 horas de operação ininterrupta, sem geração solar. A definição buscou equilibrar confiabilidade operacional e viabilidade prática, assegurando que o sistema funcione com estabilidade sem onerar excessivamente o projeto.

Optar por uma autonomia maior foi deliberadamente evitado, uma vez que sistemas portáteis apresentam restrições de volume, peso e custo. Aumentar desproporcionalmente o banco de baterias comprometeria a mobilidade do sistema, elevaria os custos do projeto e poderia resultar em superdimensionamento desnecessário, especialmente em localidades com boa disponibilidade solar.

Além disso, adotou-se o critério de limitação da profundidade de descarga (DoD) a 80%, como forma de preservar a integridade das baterias. Essa medida visa prolongar a vida útil do sistema de armazenamento, evitando ciclos profundos que aceleram o desgaste dos componentes eletroquímicos. Dessa forma, a solução proposta alia eficiência, durabilidade e compatibilidade com as exigências de um sistema fotovoltaico off-grid de uso portátil.

Com esses parâmetros, a energia mínima que deve ser armazenada foi calculada utilizando a equação 3.3:

$$E_a = \frac{1.179,44 \times 1,5}{0,8} = 2.211,37 Wh$$

Esse resultado indica que o sistema de baterias precisa fornecer, de forma segura, um total de 2.211,37Wh para garantir a operação ininterrupta durante o tempo previsto de autonomia.

Para compatibilizar esse valor com as especificações técnicas dos dispositivos de armazenamento disponíveis comercialmente, foi necessária a conversão da energia requerida em capacidade elétrica, expressa em ampère-hora (Ah). A equação 3.4 foi utilizada para essa conversão, adotando uma tensão nominal de 51,2V, típica de baterias de íons de lítio com tecnologia LiFePO₄, o cálculo resultou em:

$$C_{Bat} = \frac{2.211,37}{51,2} \approx 43,2 \text{ Ah}$$

A escolha da tecnologia LiFePO₄ foi motivada pelas suas vantagens técnicas em aplicações off-grid, como alta eficiência energética, elevada estabilidade térmica, maior número de ciclos de carga e descarga, segurança operacional e compatibilidade com inversores modernos. Essas características a tornam especialmente adequada para contextos de operação remota e portabilidade, como o proposto nesta monografia.

Assim, os valores obtidos (2.211,37Wh de energia e 43,2Ah de capacidade) serão utilizados como referência para o dimensionamento do gerador fotovoltaico. Essa próxima etapa garantirá que o sistema seja capaz de recarregar as baterias com eficiência, assegurando o funcionamento contínuo e confiável da unidade de telemedicina mesmo sob condições de geração intermitente.

4.3 GERAÇÃO FOTOVOLTAICA E DESEMPENHO ENERGÉTICO

Com base na energia diária estimada do sistema, já corrigida para perdas e autonomia, no valor de 2.211,37Wh/dia, e considerando a irradiância solar média diária de 4,53kWh/m²·dia, obteve-se a potência mínima requerida do gerador fotovoltaico a partir da equação 3.5:

$$P_g = \frac{2.211,37}{4,53 \times 0,8} \approx 610,1 \text{ Wp}$$

O resultado indica que, para suprir adequadamente a carga energética diária, mesmo sob condições menos favoráveis de irradiação, o sistema deve contar com ao menos 610,1Wp de potência instalada.

A escolha do módulo fotovoltaico recaiu sobre um modelo de 350Wp, devido à sua ampla disponibilidade comercial, maior eficiência e compatibilidade com soluções portáteis. Aplicando-se a equação 3.6, o número de módulos é:

$$N = \frac{610,1}{350} \approx 1,74$$

Como o número de módulos precisa ser inteiro, foram considerados dois módulos de 350Wp, totalizando 700Wp de potência instalada. Esse valor representa uma margem adicional de aproximadamente 14,7% sobre a potência mínima, o que reforça a confiabilidade da geração mesmo em dias parcialmente nublados.

A adoção de apenas dois módulos fotovoltaicos para atender à carga total é vantajosa do ponto de vista estrutural e logístico. Em comparação com kits comerciais portáteis, que costumam utilizar três ou mais módulos de potência inferior (entre 100Wp e 200Wp), a configuração adotada permite redução no número de conexões, menor área ocupada e maior praticidade no transporte e instalação — características essenciais para aplicações em unidades móveis de telemedicina. Dessa forma, a potência instalada de 700Wp atende plenamente aos requisitos energéticos do sistema, com desempenho otimizado e portabilidade mantida.

Com base nos resultados obtidos na simulação realizada com o software PV*SOL, é possível observar que o sistema fotovoltaico projetado apresenta um desempenho satisfatório, compatível com os requisitos energéticos da aplicação em estudo. A tabela 7 ilustra os principais parâmetros de saída da simulação, destacando a potência nominal do gerador de 0,70 kWp, distribuída em uma área de captação de 3,48m². O sistema apresenta um potencial de geração de cerca de 1.005,53 kWh por ano, equivalendo a uma produção média diária em torno de 2,76 kWh.

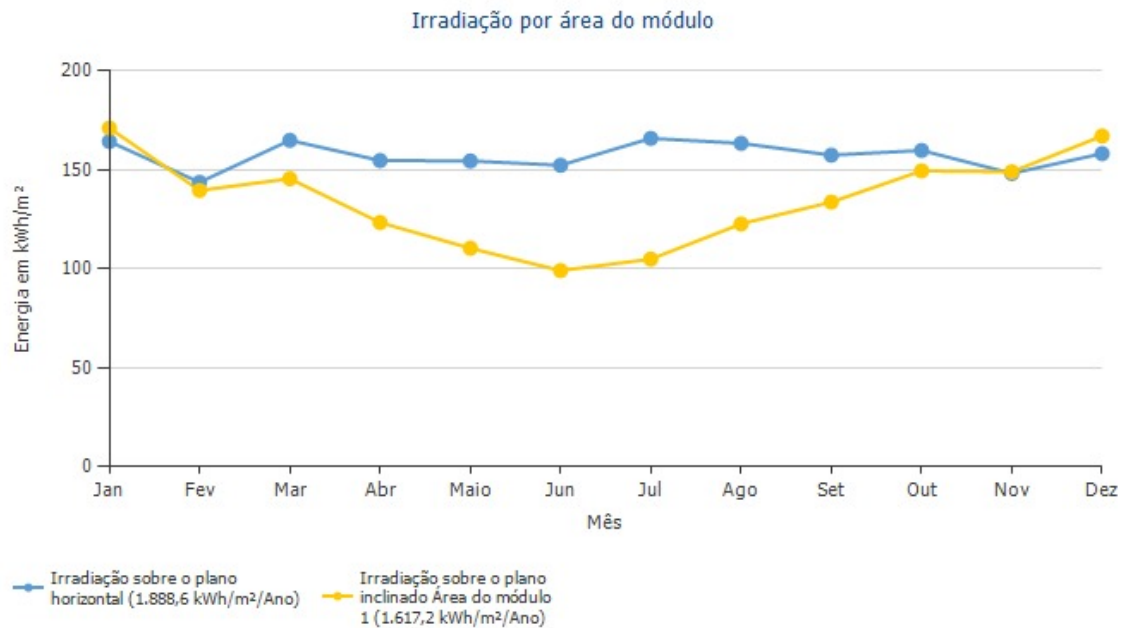
Tabela 7 – Parâmetros de saída da simulação

Potência do gerador fotovoltaico	0,70 kWp
Area do gerador fotovoltaico	3,48 m ²
Irradiação global no plano dos módulos	1617,24 kWh/m ²
Irradiação global no módulo sem reflexão	1619,20 kWh/m ²
Desempenho do sistema (PR)	88,72 %
Energia do gerador fotovoltaico (rede c.a.)	1005,53 kWh/Ano

Fonte: Autor

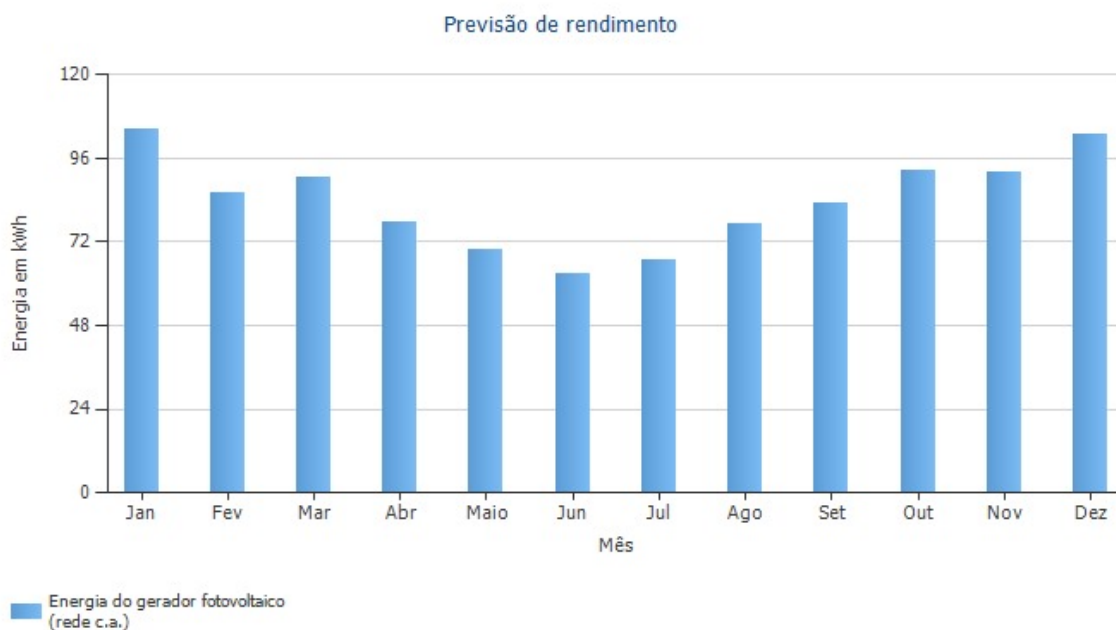
Esse valor supera com segurança a demanda energética total do sistema, que, conforme calculado na etapa anterior, é de 2.211,37Wh/dia (ou 2,21kWh/dia), mesmo considerando o fator de correção e o critério de autonomia de 1,5 dia. O sistema alcançou um índice de desempenho (PR – Performance Ratio) de 88,72%, indicando alta eficiência operacional mesmo diante das perdas associadas a temperatura, sujidade, conversão e cabos.

O gráfico 2 (Irradiação por área do módulo) mostra a distribuição mensal da irradiância solar global ao longo do ano. A curva amarela representa a energia incidente sobre o plano inclinado dos módulos fotovoltaicos, totalizando 1.617,24kWh/m². ano. Nota-se uma redução na irradiância nos meses de outono e inverno (maio a julho), com os valores mais baixos observados em junho. Essa sazonalidade é esperada em regiões com maior variação climática e menor exposição solar no período de inverno, exigindo que o dimensionamento leve em conta esses picos de baixa geração.

Gráfico 2 – Irradiação por área do módulo

Fonte: Autor

A seguir, o gráfico 3 (previsão de rendimento) trata da distribuição mensal da produção de energia elétrica pelo sistema. Observa-se que os meses com maior geração coincidem com os períodos de maior irradiância, especialmente janeiro e dezembro, com produção próxima de 110kWh/mês. Mesmo nos meses de menor radiação, como junho e julho, o sistema mantém geração em torno de 70kWh/mês, o que corresponde a uma média de 2,3 kWh/dia, valor ainda suficiente para atender à carga estimada da unidade de telemedicina.

Gráfico 3 – Previsão de rendimento do sistema

Fonte: Autor

A análise conjunta desses dados demonstra que o sistema fotovoltaico simulado apresenta capacidade adequada de suprimento energético mesmo em condições menos favoráveis de irradiância, validando a robustez do dimensionamento realizado. Essa compatibilidade entre as previsões teóricas e os resultados simulados corrobora a viabilidade técnica da aplicação proposta, reforçando a confiabilidade da solução em contextos remotos e com variabilidade solar significativa.

4.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS TESTES DE CONECTIVIDADE SATELITAL

Nesta subseção, são apresentados os resultados obtidos a partir dos testes práticos de conectividade realizados com a antena Starlink Mini (figura 13), visando avaliar sua viabilidade para aplicações em telemedicina em regiões isoladas. Para assegurar uma análise abrangente do desempenho da solução, os testes foram estruturados em dois cenários operacionais distintos, contemplando condições de uso em diferentes contextos de distância.

Figura 13 – Antena Satrlink Mini

Fonte: Adaptada de Starlink, 2025

4.4.1 Teste de Conectividade Próximo à Antena

Este primeiro teste foi conduzido com o dispositivo cliente posicionado a uma curta distância da antena Starlink Mini, em ambiente com linha de visada desobstruída e mínima interferência. O objetivo foi obter uma referência de desempenho em condições ideais, simulando uma instalação fixa e otimizada, como seria o caso de atendimentos realizados diretamente ao lado da unidade móvel equipada com o sistema.

Os resultados estão ilustrados na figura 14, que mostra uma das capturas de tela obtidas durante os testes de conectividade realizados com o aplicativo oficial da Starlink e a plataforma Speedtest. Essa figura exemplifica visualmente a forma como os dados foram coletados e avaliados. Para ampliar a compreensão sobre a estabilidade e o desempenho da conexão, os demais testes foram sintetizados e apresentados de forma comparativa na Tabela 8.

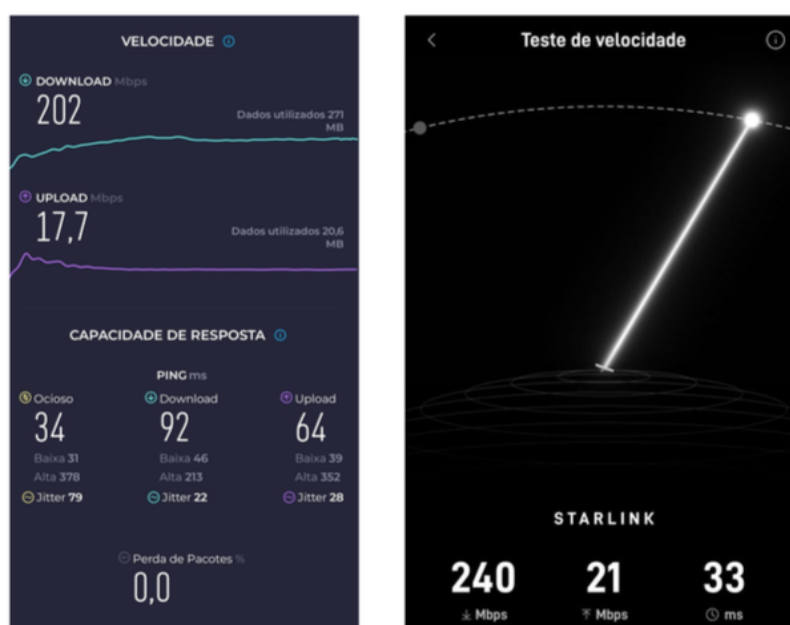
A Tabela 8 reúne os intervalos de desempenho registrados nas medições realizadas por ambos os testadores, confrontando esses valores com os requisitos técnicos mínimos encontrados na literatura para viabilizar teleconsultas médicas em tempo real. Essa organização permite verificar, de maneira objetiva, se os parâmetros observados atendem aos critérios necessários para garantir qualidade e estabilidade nas videoconferências de saúde.

Tabela 8 – Intervalos de desempenho do primeiro teste

Parâmetro	Starlink(App)	Speedtest	Recomendação
Download (Mbps)	189 - 240	152 - 202	≥ 15
Upload (Mbps)	18 - 21	6,35 - 17,7	≥ 5
Latência (ms)	23 - 33	34 - 92	< 100
Jitter (ms)	-	5 - 28	< 30
Perda de pacotes (%)	-	0 - 0,7	< 2

Fonte: Autor

A análise comparativa demonstra que todos os valores medidos foram satisfatórios, atendendo integralmente às exigências mínimas para aplicações síncronas em telemedicina. As velocidades de download e upload permaneceram consistentemente acima dos limites recomendados, enquanto a latência e o jitter mantiveram-se dentro das margens toleráveis, sem apresentar variações significativas entre os testadores. Esses resultados indicam que a Starlink Mini é tecnicamente capaz de sustentar conexões de qualidade para teleconsultas médicas, reforçando sua viabilidade como solução de conectividade para unidades de saúde remotas.

Figura 14 – Resultados dos testes próximo à antena (Speedtest à esquerda e App Starlink à direita)

Fonte: Autor

4.4.2 Teste de Conectividade a uma Distância Aproximada de 20 Metros da Antena

Os resultados obtidos nos testes realizados com a antena Starlink Mini, considerando a condição operacional em que o terminal cliente se encontrava a cerca de 20 metros de distância da antena estão ilustrados na figura 15. Esses resultados simulam um cenário de atendimento externo ou em áreas adjacentes à instalação principal. São comparados, na tabela 9, os valores obtidos para cada parâmetro técnico com os limites mínimos recomendados para viabilizar serviços de telemedicina por videoconferência.

Figura 15 – Resultados dos testes a cerca de 20 metros da antena



Fonte: Autor

Tabela 9 – Intervalos de desempenho do segundo teste

Parâmetro	Speedtest	Recomendação
Download (Mbps)	22,6 - 57,5	≥ 15
Upload (Mbps)	9,71 - 17,4	≥ 5
Latência (ms)	43 - 112	< 100
Jitter (ms)	5 - 78	< 30
Perda de pacotes (%)	3,4 - 5,2	< 2

Fonte: Autor

Observa-se que as velocidades médias de download (21,5 a 26,4Mbps) e upload (13,5 a 18,9Mbps) permaneceram confortavelmente acima das exigências técnicas, assegurando a largura de banda necessária para tráfego de áudio e vídeo em alta qualidade. Por outro lado, a latência

variou entre 43 e 112ms, situando-se majoritariamente dentro do patamar adequado (<100ms), mas com registro pontual acima do recomendado no momento de maior tráfego, o que pode gerar atrasos perceptíveis em comunicações síncronas.

No caso do jitter, os valores oscilaram de 5 a 39ms, ultrapassando o limite de 30 ms em alguns momentos e indicando flutuações no tempo de entrega dos pacotes que podem comprometer a estabilidade do vídeo e do áudio em conexões sensíveis a variações de atraso. Já a perda de pacotes apresentou resultados críticos, com picos entre 3,4% e 5,2%, muito acima do recomendado (<2%), o que implica na possibilidade de quadros congelados ou falhas momentâneas no áudio durante teleconsultas.

Esses dados reforçam que, embora a solução apresente uma largura de banda e uma latência média compatíveis com os requisitos para videoconferências em telemedicina, a ocorrência de jitter elevado e, principalmente, de perdas de pacotes em níveis acima do tolerável podem afetar a experiência do usuário e a qualidade do serviço em distanciamento da antena Starlink. Destaca-se, portanto, a importância de manter a menor distância possível entre a antena e os dispositivos que demandam conectividade, de forma a mitigar perdas no enlace Wi-Fi local e reduzir a incidência de falhas nos parâmetros críticos para aplicações em saúde. Ressalta-se ainda o papel dos roteadores ou repetidores dedicados como elementos complementares à arquitetura do sistema, atuando para reforçar o sinal e garantir maior integridade na transmissão dos pacotes, o que contribui diretamente para a estabilidade e a qualidade dos atendimentos remotos.

4.5 AVALIAÇÃO TÉCNICA E SELEÇÃO DO KIT FOTOVOLTAICO PORTÁTIL

Para validar a aderência da solução proposta às especificações do projeto, elaborou-se uma análise comparativa entre os requisitos técnicos previamente estabelecidos e as características do kit fotovoltaico portátil selecionado, composto pela estação Bluetti AC200P L associada a dois módulos solares Bluetti PV350 conectados em série. A escolha desse conjunto fundamenta-se na reconhecida robustez e tecnologia avançada da marca Bluetti, amplamente consolidada no mercado internacional de soluções off-grid, além de contar com representação e suporte ativo no Brasil, o que reforça sua viabilidade para aplicações críticas em saúde. Na figura 16 visualiza-se o modelo escolhido com algumas de suas características físicas e na tabela 10 tem-se algumas de suas principais especificações técnicas.

Figura 16 – Estação Bluetti AC200P L



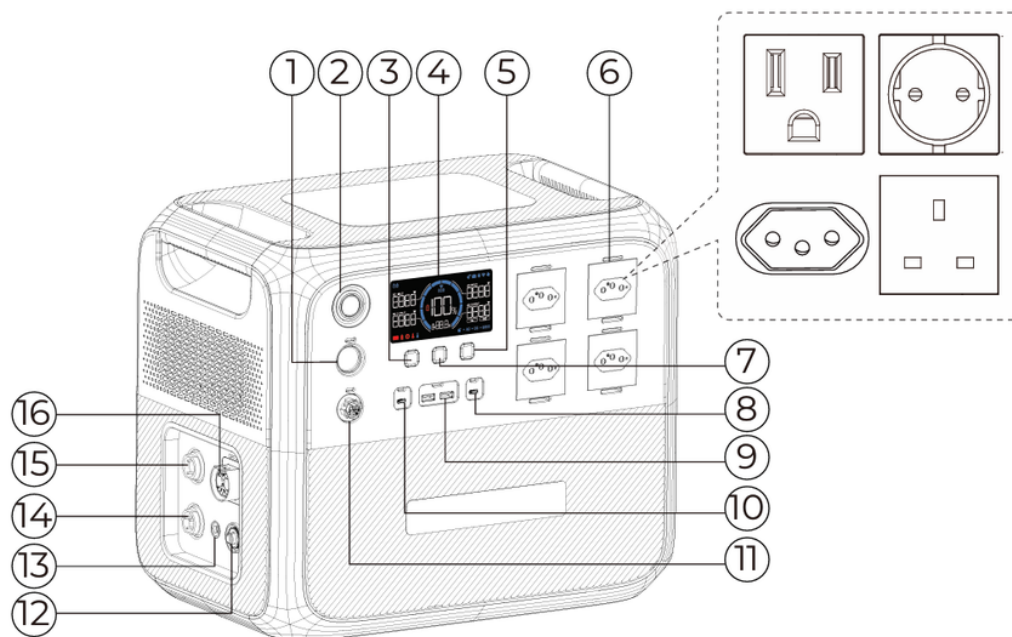
Fonte: Bluetti, 2025

Tabela 10 – Principais características elétricas da estação Bluetti AC200P L

Modelo	AC200P L
Capacidade da bateria	2.304 Wh (45 Ah)
Tipo de célula	Fosfato de ferro-lítio (LiFePO ₄ , LFP)
Potência de entrada CA + CC/PV	2.400 W máx.
Potência de saída CA + CC (sem rede)	2.500 W máx.
Peso	28,3 kg
Dimensões (C × L × A)	420 mm × 280 mm × 366,5 mm
Temperatura de carregamento	0 °C a 40 °C
Temperatura de descarregamento	-20 °C a 40 °C
Temperatura de armazenamento	Até 1 mês: -20 °C a 45 °C
	Até 3 meses: -20 °C a 30 °C
	Até 12 meses: -20 °C a 25 °C
Umidade de operação	De 10% a 90%
Ruído	50 dB máx.
Altitude de trabalho	2.000 m

Fonte: Bluetti, 2025

A estação de energia BLUETTI AC200P L foi selecionada pela sua robustez, portabilidade e elevada capacidade de fornecimento energético, com 2.304 Wh e potência de até 2.400 W em onda senoidal pura. O equipamento permite expansão com baterias adicionais, podendo atingir até 8.448 Wh, característica essencial para aplicações em ambientes remotos. Conta ainda com diversas opções de conexão (AC, DC, USB-A, USB-C, entrada solar e porta de expansão), oferecendo flexibilidade para alimentar diferentes dispositivos. Através da figura 17 é possível visualizar seus principais componentes.

Figura 17 – Disposição frontal e lateral dos conectores e controles do BLUETTI AC200P L

Fonte: Bluetti, 2025

- | | |
|-----------------------------------|----------------------------------|
| 1. Saída de acendedor de cigarros | 9. Porta USB-A |
| 2. Botão liga/desliga | 10. Porta USB-C |
| 3. Botão de energia CC | 11. Porta CC 48 V |
| 4. Tela LED | 12. Disjuntor |
| 5. Botão de energia CA | 13. Polo de aterramento |
| 6. Tomada CA | 14. Entrada CA |
| 7. Botão liga/desliga USB | 15. Entrada CC |
| 8. Porta USB-C | 16. Porta de expansão da bateria |

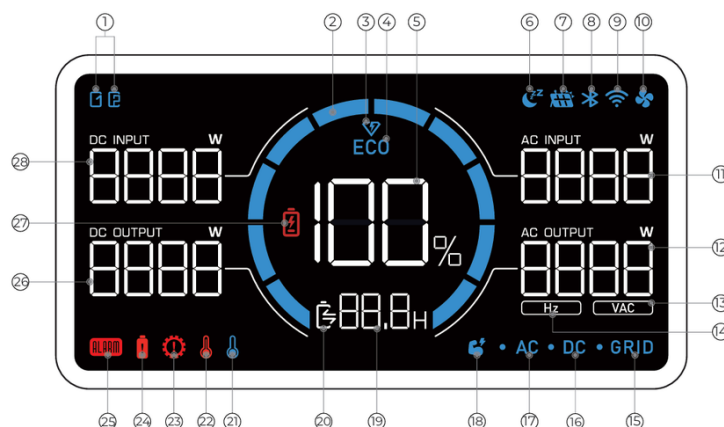
O BLUETTI AC200P L conta com uma tela LED inteligente que fornece, em tempo real, as principais informações sobre o desempenho e o status operacional do equipamento. Conforme ilustrado na figura 18, o visor exibe informações como:

- Estado de carga da bateria (SoC)
- Potência de entrada e saída (CA e CC)
- Tensão e frequência das saídas AC
- Alertas de segurança (sobrecorrente, falha, sobrecarga, temperatura, etc.)
- Modo de operação (ECO, turbo, silencioso)

- Conexão com a rede elétrica ou expansão de baterias

Esses recursos possibilitam um acompanhamento visual detalhado da operação, tornando mais segura e eficiente a gestão energética, especialmente em ambientes remotos com pouca margem para falhas.

Figura 18 – Interface LED do BLUETTI AC200P L e identificação das principais funções de monitoramento



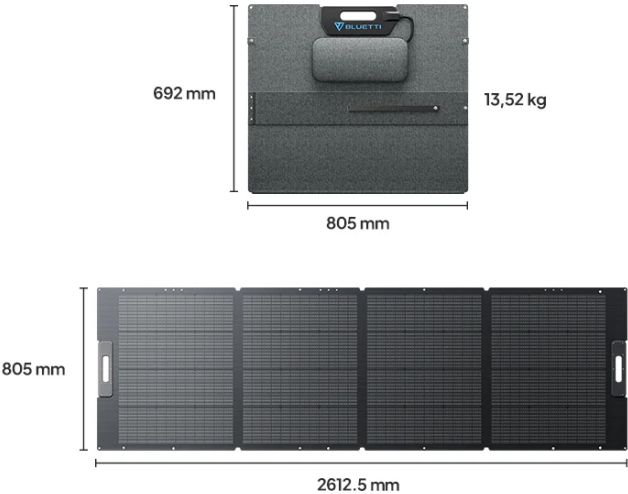
Fonte: Bluetti, 2025

- | | |
|--------------------------------|--------------------------------------|
| 1. Bateria de expansão | 15. Ligação à rede |
| 2. Progresso de carga/descarga | 16. Saída CC |
| 3. Carregamento turbo | 17. Saída CA |
| 4. Modo ECO | 18. Modo Power Lifting |
| 5. Capacidade da bateria (SoC) | 19. Tempo restante de carga/descarga |
| 6. Carregamento silencioso | 20. Status de carga/descarga |
| 7. Entrada CC | 21. Alerta de baixa temperatura |
| 8. Conexão Bluetooth | 22. Alerta de alta temperatura |
| 9. Conexão WiFi | 23. Alerta de sobrecarga |
| 10. Status da ventoinha | 24. Alerta de sobrecorrente |
| 11. Potência de entrada CA | 25. Alerta de falha |
| 12. Potência de saída CA | 26. Potência de saída CC |
| 13. Tensão de saída CA | 27. Alerta de bateria fraca |
| 14. Frequência de saída de CA | 28. Potência de entrada CC |

No caso específico dos módulos fotovoltaicos, optou-se pelos painéis Bluetti PV350 (mostrados na figura 19), fabricados com células monocristalinas de alta eficiência (até 23,4%), cujas características elétricas (tabela 11) se mostram plenamente compatíveis com os requisitos do sistema, assegurando que o arranjo em série opere dentro da faixa admitida pelo controlador MPPT da estação. Essa configuração garante a correta adaptação do arranjo fotovoltaico tanto em termos de tensão de entrada quanto de corrente máxima suportada, fator essencial para a

estabilidade do carregamento e o desempenho geral do sistema, especialmente em aplicações móveis em ambientes remotos.

Figura 19 – Dimensões do painel solar BLUETTI PV350 (dobrado e aberto)



Fonte: Bluetti, 2025

Tabela 11 – Características elétricas dos módulos fotovoltaicos BLUETTI PV350

Parâmetro	Valor
Potência Máxima (Pmax)	350W
Eficiência da Célula	23,4%
Tipo de Célula	Silício Monocristalino
Laminação das Células	ETFE (Etileno Tetrafluoretileno)
Tensão de Circuito Aberto (Voc)	33V
Corrente de Curto-Circuito (Isc)	13,8A
Conector	MC4 Padrão

Fonte: BLUETTI, 2025

Esse painel apresenta potência nominal de 350W e pode ser facilmente transportado e instalado em campo, sendo especialmente adequado para operações móveis de suporte à telemedicina.

Como ilustrado na figura 19, o painel possui as seguintes dimensões:

- Dobrado: 805 mm x 692 mm
- Aberto: 2612,5 mm x 805 mm

- Peso: 13,52 kg

Sua estrutura modular e leve facilita o deslocamento para áreas remotas, enquanto o sistema de conexão direta com estações portáteis de energia, como o BLUETTI AC200P L, garante integração eficiente e confiável para o suprimento energético local.

A partir da tabela 12, é possível constatar um resumo comparativo entre os principais requisitos técnicos definidos na etapa de projeto e as características reais do kit composto pela estação Bluetti AC200P L e os módulos fotovoltaicos PV350. A última coluna evidencia o grau de conformidade entre os valores de referência e os parâmetros práticos do sistema selecionado, indicando se o conjunto atende ou supera os critérios mínimos estabelecidos para operação em ambiente isolado.

Tabela 12 – Comparativo entre os requisitos do projeto e kit proposto

Parâmetro	Requisito do Projeto	Kit Proposto	Conformidade
Potência nominal	>158W	2.400W	Atende
Capacidade da bateria	>2.211Wh e 43,2Ah	2.304Wh e 45Ah	Atende
Tensão da bateria	51,2V	51,2V	Atende
Tipo de bateria	LiFePO4	LiFePO4	Atende
Tipo de inversor	Onda senoidal pura	Onda senoidal pura	Atende
Frequência de saída	60Hz	60Hz	Atende
Corrente total dos módulos	13,8A	15A	Atende
Tensão de entrada (PV)	> tensão do arranjo (66V)	12 - 145V	Atende
Proteções integradas	Sim	Sim (Sobretensão, subtensão, inversão de polaridade)	Atende
Capacidade de expansão	Sim	Sim	Atende

Fonte: Autor

A análise comparativa apresentada na tabela 12 demonstra que a estação de energia Bluetti AC200P L aliado aos módulos PV350 atende de forma satisfatória aos requisitos técnicos definidos no projeto. Observa-se que a potência nominal disponível no sistema (2.400W) não só supre a demanda instantânea calculada (158W), como também oferece uma margem confortável, o que reforça a capacidade do inversor em operar com folga e garante estabilidade mesmo em eventuais picos de consumo simultâneo.

No que tange ao armazenamento, a capacidade útil da bateria (2.304Wh) aproxima-se muito do valor calculado (2.211Wh), resultando numa diferença de aproximadamente 4%, o que na prática se traduz em segurança operacional adicional, garantindo o atendimento à autonomia mínima projetada mesmo sob condições adversas.

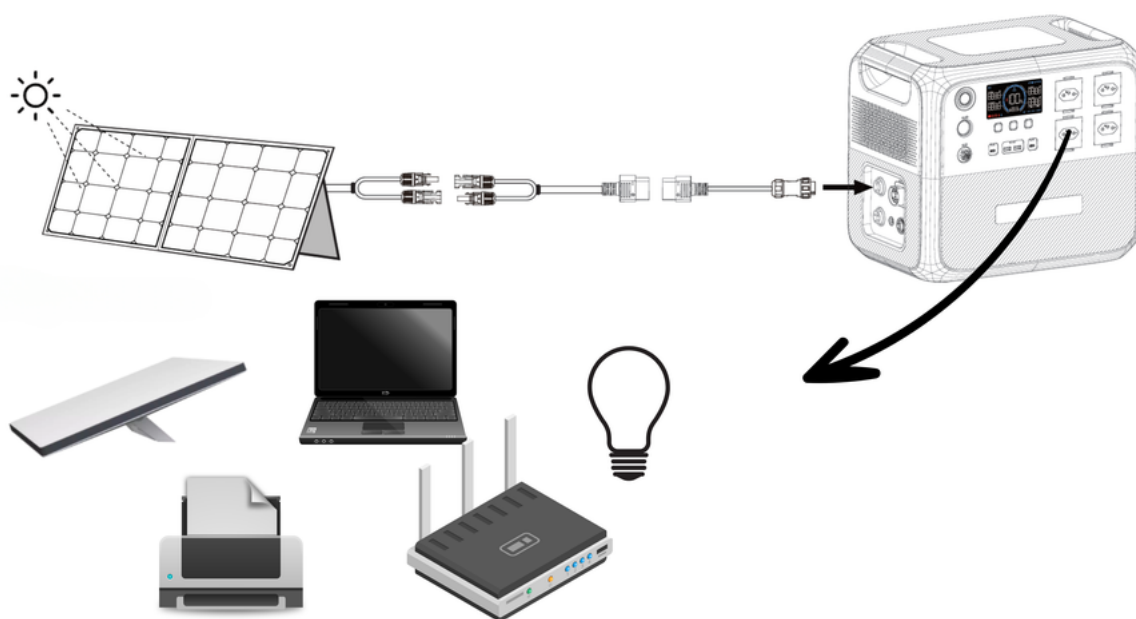
A tensão nominal do banco (51,2V DC) está plenamente alinhada ao dimensionamento elétrico do sistema, o que facilita a integração com o controlador MPPT e reduz perdas por

conversão. Os módulos fotovoltaicos escolhidos (PV350), por sua vez, possuem tensão de circuito aberto (Voc) de 33V cada, o que somado em série totaliza 66V — valor plenamente aceito pela faixa de entrada do controlador (12–145V DC). A corrente de curto-circuito (13,8A por módulo) se mantém abaixo do limite máximo admitido pelo sistema (15A), assegurando operação dentro das margens recomendadas.

Outro ponto importante é a presença de proteções integradas contra sobretensão, subtensão e inversão de polaridade. Essa robustez técnica é especialmente relevante em aplicações críticas como telemedicina, onde interrupções podem comprometer serviços essenciais.

Por fim, destaca-se a flexibilidade do sistema em termos de compatibilidade e possibilidades de expansão, tanto pela presença de portas dedicadas para novos bancos de bateria quanto pelo suporte a comunicação inteligente via BMS, consolidando o kit como uma alternativa confiável e escalável para futuras demandas. Na figura 20 é ilustrado o diagrama funcional do sistema projetado, evidenciando a conexão entre os módulos fotovoltaicos (à esquerda), a estação de energia portátil (ao centro-direita) e os diversos equipamentos alimentados (na base), como notebook, impressora, roteador sem fio, antena Starlink e pontos de iluminação. O fluxo de energia parte dos painéis solares, passa pelos conectores e entra na estação Bluetti, que gerencia o armazenamento, a conversão e a distribuição da energia para os dispositivos finais. Esse arranjo simboliza de forma sintética a solução integrada concebida para sustentar operações de telemedicina em áreas remotas, reunindo geração, armazenamento, conectividade e carga em um único sistema modular e portátil.

Figura 20 – Esquema representativo do sistema proposto em operação



Fonte: Adaptada de Bluetti, 2025

4.6 VIABILIDADE ECONÔMICA E IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS DA SOLUÇÃO

A avaliação econômica do sistema proposto constitui etapa essencial para verificar sua viabilidade prática, sobretudo considerando o objetivo estratégico de oferecer suporte à telemedicina em regiões remotas. Foram, portanto, levantados os principais custos diretos associados à implementação da solução, compreendendo a aquisição do sistema fotovoltaico portátil, dos módulos solares e do equipamento de conectividade via satélite.

Em relação à conectividade, o custo médio do kit Starlink Mini no Brasil encontra-se atualmente em torno de R\$1.499, acrescido de uma mensalidade a partir de R\$236, dependendo do plano e perfil de mobilidade selecionados. Tais valores demonstram competitividade frente a alternativas convencionais, notadamente em áreas rurais onde serviços móveis ou enlaces rádio são frequentemente inexistentes ou instáveis.

No tocante à geração energética, o sistema selecionado incorpora dois módulos solares Bluetti PV350, conectados em série, entregando potência total aproximada de 700Wp, plenamente compatível com o controlador MPPT da estação. O custo médio unitário destes painéis situa-se entre R\$3.000 e R\$4.000, totalizando aproximadamente R\$6.000 a R\$8.000 para o conjunto. Já a estação Bluetti AC200PL, que agrega banco de baterias de 2.304Wh, inversor senoidal puro de 2.500W e gerenciamento eletrônico integrado, possui preço na faixa de R\$11.000 a R\$12.000 no mercado nacional. O investimento global estimado para a solução completa, abrangendo energia e conectividade, situa-se, assim, entre R\$18.500 e R\$21.500, dependendo das condições comerciais, logísticas e de câmbio no momento da aquisição.

Do ponto de vista ambiental, o projeto apresenta externalidades positivas expressivas. A simulação realizada no PV*SOL indicou um potencial de redução nas emissões de aproximadamente 382kg de CO₂ por ano, em comparação com cenários baseados em fontes fósseis ou em geradores a diesel, comuns em áreas remotas. Este fator contribui diretamente para a mitigação das mudanças climáticas e para o atendimento das metas de descarbonização propostas em acordos multilaterais.

No âmbito social e institucional, a solução fortalece compromissos assumidos no âmbito dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, em especial:

- o **ODS 3** (Saúde e Bem-Estar), por viabilizar atendimentos especializados via telemedicina;
- o **ODS 7** (Energia Acessível e Limpa), ao adotar geração fotovoltaica de alta eficiência em substituição a fontes poluentes;
- o **ODS 12** (Consumo e Produção Responsáveis) e **ODS 13** (Ação contra a Mudança Global do Clima), ao reduzir emissões e promover maior eficiência energética;

- e o **ODS 15** (Vida Terrestre), ao minimizar impactos ambientais decorrentes do uso de combustíveis fósseis.

Assim, a análise integrada dos aspectos técnicos, econômicos e socioambientais do sistema confirma não apenas sua viabilidade financeira, mas também o alinhamento estratégico com políticas globais de sustentabilidade, evidenciando seu potencial de gerar benefícios ambientais e sociais de longo prazo, em consonância com uma agenda de desenvolvimento responsável e inclusivo.

4.7 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Apesar da robustez técnica do sistema proposto e da coerência entre os resultados simulados e os testes práticos realizados, este estudo apresenta algumas limitações que devem ser reconhecidas. Essas restrições incidem tanto sobre aspectos operacionais quanto metodológicos, com potenciais implicações para a replicabilidade, escalabilidade e eficiência do sistema em cenários reais de aplicação.

a) Dependência direta da irradiação solar local

O desempenho do gerador fotovoltaico está intrinsecamente vinculado à disponibilidade solar no local de operação. Em períodos prolongados de baixa irradiância, como durante o inverno ou em regiões de alta nebulosidade, a geração pode se tornar insuficiente para atender à demanda energética da unidade, especialmente sem fontes auxiliares de energia. Isso representa uma vulnerabilidade relevante para sistemas projetados com foco exclusivo em autonomia solar.

b) Sensibilidade da conectividade via satélite a obstáculos e distância

Os testes de conectividade com a antena Starlink Mini revelaram degradação significativa de desempenho quando o terminal cliente se encontrava a maiores distâncias ou em ambientes com obstruções físicas parciais. O aumento do jitter e a ocorrência de perdas de pacotes acima dos níveis recomendados comprometeram a estabilidade da conexão, limitando a flexibilidade espacial e exigindo um posicionamento cuidadoso da antena e dos equipamentos periféricos.

c) Restrições à escalabilidade e mobilidade do sistema

Embora a solução apresente boa portabilidade na configuração atual, a ampliação da autonomia energética — por meio de baterias maiores ou de maior número de módulos — pode comprometer a mobilidade e o transporte da estrutura, especialmente em contextos com acesso restrito ou necessidade de deslocamentos frequentes. Essa limitação impõe um equilíbrio delicado entre desempenho e praticidade.

d) Escopo reduzido dos testes experimentais

Os testes realizados ocorreram em um número limitado de cenários e localidades, não abrangendo diferentes realidades climáticas, geográficas ou sazonais. Além disso, os dados de desempenho não foram coletados em séries temporais longas, o que limita a análise de variabilidade operacional e resiliência do sistema ao longo do tempo.

e) Ausência de validação institucional e clínica

Este estudo concentrou-se na viabilidade técnica e energética do sistema, sem contemplar a integração com plataformas clínicas reais, protocolos de atendimento ou fluxos operacionais em serviços de saúde. Questões como segurança da informação, interoperabilidade com prontuários eletrônicos e aceitação do modelo por profissionais de saúde permanecem fora do escopo da pesquisa.

f) Dependência de operadores capacitados para instalação e operação

Uma limitação significativa diz respeito à necessidade de capacitação técnica da pessoa responsável pela instalação, ativação e monitoramento do sistema em campo. Como o modelo proposto não prevê que o próprio profissional de saúde atue na gestão técnica dos equipamentos, será necessário que agentes locais sejam treinados para operar o sistema com segurança, configurar a antena, interpretar alertas da estação de energia e garantir o funcionamento adequado dos dispositivos. A ausência de pessoas preparadas para essa função pode comprometer a continuidade e a confiabilidade do serviço, especialmente em localidades com baixa familiaridade tecnológica.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como foco o desenvolvimento e a análise da viabilidade técnica, econômica e socioambiental de uma solução integrada para suporte à telemedicina em áreas remotas, combinando um sistema fotovoltaico off-grid, armazenamento em banco de baterias e conectividade via internet satelital. Essa proposta buscou responder a uma problemática central relacionada à expansão dos serviços de saúde em localidades desprovidas de infraestrutura elétrica e de dados, propondo um modelo que pudesse garantir o funcionamento contínuo e confiável de unidades móveis de teleatendimento.

Todos os objetivos foram plenamente alcançados. O sistema proposto demonstrou capacidade para atender a uma demanda diária de 2.211 Wh, assegurando autonomia de 1,5 dias mesmo sob cenários conservadores de irradiância, conforme indicado pelas simulações. A escolha do kit Bluetti AC200P L associado a módulos PV350 mostrou-se adequada não apenas pelos parâmetros elétricos atendidos, mas também por sua portabilidade e robustez, aspectos essenciais para operações móveis em saúde.

A análise ambiental reforçou o caráter sustentável da solução, com potencial de evitar aproximadamente 382 kg de CO₂/ano, resultado direto do uso de energia solar em substituição à necessidade de extensões convencionais de rede elétrica. No tocante à viabilidade econômica, ainda que o investimento inicial esteja estimado entre R\$ 18.500 e R\$ 21.500, trata-se de um custo competitivo quando comparado à implementação de infraestrutura tradicional necessária para levar energia elétrica e conectividade fixa a regiões remotas — a qual envolveria altos dispêndios com obras civis, licenciamento e manutenção de longas linhas de transmissão e cabos de dados.

Não obstante, algumas limitações foram observadas, como a ausência de simulações sazonais mês a mês que contrastem geração e consumo, e a necessidade de estudos prolongados de conectividade para consolidar estatísticas mais robustas sobre jitter e perdas em diferentes condições operacionais. Tais pontos abrem espaço para recomendações a futuras pesquisas, que poderão aprofundar análises econômicas incorporando custos operacionais (OPEX) ao longo do ciclo de vida do sistema, explorar o uso de tecnologias complementares para estabilização do enlace local (como redes mesh ou cabos dedicados) e conduzir investigações de impacto social direto, avaliando indicadores de saúde e bem-estar em comunidades beneficiadas.

Em relação à conectividade, os testes práticos evidenciaram velocidades médias de download, upload e latências que atendem plenamente aos requisitos para videoconferências médicas, assegurando a transmissão de imagens e dados em tempo real com baixa latência base. Entretanto, observou-se que, em cenários com o dispositivo cliente posicionado a cerca de 20 metros da antena, ocorreram limitações relativas ao jitter e às perdas de pacotes, que superaram 3%, ultrapassando o patamar recomendado para serviços críticos de saúde. Tais resultados evidenciam a importância de manter a menor distância possível entre a antena e os dispositivos conectados, além de adotar o uso de roteadores dedicados, de modo a mitigar oscilações no

enlace local e garantir a estabilidade necessária para aplicações sensíveis como teleconsultas.

Além do contexto específico da telemedicina, o modelo proposto neste estudo demonstra potencial de aplicação em uma ampla gama de demandas presentes em áreas remotas, como programas de educação a distância, ações de saúde preventiva, sistemas de monitoramento ambiental e suporte tecnológico a pequenas propriedades agrícolas. Dessa forma, a pesquisa extrapola seu escopo inicial e se consolida como uma referência prática para soluções tecnológicas sustentáveis, contribuindo diretamente para a universalização do acesso a serviços essenciais e para o fortalecimento do desenvolvimento regional em localidades desassistidas.

De modo geral, os resultados desta pesquisa atestam o elevado potencial do sistema proposto não apenas para aplicações isoladas, mas também como base para políticas públicas voltadas à interiorização dos serviços de saúde, alinhando-se diretamente aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) relacionados à saúde (ODS 3), energia limpa (ODS 7), produção responsável (ODS 12) e ação climática (ODS 13). O trabalho, portanto, oferece uma contribuição prática e científica relevante, ao apresentar uma solução replicável, ambientalmente responsável e socialmente transformadora para ampliar o acesso à saúde em regiões historicamente negligenciadas.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando os resultados alcançados e as lacunas identificadas durante a execução deste trabalho, algumas direções podem ser indicadas para pesquisas e projetos futuros que visem consolidar e expandir a solução proposta:

- **Monitoramento em tempo real e telemetria:** Desenvolver sistemas de telemetria integrados, capazes de coletar e transmitir dados em tempo real sobre a geração fotovoltaica, o estado do banco de baterias e a qualidade do enlace de conectividade, viabilizando diagnósticos rápidos, ações preventivas e a formação de bancos de dados para análises estatísticas e preditivas — algo particularmente crítico em aplicações de saúde remota.
- **Ensaio avançado de conectividade em campo:** Futuras pesquisas poderão explorar medições de longo prazo, em diferentes horários e condições meteorológicas, para mapear padrões de jitter, latência e perdas de pacotes, avaliando também o impacto do uso de redes mesh, antenas direcionais ou cabos ethernet na qualidade do enlace Wi-Fi local.
- **Monitoramento de impactos sociais e indicadores de saúde:** Estudos futuros poderiam conduzir experimentações em comunidades reais, monitorando indicadores de saúde e bem-estar, satisfação dos usuários e eventuais ganhos em produtividade local, demonstrando o valor agregado da telemedicina suportada por sistemas sustentáveis.
- **Análise do ciclo de vida (LCA) e descarte sustentável:** Realizar estudos específicos sobre o ciclo de vida dos módulos, baterias e eletrônicos utilizados, considerando a

destinação adequada ao final do uso, de modo a reforçar a sustentabilidade ambiental do projeto em todas as etapas.

- **Redundância energética com fontes híbridas adicionais:** Explorar a inclusão de microgeradores eólicos ou pequenos geradores a biocombustível, avaliando a eficiência e a resiliência do sistema em cenários extremos de baixa insolação prolongada, característicos de algumas regiões.

Esses avanços poderão não apenas mitigar as limitações apontadas no presente estudo, mas também consolidar a solução como modelo replicável para programas públicos e privados voltados à inclusão social, saúde comunitária e ampliação da infraestrutura energética sustentável em regiões historicamente negligenciadas.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução Normativa nº 1000, de 7 de dezembro de 2021. Consolida as regras e os procedimentos sobre os serviços de distribuição de energia elétrica.** *Diário Oficial da União: seção 1*, Brasília, DF, 9 dez. 2021.
- ALVES, Stefany Maximo. **Estudo comparativo entre o dimensionamento de um sistema fotovoltaico on-grid e off-grid para uma instalação comercial.** 2024.
- BLUETTI. **AC200P L Portable Power Station.** Disponível em: <https://www.bluettipower.com/products/ac200p-l?srltid=AfmBOoq0tyJP-uhID82wHUSLtgt7N0dJgnrIxEx-AhKUuUxb0XKk5FFu>. Acesso em: 25 jul. 2025.
- CFM. Conselho Federal de Medicina. **Resolução CFM nº 1.643, de 26 de agosto de 2002. Define e disciplina a prestação de serviços através da Telemedicina.** *Diário Oficial da União: seção 1*, Brasília, DF, p. 59, 26 ago. 2002. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-n-1.643-de-26-de-agosto-de-2002-5244444>. Acesso em: 21 jun. 2025.
- CFM. Conselho Federal de Medicina. **Resolução CFM nº 2.314, de 20 de abril de 2022. Estabelece normas éticas para a prática da telemedicina no Brasil.** *Diário Oficial da União: seção 1*, Brasília, DF, p. 222, 05 mai. 2022. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-n-2.314-de-20-de-abril-de-2022-397946881>. Acesso em: 21 jun. 2025
- CAMPOS, Luis Oliver. **Capacidade de armazenamento de bateria solar.** Boa Energia, 9 jan. 2024. Disponível em: <https://boaenergia.com.br/glossario/capacidade-de-armazenamento-de-bateria-solar/>. Acesso em: 8 jul. 2025.
- CANAL SOLAR. **Controlador de carga: conheça os tipos PWM e MPPT.** 2022. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/controlador-de-carga>. Acesso em: 8 jul. 2025.
- CARVALHO, Lia. **Como dimensionar um sistema fotovoltaico?** Instituto Solar, 7 ago. 2023. Disponível em: <https://institutosolar.com/como-dimensionar-sistema-fotovoltaico/>. Acesso em: 17 jun. 2025.
- CLOUDTALK. **O que é jitter e por que é importante para a qualidade da chamada VoIP.** CloudTalk, 2022. Disponível em: <https://www.cloudtalk.io/pt-br/blog/o-que-e-jitter-e-por-que-e-importante-para-a-qualidade-da-chamada-voip/>. Acesso em: 11 jul. 2025.
- DAL PONTE, Patrick. **Telessaúde e Telemedicina: qual a diferença e quais os benefícios?** Amplimed, 2024. Disponível em: <https://www.amplimed.com.br/blog/telemedicina-e-telessaude-diferenca-e-beneficios/>. Acesso em: 6 jun. 2025.
- DOMINGUES, Daniela A. M. et al. **História da evolução da telemedicina no mundo, no Brasil e no Rio Grande do Sul.** In: LOPES, Maria H. I.; SCHWARTSMANN, Leonor C. B. (Org.). **Registros da História da Medicina.** 1. ed. Porto Alegre: Luminara Editorial, 2014. v. 1, p. 209–218.
- DUARTE, Marcella. **Como é a conexão por satélite do espaço.** UOL Tilt, São Paulo, 2023. Disponível em: <https://www.uol.com.br/tilt/noticias/redacao/2023/04/23/como-e-a-conexao-por-satelite-do-espaco.htm>. Acesso em: 9 jul. 2025.

FERREIRA, R. T. **Análise da Viabilidade Econômica da Substituição de Banco de Baterias: Chumbo-Ácido x Ni-Cd, Considerando Diferentes Temperaturas Ambiente.** Seminar on Power Electronics and Control - SEPOC, 18 maio 2021.

FERREIRA, Samuel dos Santos. **Potencialidades da energia solar fotovoltaica no Brasil.** 2022. 35 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Anhanguera, Rondonópolis, 2022.

FRANZONI, Maiara. **Starlink: internet rural via satélite é realidade no Brasil.** Agroadvance, 27 abr. 2023. Disponível em: <https://agroadvance.com.br/blog-starlink-internet-rural-via-satelite/>. Acesso em: 8 jul. 2025.

HOLSLIN, Peter. **The ultimate guide to Zoom internet speed requirements.** HighSpeedInternet.com, 2025. Disponível em: <https://www.highspeedinternet.com/resources/zoom-guide>. Acesso em: 10 jul. 2025.

IJAILLE, Charles Jarek. **Proposta de implantação de micro redes em sistemas fotovoltaicos isolados.** 2021. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Internet foi acessada em 72,5 milhões de domicílios do país em 2023.** Agência de Notícias, 16 ago. 2024. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/41024-internet-foi-acessada-em-72-5-milhoes-de-domicilios-do-pais-em-2023>. Acesso em: 16 jul. 2025.

INSTITUTO DE ESTUDOS PARA POLÍTICAS DE SAÚDE – IEPS. **34% da população não tem acesso à atenção básica de saúde, aponta novo estudo do IEPS.** IEPS, 28 nov. 2022; atualizado em 2 maio 2024. Disponível em: <https://ieps.org.br/34-da-populacao-nao-tem-acesso-a-atencao-basica-c>. Acesso em: 20 mar. 2025.

KUR, Andréia Da Silva Sales; DA SILVA, Silvia Ortiz Garcia; DE PINHO, Silvia Teixeira. **Telemedicina no SUS: garantia de acesso aos serviços de saúde para a população rural.** *Brazilian Journal of Implantology and Health Sciences*, v. 5, n. 5, p. 814-831, 2023.

Lei nº 13.989, de 15 de abril de 2020. Dispõe sobre o uso da Telemedicina durante a crise causada pelo coronavírus (COVID-19). *Diário Oficial da União: seção 1*, Brasília, DF, p. 1, 16 abr. 2020. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l13989.htm. Acesso em: 21 jun. 2025.

LISBOA, Kálita Oliveira et al. **A história da telemedicina no Brasil: desafios e vantagens.** *Saúde e Sociedade*, São Paulo, v. 32, n. 1, e210170pt, 2023. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/sausoc/a/htDNpswTKXwVr667LV9V5cP/>. Acesso em: 21 jun. 2025.

MAGALHÃES, Rodrigo. **Internet via Satélite: como funciona, vantagens e qual escolher.** América Chip, 2024. Disponível em: <https://americachip.com/internet-via-satelite/>. Acesso em: 9 jul. 2025.

MAGAVI TELECOM. **Internet via satélite: vantagens e como funciona.** 2024. Disponível em: <https://magavitelecom.com.br/index.php/2024/02/01/internet-viasatelite/#:~:text=Vantag>

ens%20da%20internet%20via%20sat%C3%A9lite,durante%20dias%20chuvosos%20por%20exemplo. Acesso em: 21 mar. 2025.

MCom. Ministério das Comunicações. **Tecnologia 5G FWA se mostra solução eficiente para conectar escolas em áreas rurais e remotas do Brasil.** Brasília: MCom, 4 jul. 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/mcom/pt-br/noticias/2025/julho/tecnologia-5g-fwa-se-mostra-solucao-eficiente-para-conectar-escolas-em-areas-rurais-e-remotas-do-brasil>. Acesso em: 8 jul. 2025.

MORSCH, José Aldair. **Plataforma de telemedicina: o que é e como funciona?** Telemedicina Morsch, 2023. Disponível em: <https://telemedicinamorsch.com.br/blog/plataforma-telemedicina>. Acesso em: 25 jul. 2025.

MS. Ministério da Saúde. **Portaria nº 467, de 20 de março de 2020. Dispõe, em caráter excepcional e temporário, sobre as ações de Telemedicina durante a crise causada pelo coronavírus (COVID-19).** *Diário Oficial da União: seção 1*, Brasília, DF, ed. extra, p. 1, 23 mar. 2020. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-n-467-de-20-de-marco-de-2020-249312996>. Acesso em: 21 jun. 2025.

NEMCHICK, Emily. **How to Test for Packet Loss and Check Your Internet Quality.** Avast, 16 fev. 2024. Disponível em: <https://www.avast.com/pt-br/c-packet-loss-test-guide>. Acesso em: 10 jul. 2025.

NERIS, Alessandra. **Irradiação solar: o que é, importância e como medir.** Aldo Solar, 2023. Disponível em: <https://www.aldo.com.br/blog/irradiacao-solar/>. Acesso em: 8 jul. 2025.

OLIVEIRA, Bruna Soraya da Silva Barbosa et al. **Análise e evolução da telemedicina no Brasil nos anos 2019-2023 e sua atual importância.** *Revista Contemporânea*, São Paulo, v. 4, n. 10, p. 1–21, 2024. DOI: 10.56083/RCV4N10-088.

OLIVEIRA, Ítalo Carneiro de et al. **A importância da telemedicina no acesso à saúde em regiões remotas.** *Revista Tópicos*, [S. l.], v. 1, p. 1–11, 2024. DOI: 10.5281/zenodo.14676387.

OPT TELECOM. **Entenda os desafios e as soluções para as telecomunicações em área rural.** 2024. Disponível em: <https://blog.opttelecom.com.br/telecomunicacoes-em-area-rural/>. Acesso em: 8 jul. 2025.

PIRES, António Miguel Berrucho Martins. **Estação de satélites com controlo remoto.** 2023. Dissertação de Mestrado. ISCTE-Instituto Universitário de Lisboa (Portugal).

PORTAL PÓS. **Videoconsulta: 8 ferramentas digitais para atendimentos médicos online.** 2023. Disponível em: <https://blog.portalpos.com.br/videoconsulta-8-ferramentas-digitais/>. Acesso em: 25 jul. 2025.

PORTAL TELEMEDICINA. **Infraestrutura de telemedicina: o que é necessário para realizar uma consulta a distância?** 2021. Disponível em: <https://portaltelemedicina.com.br/estrutura-telemedicina>. Acesso em: 21 jun. 2025.

PWC. **O abismo digital no Brasil.** PwC Brasil, 2022. Disponível em: <https://www.pwc.com.br/pt/estudos/preocupacoes-ceos/mais-temas/2022/o-abismo-digital-no-brasil.html>. Acesso em: 8 jul. 2025.

REDATOR MACRO. **Diferença entre latência de download e upload: o que você precisa saber.** Veek Blog, 2024. Disponível em: <https://blog.veek.com.br/blog/diferenca-entre-l-atencia-de-download-e-upload-o-que-voce-precisa-saber>. Acesso em: 11 jul. 2025.

RIBEIRO, Giankarlo Fialho. **Dimensionamento de um sistema fotovoltaico off-grid em um motorhome.** 2020. Monografia (Graduação em Engenharia da Computação) – UNICEUB, Brasília, 2020. Disponível em: <https://repositorio.uniceub.br/jspui/handle/prefix/15114>. Acesso em: 8 jul. 2025.

SEC POWER. **Como a energia solar fotovoltaica é convertida em eletricidade.** 2024. Disponível em: <https://secpower.com.br/energia-solar-fotovoltaica/>. Acesso em: 17 jul. 2025.

SILVA, Camila Correa da. **Análise de viabilidade da implementação da energia solar fotovoltaica em comunidades isoladas: um estudo de caso.** 2019. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Produção) — Faculdade Vale do Cricaré, São Mateus, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ivic.br/handle/123456789/338>. Acesso em: 21 mar. 2025.

SILVA, F. C. A. da; BELCHIOR, F. N.; FONSECA, M. N. **Sistema fotovoltaico off-grid com baterias em zona rural – estudo de caso.** *Observatório de la Economía Latinoamericana*, v. 23, n. 1, p. e8664, 2025. DOI: 10.55905/oelv23n1-126. Disponível em: <https://ojs.observatorio-latinoamericano.com/ojs/index.php/olel/article/view/8664>. Acesso em: 5 jul. 2025.

SILVA, Hugo Oliveira da. **Análise para aplicação de sistemas fotovoltaicos off-grid em hospitais de campanha isolados do Exército Brasileiro.** 2024. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, 2024. DOI: 10.11606/D.3.2024.tde-17012025-083839. Acesso em: 30 jun. 2025.

SILVA JÚNIOR, Erasmo José Silvestre da et al. **Telemedicina em zonas geograficamente isoladas.** *Revista Contemporânea*, São Paulo, v. 4, n. 12, p. 1–12, 2024. DOI: 10.56083/RCV4N12-128.

SILVA, John Macon Araujo. **Testes de velocidade: entenda os parâmetros de análise.** [Postagem em LinkedIn]. LinkedIn, 13 mar. 2025. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/testes-de-velocidade-entenda-os-par%C3%A2metros-an%C3%A1lise-john-silva-o4q8f>. Acesso em: 10 jul. 2025.

SOUSA, M. C. et al. **Sistema Fotovoltaico Off Grid para comunidade ribeirinha na Região Insular de Belém – Pará.** *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*, v.12, n.9, p.312-324, 2021. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179> 6858.2021.009.0024.

STA ELETRÔNICA. **Baterias de Lítio – Íon Fosfato de Lítio Ferro – LiFePO4 (LFP).** Disponível em: <https://www.sta-eletronica.com.br/artigos/baterias-recarregaveis/baterias-de-life-po4/baterias-de-litio-ion-fosfato-de-litio-ferro-lifepo4-lfp>. Acesso em: 06 jul. 2025.

STARLINK. **Internet de alta velocidade pelo mundo afora.** 2025. Disponível em: <https://www.starlink.com/br/technology>. Acesso em: 10 jul. 2025.

TECNOBEE. **Qual é a velocidade de upload ideal.** TecnoBee, 2023. Disponível em: <https://tecnobee.com.br/blog/qual-e-a-velocidade-de-upload-ideal/>. Acesso em: 10 jul. 2025.

VIEIRA, Enock Cabral Almeida. **Framework para autocura cognitiva de redes de**

banda larga. 2024. 90 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Universidade Federal de Uberlândia, 2024. DOI: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2024.568>.

VILLALVA, Marcelo Gradella. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações.** 2. ed. rev. e atual. São Paulo: Érica, 2015.

ZAMARIOLI, Guilherme. [Esquema ilustrativo da conexão via satélite]. In: DUARTE, Marcella. **Como é a conexão por satélite do espaço.** São Paulo: UOL Tilt, 2023. Disponível em: <https://www.uol.com.br/tilt/noticias/redacao/2023/04/23/como-e-a-conexao-por-satelite-d-o-espaco.htm>. Acesso em: 9 jul. 2025.

ZANESCO, Lara. **Telemedicina no Brasil: o que é, como funciona, aplicação e benefícios.** Company Hero, 15 mar. 2023. Disponível em: <https://www.companyhero.com/blog/telemedicina-no-brasil-aplicacao-e-beneficios>. Acesso em: 21 jun. 2025.