



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PROJETO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO
OFF-GRID PARA ESCOLA SEM ACESSO À
ENERGIA ELÉTRICA CONVENCIONAL E
ANÁLISE DE IMPACTOS TÉCNICOS,
ECONÔMICOS, SOCIAIS E AMBIENTAIS.

LAURA DE OLIVEIRA BARBOSA

Brasília, dezembro de 2023

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Projeto de sistema fotovoltaico *off-grid* para escola sem acesso à energia elétrica convencional e análise de impactos técnicos, econômicos, sociais e ambientais.

Laura de Oliveira Barbosa

APROVADA POR:

Prof. Dr.: Fernando Cardoso Melo (Universidade de Brasília, ENE)
(Orientador)

Prof. Dr.: Rafael Amaral Shayani (Universidade de Brasília, ENE)
(Membro Interno)

Prof. Dr.: Amauri Gutierrez Martins Britto (Universidade de Brasília, ENE)
(Membro Interno)

Brasília/DF, Dezembro de 2023

FICHA CATALOGRÁFICA

DE OLIVEIRA BARBOSA, LAURA

Projeto de sistema fotovoltaico *off-grid* para escola sem acesso à energia elétrica convencional e análise de impactos técnicos, econômicos, sociais e ambientais.. [Brasília/DF] 2023.

(ENE/FT/UnB, Graduanda, Trabalho de conclusão de curso, 2023).

Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica.

Departamento de Engenharia Elétrica

1. Energia Solar Fotovoltaica
 2. Fotovoltaica em regiões remotas
 3. Energia Solar Fotovoltaica *Off-grid*
- I. ENE/FT/UnB

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

DE OLIVEIRA BARBOSA, LAURA (2023). Projeto de sistema fotovoltaico *off-grid* para escola sem acesso à energia elétrica convencional e análise de impactos técnicos, econômicos, sociais e ambientais.. Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2023.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Laura de Oliveira Barbosa

TÍTULO: Projeto de sistema fotovoltaico *off-grid* para escola sem acesso à energia elétrica convencional e análise de impactos técnicos, econômicos, sociais e ambientais..

GRAU: Graduação ANO: 2023

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste Trabalho de Conclusão de curso e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste trabalho de conclusão de curso pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Laura de Oliveira Barbosa

Universidade de Brasília (UnB)

Campus Darcy Ribeiro

Faculdade de Tecnologia - FT

Departamento de Engenharia Elétrica(ENE)

Brasília - DF CEP 70919-970

Dedico este trabalho à minha família, em especial ao meu pai que sempre me incentivou nos estudos e que infelizmente não está mais conosco.

AGRADECIMENTOS

O tempo que passei na Universidade de Brasília não teria sido o mesmo sem o apoio da minha família e das pessoas maravilhosas que conheci ao longo do caminho. Todos os conselhos, conversas e momentos com as pessoas que são importantes na minha vida foram essenciais para eu chegar onde estou agora.

Agradeço aos meus pais, José Henrique e Marina, por sempre me incentivarem e apoiarem. Agradeço ao meu pai, pessoa mais inteligente e dedicada que eu tive o prazer de conviver por 21 anos, que sempre acreditou em mim e que sempre foi o meu parceiro para todos os momentos. Agradeço à minha mãe, a mulher mais forte e gentil que sempre me acolheu e me impulsionou em todos os momentos, obrigada por todas as conversas e risadas.

Agradeço meus irmãos Vitor, Carolina e Francisco. Vitor, muito obrigada por todos os conselhos, experiências compartilhadas, momentos de diversão e pelo cuidado que você tem comigo. Carol, muito obrigada pela parceria e carinho. Chico, você é um exemplo de pai e de irmão, obrigada por todos os momentos juntos. Agradeço aos meus avós, por sempre me incentivarem nos estudos e por me acolherem, à minha tia Vânia, que sempre se fez presente, que sempre cuidou de mim e ao meu tio Evando por todo apoio em todos os momentos, obrigada por proporcionar a minha primeira oportunidade profissional. Agradeço ao meu namorado, João Lucas, por ter sido meu companheiro durante a graduação, obrigada por cada palavra de incentivo, por sempre me apoiar, por todas as conversas e por todos os momentos compartilhados, você é muito importante na minha vida. Sem o amor e carinho de vocês eu não estaria onde estou hoje.

Agradeço às minhas amigas Luana, Gabriella e Caroline, minhas melhores amigas, vocês são muito importantes na minha vida, obrigada por todo o apoio, carinho e atenção que vocês tem comigo, agradeço por todos os momentos que passamos juntas e por todos os conselhos. Agradeço aos meus amigos, Raissa, Sofia Prado e Fabrício, vocês são muito importantes para mim. E, agradeço à minha amiga, Rafaela Brino, por todo o apoio e parceria sempre.

Agradeço pelo tempo que passei na ENETEC, um dos momentos de maior enriquecimento profissional que tive durante a graduação, agradeço por todas as pessoas que conheci na empresa e aos meus amigos: componentes da Direx Pi Fai Zer, Malu, Rafa, Paola, Julia, Paulinho, Trigueiro, Vini, Rafael, Amandinha, Naretto e Leandro. Agradeço à Rebeca, muito obrigada por todas as conversas que tivemos, todos os nossos cafés, você é muito importante na minha vida. Helena, muito obrigada por ter sido minha parceira durante o curso, com certeza minha graduação foi melhor com você. Agradeço aos meus amigos, Érico e Walter, obrigada por estarem lá no começo da minha jornada universitária.

Agradeço ao Professor Fernando Cardoso Melo, meu orientador, obrigada por toda a ajuda durante a construção deste Trabalho de Conclusão de Curso, agradeço por todos os momentos de conversa, o seu apoio foi fundamental para que eu pudesse concluir essa etapa da minha graduação.

Por fim, agradeço à todos os professores que tive o prazer de conhecer durante a minha graduação, a atuação de vocês impacta vidas de forma imensurável, o conhecimento é o maior tesouro. Agradeço também, à todo o corpo de funcionários da Universidade de Brasília, a atuação de cada um foi essencial para que eu pudesse ter a oportunidade de aprender nessa instituição.

Laura de Oliveira Barbosa

RESUMO

A energia solar fotovoltaica *off-grid* representa uma opção muito interessante para comunidades sem acesso à energia elétrica convencional proveniente das concessionárias. Esse sistema oferece uma alta confiabilidade e possui diversos benefícios sociais e ambientais, em comparação com instalações movidas por geradores à diesel, comumente adotados por comunidades isoladas para obter energia elétrica. Essa foi a motivação para dimensionar um modelo de sistema fotovoltaico *off-grid* para uma escola em uma comunidade isolada no Pará, buscando desenvolver um modelo replicável para outras instituições de ensino. O estudo de caso foi elaborado para a Escola Alacy Pena Vieira, localizada em Limoeiro do Ajuru no Pará, que atualmente é atendida por um gerador a diesel. O dimensionamento das cargas presentes na escola foi feito a partir da visão do telhado da escola, disponível no *Google Maps*® e por meio de um levantamento do IBGE, de 2022, que definiu a quantidade de estudantes e a quantidade aproximada de dispositivos presentes na instituição. Foram definidos dois casos para o desenvolvimento do projeto: o primeiro avalia a implementação de um sistema fotovoltaico *off-grid* de 73.800 Wp, com um banco de baterias com autonomia de 1 dia, com capacidade de 150 kWh. O segundo caso trata de um sistema de 127.920 Wp, com um banco de baterias com autonomia de 2,36 dias, com capacidade de 390 kWh. Com a análise dos custos de investimento para cada caso é possível definir que, embora o segundo caso exija um investimento inicial maior, é considerado a opção mais viável para garantir a confiabilidade necessária durante períodos chuvosos e de baixa incidência solar. Além disso, são expostos os benefícios sociais e ambientais da implementação do sistema fotovoltaico. O impacto ambiental é considerável, com a redução de emissão de, aproximadamente, 17.785,6 kg de CO_2 por ano, uma vez que a escola deixaria de utilizar o gerador a diesel. Além disso, diversos benefícios sociais se destacam, como a potencial inclusão digital dos estudantes, melhoria no armazenamento de alimentos, a capacitação da comunidade sobre a manutenção do sistema fotovoltaico, aumento de segurança, entre outros.

ABSTRACT

The off-grid photovoltaic solar energy represents a highly compelling option for communities without access to conventional electrical power from utility companies. This system offers high reliability and has various social and environmental benefits when compared to installations powered by diesel generators, commonly adopted by isolated communities for electricity generation. This served as motivation to design a model for an off-grid photovoltaic system for a school in a remote community in Pará, aiming to develop a replicable model for other educational institutions. The case study was conducted for Alacy Pena Vieira School, located in Limoeiro do Ajuru, Pará, currently served by a diesel generator. Load sizing for the school was determined from the rooftop perspective available on Google Maps® and through a 2022 IBGE survey that defined the number of students and the approximate number of devices present in the institution. Two scenarios were defined for project development: the first evaluates the implementation of a 73,800 Wp off-grid photovoltaic system with a battery bank with 1-day autonomy and a capacity of 150 kWh. The second scenario involves a 127,920 Wp system with a battery bank providing 2.36 days of autonomy and a capacity of 390 kWh. With the analysis of investment costs for each scenario it is possible to conclude that, although the second scenario requires a higher initial investment, it is considered the most viable option to ensure the necessary reliability during rainy periods and low solar incidence. Additionally, the social and environmental benefits of the photovoltaic system implementation are outlined. The environmental impact is substantial, with a reduction in emissions of approximately 17,785.6 kg of CO_2 per year, as the school would cease to use the diesel generator. Moreover, various social benefits stand out, such as the potential digital inclusion of students, improvement in food storage, community training in photovoltaic system maintenance, increased security, among others.

SUMÁRIO

Sumário	i
Lista de figuras	v
Lista de tabelas	vi
Lista de símbolos	viii
Capítulo 1 – Introdução	1
1.1 Contextualização	1
1.2 Motivação	1
1.3 Identificação do problema	3
1.4 Objetivos do trabalho	4
1.4.1 Objetivos gerais	4
1.4.2 Objetivos específicos	5
1.5 Estrutura do trabalho	5
Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica	7
2.1 Objetivos de desenvolvimento sustentável	7
2.1.1 ODS 7 - Energia limpa e acessível	7
2.1.2 ODS 10 - Reduzir as desigualdades	8
2.2 Mudanças climáticas	9
2.3 Sistemas fotovoltaicos	10
2.3.1 Módulos fotovoltaicos	10
2.3.2 Controladores de carga	11
2.3.3 Baterias	12
2.3.3.1 Estágios do carregamento de baterias	12
2.3.4 Inversores	13
2.4 Impactos sociais, ambientais e financeiros da utilização do diesel	13
2.5 Programas governamentais	14
2.5.1 Luz para todos	15

2.5.1.1	Especificações para módulos fotovoltaicos	15
2.5.1.2	Especificações dos inversores	15
2.5.1.3	Especificações dos controladores de carga	16
2.5.1.4	Especificações das baterias	16
2.5.2	Mais luz para a Amazônia	16
2.6	Avanços da fotovoltaica <i>off-grid</i>	17
2.7	Trabalhos de sistemas fotovoltaicos <i>off-grid</i> para regiões remotas	19
2.8	Estudo sobre perfil de carga em escolas	21
2.8.1	Padrão de consumo no Centro de Ensino Médio 02 de Ceilândia	21
2.8.2	Padrão de consumo em escolas públicas em Belo Horizonte	23
2.9	Considerações finais	24
Capítulo 3 – Metodologia		26
3.1	Estrutura do projeto	26
3.2	Modelos dos dispositivos utilizados	27
3.2.1	Dados dos módulos fotovoltaicos	27
3.2.2	Dados das baterias	27
3.2.3	Dados dos inversores	28
3.2.4	Dados dos condutores para os arranjos fotovoltaicos	28
3.3	Determinação da localização	29
3.4	Avaliação do recurso solar	29
3.5	Levantamento de demanda e do consumo de energia elétrica	30
3.6	Cálculo de energia consumida mensalmente	34
3.7	Dimensionamento dos componentes	36
3.7.1	Energia ativa necessária diariamente	37
3.7.2	Capacidade do banco de baterias - CBB	38
3.7.3	Potência necessária a ser gerada pelo sistema fotovoltaico	39
3.7.4	Definição da quantidade de módulos fotovoltaicos	40
3.7.5	Correção da tensão de máxima potência (V_{mp}) para a temperatura má- xima e mínima	41
3.7.5.1	Quantidade de módulos em série	41
3.7.5.2	Quantidade de módulos em paralelo	42
3.7.6	Dimensionamento dos controladores de carga	43
3.7.7	Avaliação de compatibilidade do inversor híbrido com os arranjos	44
3.7.8	Distribuição das baterias nos arranjos	45
3.7.9	Dimensionamento dos condutores	46
3.7.9.1	Lado de corrente contínua	46

3.7.9.2	Lado de corrente alternada	47
3.7.9.3	Método da seção mínima	47
3.7.9.4	Método da capacidade de condução da corrente	48
3.7.9.5	Método de queda de tensão	49
3.7.10	Dimensionamento dos dispositivos de proteção	49
3.7.10.1	Dimensionamento dos fusíveis - Corrente contínua	50
3.7.10.2	Dimensionamento dos disjuntores - Corrente contínua	50
3.7.10.3	Dimensionamento dos disjuntores - Corrente alternada	51
3.8	Considerações finais	51
Capítulo 4 – Dimensionamento e resultados		53
4.1	Dimensionamento do sistema fotovoltaico <i>off-grid</i>	53
4.1.1	Cálculo da energia consumida diariamente	53
4.1.2	Cálculo da capacidade do banco de baterias - CBB	54
4.1.2.1	Caso 1: Capacidade do banco de baterias - 1 dia de autonomia	54
4.1.2.2	Caso 2: Capacidade do banco de baterias - 2,36 dias de autonomia	55
4.1.3	Cálculo da potência necessária a ser gerada pelo sistema fotovoltaico	56
4.1.3.1	Caso 1: Potência necessária - 1 dia de autonomia	56
4.1.3.2	Caso 2: Potência necessária - 2,36 dias de autonomia	56
4.1.4	Cálculo da quantidade de módulos fotovoltaicos	57
4.1.4.1	Caso 1: Cálculo da quantidade de módulos fotovoltaicos - 1 dia de autonomia	57
4.1.4.2	Caso 2: Cálculo da quantidade de módulos fotovoltaicos - 2,36 dias de autonomia	57
4.1.5	Cálculo da correção da tensão de máxima potência (V_{mp})	57
4.1.6	Cálculo da quantidade de módulos em série	58
4.1.7	Cálculo da quantidade de módulos fotovoltaicos em paralelo	59
4.1.7.1	Quantidade de módulos em paralelo por arranjo para os dois casos	59
4.1.7.2	Caso 1: Quantidade de arranjos - 1 dia de autonomia	60
4.1.7.3	Caso 2: Quantidade de arranjos - 2,36 dias de autonomia	60
4.1.8	Avaliação de compatibilidade do inversor híbrido com os arranjos	60
4.1.9	Distribuição das baterias nos arranjos	61
4.1.9.1	Distribuição das baterias nos arranjos - Caso 1	61
4.1.9.2	Distribuição das baterias nos arranjos - Caso 2	62
4.1.10	Tabela resumo do sistema	62
4.2	Análise do espaço para instalação do sistema fotovoltaico	63
4.2.1	Espaço necessário para o caso 1	63
4.2.2	Espaço necessário para o caso 2	64

4.3	Dimensionamento dos condutores	64
4.3.1	Lado de corrente contínua	64
4.3.2	Lado de corrente alternada	65
4.3.2.1	Método da seção mínima	65
4.3.2.2	Método da capacidade de condução de corrente	66
4.3.2.3	Método da queda de tensão	68
4.4	Dimensionamento dos dispositivos de proteção	68
4.4.1	Dimensionamento dos fusíveis	69
4.4.2	Dimensionamento dos disjuntores - Corrente contínua	69
4.4.2.1	Disjuntor entre o arranjo dos módulos e o inversor	69
4.4.2.2	Disjuntor entre a bateria e o inversor	70
4.4.3	Dimensionamento dos disjuntores - Corrente alternada	70
4.5	Diagrama unifilar	70
4.6	Custo do empreendimento	73
4.6.1	<i>Payback</i> caso 1	75
4.6.2	<i>Payback</i> caso 2	75
4.7	Quantidade de gases de efeito estufa provenientes do gerador a diesel	75
4.8	Investidores do projeto	76
4.9	Treinamento da população e manutenção do sistema	77
4.10	Descarte adequado dos componentes	77
4.11	Impactos sociais e financeiros	78
4.12	Considerações finais	79
	Capítulo 5 – Conclusões	81
	Referências	83

LISTA DE FIGURAS

1.1	Concentração populacional sem acesso à energia elétrica. Fonte: (IEMA, 2019) .	3
2.1	Indicadores Sociais - Fonte: (2030, 2022)	8
2.2	Modelo Sistema Fotovoltaico <i>Off-Grid</i> - Fonte: Energês	10
2.3	Estágios de Carregamento da Bateria - Fonte: (CHARGETEK, s.d.)	13
2.4	Padrão de consumo do centro de ensino médio 02 de Ceilândia - Fonte: Autoria própria	23
2.5	Padrão de consumo por mês por escola - Fonte:((PITÁGORAS) <i>et al.</i> , 2012) . .	24
3.1	Fluxograma do trabalho - Fonte: Autoria própria	26
3.2	Vista superior 1 da escola Alacy Pena Vieira - Fonte: (MAPS, 2023)	31
3.3	Vista superior 2 da escola Alacy Pena Vieira - Fonte: (MAPS, 2023)	31
3.4	Curva de consumo de energia estimado - Escola Alacy Pena Vieira - Fonte: Autoria própria	36
3.5	Diagrama de conexões do inversor híbrido - Fonte: 3.3	44
4.1	Diagrama unifilar AutoCAD®- Caso 1 - Fonte: Autoria própria	72
4.2	Diagrama unifilar AutoCAD®- Caso 2 - Fonte: Autoria própria	73

LISTA DE TABELAS

2.1	Tabela de consumo de energia em kWh por ano - Fonte: Neoenergia Brasília . . .	21
2.2	Tabela de % Consumo de Energia Mensal em Relação ao Total Anual - Fonte: Neoenergia Brasília	22
2.3	Tabela de consumo de energia em escolas - Fonte:((PITÁGORAS) <i>et al.</i> , 2012) .	23
3.1	Especificações do módulo fotovoltaico - SunNova Solar®- Fonte: (SUNNOVA, s.d.)	27
3.2	Especificações da bateria Unipower®- Fonte: (UNIPOWER, s.d.)	28
3.3	Especificações do inversor - Must®- Fonte: (SYSTEM, s.d.)	28
3.4	Especificações do condutor Prysmian Group®- Afumex Solar - Fonte: (GROUP, 2016)	29
3.5	Capacidade de condução de corrente (A) para diferentes tamanhos de condutores - Fonte: (GROUP, 2016)	29
3.6	Recurso solar - Fonte: (CRESESB, 2018)	30
3.7	Dimensionamento de cargas - Fonte: Autoria própria.	32
3.8	Tabela 5 - Fator de demanda - Subdemanda A - Fonte: NTD 6.01, 2004	33
3.9	Utilização de demanda durante os tipos de dias - Fonte: Autoria própria	35
3.10	Tabela de porcentagem de utilização de demanda mensal - Fonte: Autoria própria	35
3.11	Consumo de energia ao longo do ano - Fonte: Autoria própria	36
4.1	Consumo médio diário	53
4.2	Consumo médio diário - Maio	54

4.3	Resumo Sistema Projetado - Fonte: Autoria própria	63
4.4	Tabela 47 - Método da Seção Mínima - Fonte: (ABNT, 2004)	65
4.5	Tabela 40 - Fator de correção de temperatura - Fonte: (ABNT, 2004)	66
4.6	Tabela 46 - Número de condutores carregados a ser considerado - Fonte: (ABNT, 2004)	67
4.7	Tabela 42 - Fator de correção de Agrupamento - Fonte: (ABNT, 2004)	67
4.8	Tabela 36 - Seção do condutor - Método Capacidade de Condução de Corrente - Fonte: (ABNT, 2004)	68
4.9	Custo total do sistema por caso - Fonte: Autoria própria	74

LISTA DE ABREVIACOES

ABSOLAR	Agência Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
kWh	Quilowatt-hora
kWp	Quilowatt-pico
NBR	Norma Brasileira
WWF	<i>World Wide Fund</i>
UnB	Universidade de Brasília
W	Watt
Wp	Watt-pico
VA	Volt-Ampere
V	Volt
NR	Norma Regulamentadora
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
MME	Ministério de Minas e Energia
MMA	Ministério do Meio Ambiente
LPT	Luz para Todos
MLA	Mais Luz para a Amazônia
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
GEE	Gases de Efeito Estufa
EPE	Empresa de Pesquisa Energética

CRESCESB	Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito
CEPEL	Centro de Pesquisa de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CEB	Central Energética de Brasília
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
DF	Distrito Federal
A	Ampre
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
ONU	Organização das Nações Unidas
NTD	Norma Técnica de Distribuição
I	Corrente
P	Potência
U	Tensão
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
Procel	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
SAM	<i>System Advisor Model</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
PNAD	pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios
Iema	Instituto de Energia e Meio Ambiente
CPI	<i>Climate Policy Initiative</i>
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente
ICMBio	Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A energia elétrica se tornou um elemento imprescindível na vida da maioria das pessoas, porém uma grande parcela da população mundial, principalmente em regiões remotas, não possui uma fonte de energia confiável. Este fator gera diversos desafios sociais, econômicos e ambientais para essa população.

A ausência de uma fonte energética de qualidade tem impactos diretos na qualidade de vida das pessoas, limitando o acesso a serviços essenciais, como refrigeração de alimentos, iluminação e refrigeração de medicamentos. Isso resulta em oportunidades de desenvolvimento limitadas e perpetua um cenário de desigualdade.

Além disso, muitas pessoas nessas regiões, ao não serem atendidas pelo fornecimento de energia convencional, recorrem a fontes de energia não renováveis, como geradores movidos a diesel. Essa alternativa é altamente poluente e de difícil acesso, em regiões isoladas, trazendo consequências ambientais e sociais negativas.

Diante desse contexto, é fundamental analisar de forma aprofundada os impactos socioeconômicos e ambientais causados pela falta de acesso à energia elétrica convencional. Para enfrentar esses desafios, uma solução promissora é a implementação de sistemas fotovoltaicos *off-grid*, capazes de suprir as necessidades energéticas das comunidades de forma sustentável e acessível.

1.2 MOTIVAÇÃO

Os efeitos das mudanças climáticas têm sido cada vez mais perceptíveis no dia a dia das pessoas, eventos como chuvas extremamente fortes que causam inundações ou temperaturas

muito elevadas são somente alguns dos fatores que têm sido observados com mais facilidade nos últimos anos (CCST, 2022). De acordo com o capítulo seis do Sexto Relatório de Avaliação, documento elaborado pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas ou IPCC), que trata sobre mudanças climáticas, a maior fonte de CO₂ do planeta é o sistema global de energia, portanto, a transição energética se mostra como um fator essencial para a redução dos níveis de emissão de gás carbônico e para a atenuação dos efeitos provenientes do aquecimento global (NAVARRO *et al.*, 2021).

Porém, o relatório apresenta que as mudanças climáticas não foram o único fator determinante para o desenvolvimento de alternativas para geração de energia, o crescimento econômico, desenvolvimento tecnológico, acesso à energia, equidade na participação social, entre outros fatores também foram bastante importantes para a movimentação dos países em direção a exploração de fontes energéticas limpas.

O foco deste projeto gira em torno da elaboração de um projeto de fotovoltaica *off-grid*, que atenda a demanda da escola Alacy Pena Vieira localizada em uma região remota do Pará. Assim como diversas outras comunidades, hoje no Brasil, a escola é atendida somente por um gerador movido à diesel (EDU, 2022). O gerador além de ser um dispositivo poluente precisa do diesel, que em uma região remota, é extremamente difícil de ser obtido.

De acordo com o censo de 2022 do INEP (Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira) a escola atende, aproximadamente, 300 alunos (EDU, 2022). Desta forma, é imprescindível que a demanda energética da escola seja atendida totalmente, porém esta não é a realidade atual.

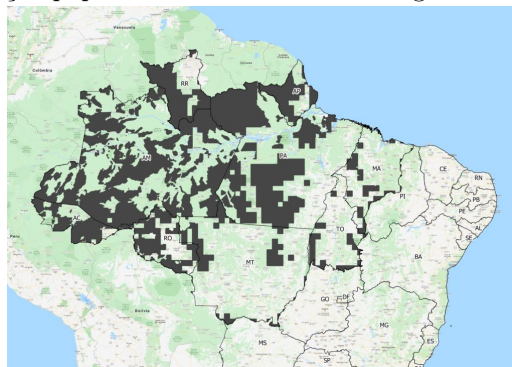
De acordo com um censo publicado pela Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel) em 2022, no Brasil, aproximadamente 3,4 mil escolas (BRASIL, 2022) não possuem um sistema de energia eficiente. Desta forma, motivou-se o desenvolvimento do projeto fotovoltaico *off-grid* que atenda a demanda energética atual da escola citada e que possa ser replicado para outras escolas que se encontram na mesma situação.

O desenvolvimento de um projeto de tal magnitude pode representar melhorias imensuráveis no desenvolvimento da rede pública de ensino. Além de fatores relacionados às melhorias diretas no aprendizado, como a expansão dos horários de aulas e a facilitação do processo de inclusão digital, existem fatores atrelados à segurança das pessoas que frequentam a escola.

1.3 IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA

Segundo um estudo realizado em 2022 pela Agência Internacional para as Energias Renováveis (IRENA), aproximadamente 733 milhões de pessoas ao redor do mundo não possuem acesso à energia elétrica (FUTURE, 2023). No Brasil, de acordo com a Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (Pnad), cerca de 144 mil residências, localizadas fora de regiões remotas, ainda não possuem acesso à eletricidade (PÚBLICA, 2022). Além disso, um estudo de 2019 realizado pelo Instituto de Energia e Meio Ambiente (Iema) estima que, aproximadamente, 990 mil pessoas na Amazônia Legal vivem nessa situação (IEMA, 2019).

Figura 1.1. Concentração populacional sem acesso à energia elétrica. Fonte: (IEMA, 2019)



Como é possível observar na Figura 1.1, a região Norte do país é a mais afetada pela falta de energia elétrica, fator que contribui para diversos impactos negativos. De acordo com dados disponibilizados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) em 2021, embora a região da Amazônia Legal tenha sido responsável pela produção de mais de 25% da energia elétrica nacional no ano de 2020, seu consumo representou apenas 8% do total gerado no país (SCHUTZE *et al.*, 2022).

Além disso, estima-se que cerca de 14% da Amazônia Legal não esteja conectada ao Sistema Interligado Nacional (SIN), aproximadamente 3 milhões de pessoas na região são atendidas por Sistemas Isolados, que na maioria das vezes dependem de usinas termelétricas e quase 1 milhão de pessoas não possuem acesso à energia elétrica convencional. Um estudo publicado pelo *Climate Policy Initiative* (CPI) em parceria com a PUC Rio revela que a maioria dessas pessoas precisa recorrer à utilização de geradores a diesel ou gasolina, os quais não suprem completamente a demanda energética dessa população, resultando em uma falta de energia contínua para uma parcela considerável da população brasileira (SCHUTZE *et al.*, 2022).

O *Climate Policy Initiative* divide a Amazônia Legal em três tipos de consumidores de energia: aqueles conectados ao SIN (Sistema Interligado Nacional), aqueles conectados à Sistemas Isolados e aqueles sem acesso à energia elétrica. A população sem acesso à energia elétrica enfrenta diversos desafios, como precariedade no sistema de saúde, dificuldade de armazenamento de alimentos, iluminação noturna precária e não acesso à água potável, entre outros fatores que afetam a qualidade de vida (SCHUTZE *et al.*, 2022). Além disso, o acesso ao diesel e à gasolina que alimentam os geradores representa um desafio, devido ao fato de que a população reside em áreas remotas e, na maioria das vezes, em situação de vulnerabilidade social.

O trabalho do CPI também apresenta a relação entre fatores socioeconômicos e a ausência de energia elétrica. Nas regiões abastecidas por Sistemas Isolados, que ainda possuem um certo nível de atendimento energético, os índices de IDH (Índice de Desenvolvimento Humano), IDEB (Índice de Desenvolvimento da Educação Básica) e IPS (Índice de Progresso Social) são extremamente baixos, além de apresentar altas taxas de desemprego e analfabetismo, estabelecendo uma relação direta entre a falta de energia elétrica e a vulnerabilidade social. Uma possível solução apresentada pelo trabalho do CPI é a implementação de fontes de energia renováveis, como a fotovoltaica, como substitutas para sistemas alimentados a diesel (SCHUTZE *et al.*, 2022).

1.4 OBJETIVOS DO TRABALHO

1.4.1 Objetivos gerais

Este trabalho tem como objetivo analisar os efeitos socioeconômicos e ambientais da implementação de um sistema fotovoltaico *off-grid* em uma escola localizada no interior do estado do Pará, que atualmente não possui de sistema elétrico convencional. O estudo tem como objetivo apresentar uma solução sustentável, substituindo o uso de combustíveis fósseis por energia renovável.

O projeto irá abordar o dimensionamento e o desenvolvimento do sistema fotovoltaico proposto para essa escola, considerando suas necessidades energéticas específicas. Além disso, serão explorados aspectos técnicos, como a seleção dos módulos fotovoltaicos, inversores, baterias e

controladores de carga, levando em consideração a demanda energética estimada.

Também, serão analisados os impactos socioeconômicos e ambientais da implementação desse sistema, avaliando como a utilização de sistemas fotovoltaicos pode contribuir para a melhoria das condições da população. Por fim, este trabalho também tem como objetivo servir como modelo replicável para outras instituições de ensino que enfrentam desafios semelhantes.

1.4.2 Objetivos específicos

É possível descrever os objetivos do trabalho nos seguintes tópicos:

- Entendimento dos efeitos negativos consequentes da ausência de um sistema de energia elétrica convencional;
- Destacar a importância da energia elétrica na sociedade atual, abordando suas implicações sociais e econômicas;
- Examinar a relevância de tecnologias, como a energia fotovoltaica *off-grid*, na resolução dos problemas relacionados à ausência de distribuição de energia em determinadas regiões;
- Propor uma solução por meio do dimensionamento de um sistema fotovoltaico *off-grid* para a escola selecionada como estudo de caso;
- Realizar uma análise social, econômica e ambiental dos efeitos da instalação do sistema fotovoltaico na escola, considerando seus benefícios e impactos nos aspectos mencionados;

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

1 Introdução: Contextualização, motivação, identificação do problema e apresentação dos objetivos gerais e específicos.

2 Revisão Bibliográfica: Análise aprofundada sobre a contextualização e apresentação do cenário atual.

3 Metodologia: Estabelecimento dos métodos a serem utilizados para possibilitar o desenvolvimento do projeto.

4 Dimensionamento e Resultados: Dimensionamento do sistema fotovoltaico *off-grid* proposto, análise crítica dos resultados e quantificação das reduções de emissões de CO₂.

5 Conclusões: Principais conclusões obtidas e propostas para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

Em 2015, durante a Assembleia Geral das Nações Unidas foram estabelecidos 17 objetivos de desenvolvimento sustentável, que visam atuar como um guia para a humanidade até 2030. “Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável são um apelo global à ação para acabar com a pobreza, proteger o meio ambiente e o clima e garantir que as pessoas, em todos os lugares, possam desfrutar de paz e de prosperidade.” (BRASIL, s.d.g)

Alguns desses ODS estão diretamente relacionados ao foco deste projeto, enquanto outros têm uma relação indireta. Dentre eles, destacam-se os elencados nos tópicos seguintes.

2.1.1 ODS 7 - Energia limpa e acessível

O objetivo 7 busca assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todas as pessoas (BRASIL, s.d.e). Existem metas específicas estabelecidas sobre este tema que devem ser alcançadas até 2030. No entanto, de acordo com o 6º Relatório Luz da Sociedade Civil da agenda 2030 de desenvolvimento sustentável do Brasil, o país tem apresentado um desempenho ineficaz para atingir essas metas.

Por exemplo, a meta 7.1, que trata do acesso confiável, moderno e com preços acessíveis a serviços de energia, revela que, apesar de 99,8% dos domicílios brasileiros terem energia elétrica, uma parcela significativa da população em situação de vulnerabilidade social voltou a utilizar lenha como substituto do gás de cozinha, devido aos altos preços, além de recorrer ao uso de álcool para cozinhar, o que é extremamente prejudicial (2030, 2022).

Além disso, a meta 7.2, que busca aumentar a presença de fontes de energia renovável na matriz energética, mostra que o Brasil está estagnado, com um aumento de apenas 2,3 pontos

percentuais entre 2019 e 2020. Infelizmente, a meta 7.3, que diz respeito à eficiência energética, também tem apresentado retrocesso nos últimos três anos (2030, 2022).

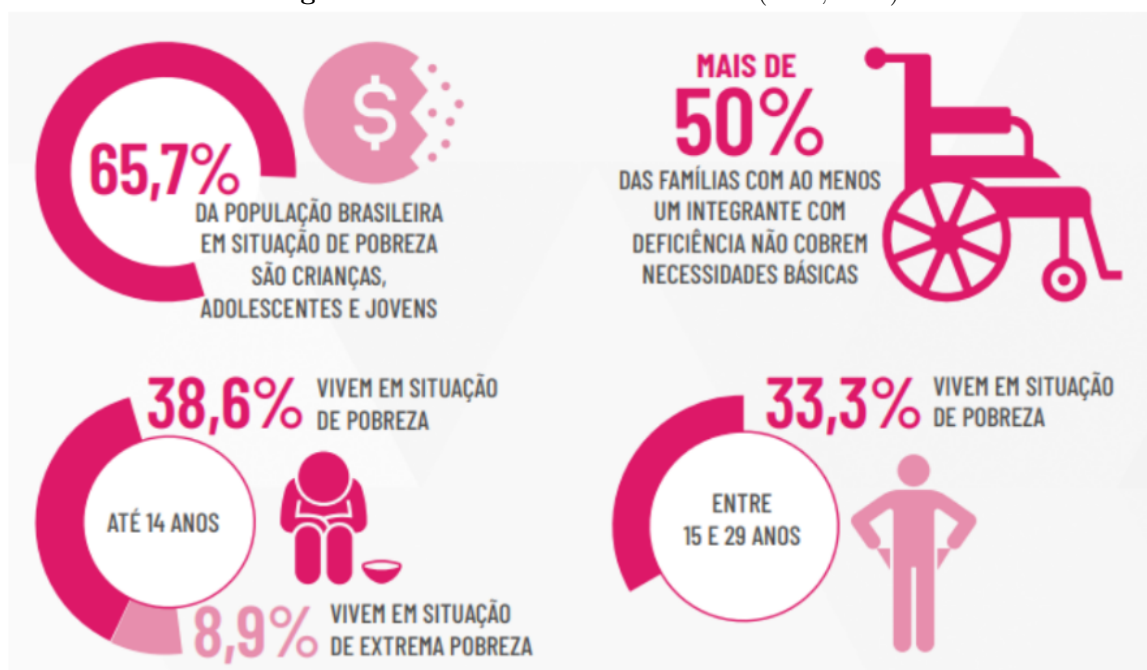
2.1.2 ODS 10 - Reduzir as desigualdades

O objetivo 10 tem como meta reduzir a desigualdade dentro e entre os países. No entanto, de acordo com o relatório Luz mencionado anteriormente, o Brasil tem apresentado um desempenho negativo nesse aspecto, com um aumento da desigualdade social (BRASIL, s.d.b).

Em relação a meta 10.1 que busca aumentar a renda dos 40% mais pobres da população, o relatório revela que o rendimento domiciliar em nível nacional em 2021 foi 0,94% menor em comparação com a média registrada em 2020. Historicamente, a parcela mais afetada da população costuma ser grupos sociais mais vulneráveis, o que também impacta o desempenho da meta 10.2, que trata do empoderamento da inclusão social. Um exemplo mencionado no relatório é a disparidade salarial entre homens e mulheres em 2021, com as mulheres recebendo em média 20,5% a menos (2030, 2022).

Quanto a meta 10.3 a Ouvidoria Nacional de Direitos Humanos (ONDH) reportou que entre 2020 e 2021 houve um aumento de duas vezes e meia a mais de denúncias feitas por grupos historicamente mais vulneráveis (2030, 2022).

Figura 2.1. Indicadores Sociais - Fonte: (2030, 2022)



Além dos ODS mencionados anteriormente, o projeto também possui uma relação indireta com outros objetivos, como o ODS 1, que trata da erradicação da pobreza (BRASIL, s.d.a), o ODS 4, relacionado à educação de qualidade (BRASIL, s.d.d), o ODS 11, que busca tornar as cidades e assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis (BRASIL, s.d.c), e o ODS 8, que visa promover o crescimento econômico sustentável, inclusivo, pleno e produtivo, além de trabalho decente para todos (BRASIL, s.d.f).

2.2 MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Conforme definido pelas Nações Unidas, as Mudanças Climáticas referem-se a alterações de longo prazo nos padrões de temperatura e clima (BRASIL, 2023). Embora parte dessas transformações seja naturalmente atribuída a mudanças no ciclo solar, a influência humana desempenha um papel significativo no agravamento das mudanças climáticas. Um dos principais impulsionadores desse fenômeno é a emissão de gases de efeito estufa resultantes da queima de combustíveis fósseis. Esses gases retêm o calor na atmosfera, agravando o efeito estufa (BRASIL, 2023).

Além disso, segundo o site oficial das Nações Unidas, outros fatores consideráveis que contribuem para as mudanças climáticas incluem o desmatamento, o transporte urbano, a geração de energia, as indústrias, a agropecuária, bem como os aterros sanitários e lixões (BRASIL, 2023). Essas atividades humanas têm um impacto considerável nas transformações do clima global e na aceleração das transformações no planeta.

A última década tem sido caracterizada como a mais quente já registrada, com um aumento nas temperaturas globais de 1,1 °C em comparação com o final do século XIX (BRASIL, 2023). Alarmantemente, se as tendências atuais persistirem e as ações humanas não se alterarem significativamente, prevê-se que até o final do século as temperaturas globais possam aumentar em até 3,2 °C (BRASIL, 2023). Tais mudanças significativas no clima global têm o potencial de desencadear uma série de consequências graves para a humanidade.

Essas transformações climáticas consideráveis podem incluir o aumento das temperaturas médias, o derretimento das calotas polares com o consequente aumento do nível do mar, ameaçando a existência de cidades costeiras, mudanças nos ecossistemas da fauna e flora, dificultando

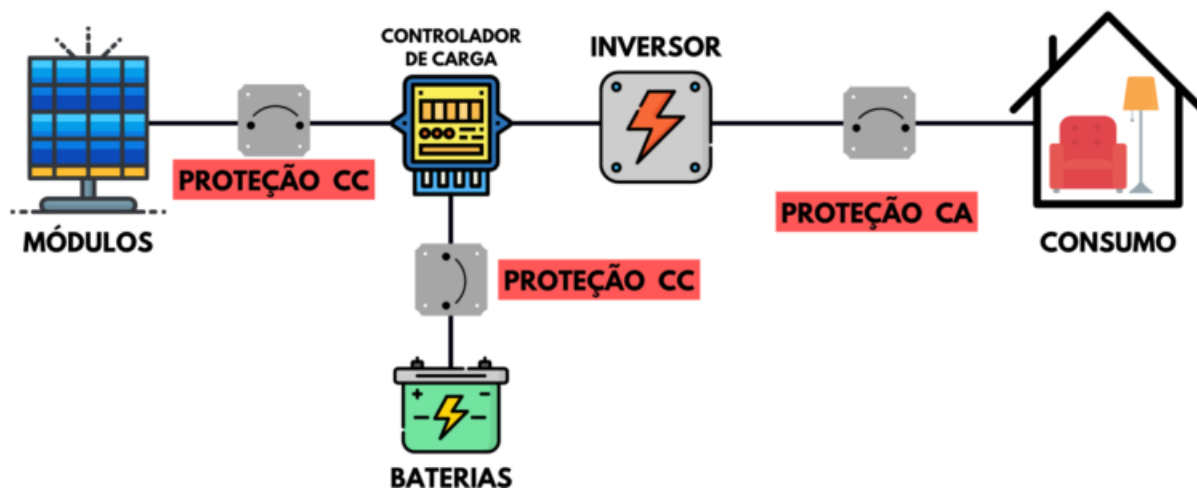
dades significativas na agricultura e agropecuária devido a alterações nos padrões climáticos, bem como a ocorrência de eventos climáticos extremos cada vez mais frequentes (RAÍZEN, 2022). Tais desafios destacam a urgência de medidas significativas e políticas de mitigação para enfrentar os impactos das mudanças climáticas no cenário global.

2.3 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Quando se trata de sistemas fotovoltaicos, existem três tipos: os conectados à rede elétrica, conhecidos como *on-grid*, os que não são conectados à rede, que possuem um sistema de armazenamento de energia por baterias, conhecidos como *off-grid*, e os híbridos, que são sistemas que são conectados à rede e também possuem um sistema de armazenamento de energia por baterias.

O sistema fotovoltaico *off-grid* é composto pela conexão entre painéis fotovoltaicos, controladores de carga, baterias e inversores.

Figura 2.2. Modelo Sistema Fotovoltaico *Off-Grid* - Fonte: Energês



2.3.1 Módulos fotovoltaicos

Os módulos fotovoltaicos são dispositivos compostos por elementos conhecidos como células fotovoltaicas, que são compostas por materiais semicondutores, como o silício. Esses painéis absorvem a luz solar e a transformam em energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico, que é caracterizado pela geração de uma corrente elétrica em um material semicondutor quando o

mesmo é exposto à luz, no caso o Sol. De forma mais aprofundada, o processo de geração da corrente elétrica ocorre quando os fótons da energia luminosa interagem com o material dos painéis fotovoltaicos, fazendo com que os elétrons presentes no material se movimentem e gerem a corrente elétrica (PERUZZO; JUNIOR, s.d.).

Existem diferentes tipos de painéis fotovoltaicos, sendo os mais utilizados atualmente os de silício, tanto os monocristalinos quanto os policristalinos. Os painéis monocristalinos possuem maior eficiência, em torno de 15% a 22%, maior qualidade e durabilidade, geralmente com garantia de 25 anos. Este tipo de painel é composto por uma malha fina de silício de, aproximadamente, 0,4 mm² a 0,5 mm² de espessura (INOVE, 2023).

Já os painéis policristalinos possuem menor eficiência, cerca de 14% a 20%, mas são menos dispendiosos e geram menos resíduos provenientes do corte do silício. As células fotovoltaicas desses tipos de módulos são compostos por blocos de silício fundidos em moldes especiais e fatiados em células (INOVE, 2023).

2.3.2 Controladores de carga

O controlador de carga, tem como função preservar o bom funcionamento das baterias em sistemas fotovoltaicos autônomos (*off-grid*), controlando a tensão que entra na bateria, evitando sobrecargas, descargas repentinas, curtos-circuitos e problemas com superaquecimento, entre outros. Este componente funciona gerando uma corrente de alimentação superior à descarga automática do sistema (SOLAR, s.d.b). Existem dois tipos principais de controladores de carga: o PWM e o MPPT.

O PWM (*Pulse Width Modulation*), que significa modulação por largura de pulso, controla o carregamento das baterias por meio de pulsos de alta frequência, esse tipo de controlador costuma possuir um custo menor, porém costuma ser menos eficiente. Já o controlador de carga do tipo MPPT (*Maximum Power Point Tracking*), que significa rastreamento do ponto de máxima potência, funciona de forma a procurar a todo momento o ponto de máxima potência do módulo fotovoltaico, com o objetivo de não perder energia no momento do carregamento do banco de baterias e diminuir as perdas do sistema, esse modelo de controlador costuma ter um custo mais elevado, porém apresenta uma maior eficiência.

2.3.3 Baterias

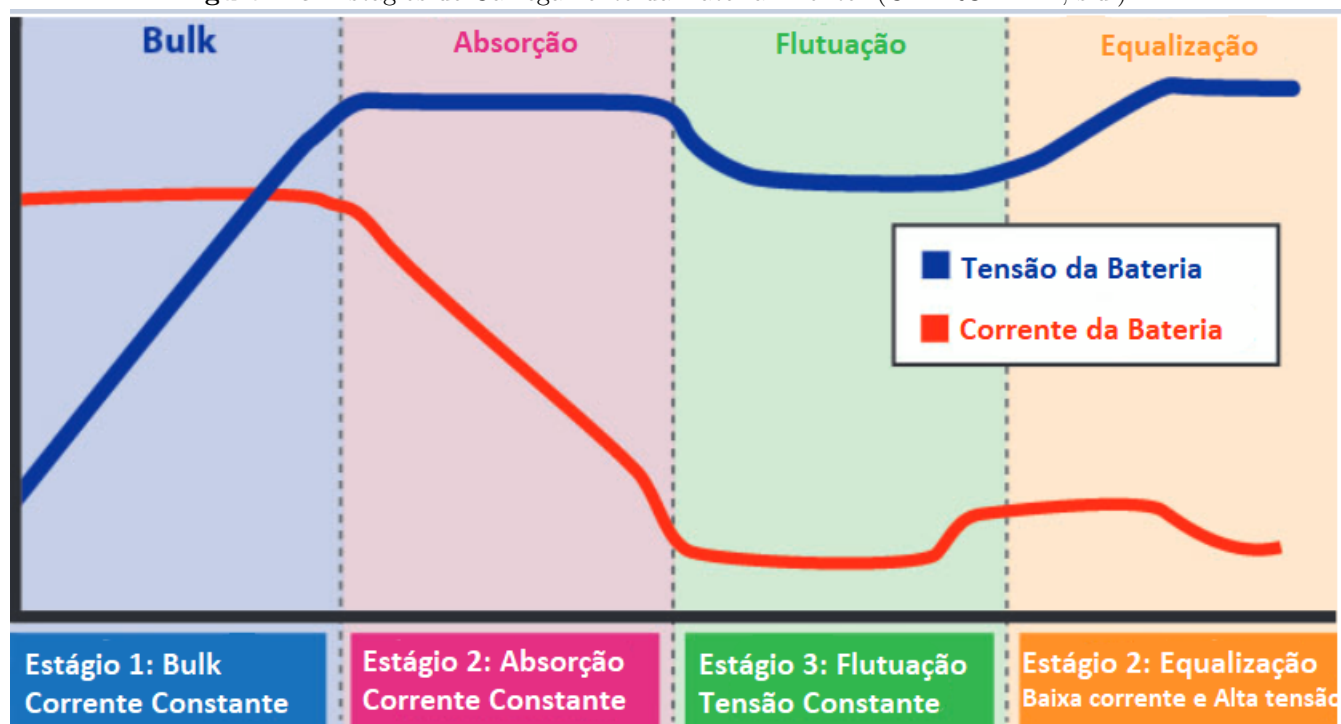
As baterias são equipamentos de armazenamento de energia, são essenciais por possibilitarem a instalação de sistemas fotovoltaicos *off-grid*. No caso de sistemas isolados, o dimensionamento das baterias deve ser feito para suportar toda a demanda das cargas instaladas. Já em sistemas fotovoltaicos híbridos, o banco de baterias funciona como um recurso de contingência quando a rede elétrica deixa de fornecer energia (SOLAR, s.d.a).

2.3.3.1 Estágios do carregamento de baterias

O carregamento de baterias, para sistemas fotovoltaicos *off-grid*, é um processo complexo, que tem como objetivo alcançar a maior eficácia possível da bateria. E existem diversos estudos recorrentes para aprimorar cada vez mais a eficiência das baterias. Para aumentar a sua vida útil, existem 4 etapas para o carregamento (ENERGIA, 2018). Sendo essas:

- Etapa *Bulk*: Com o objetivo de alcançar até 90% do carregamento da bateria essa etapa se trata do primeiro impulso de carregamento do componente. Nesse momento, o regulador de potência é acionado somente em caso de sobrecarga.
- Etapa de absorção: Essa etapa tem como objetivo manter a tensão obtida na etapa *Bulk*. Nesse momento a intensidade de carregamento diminui progressivamente até completar a carga.
- Etapa de equalização: Entende-se que aqui as células da bateria devem estar com a mesma tensão, ao igualar o nível de gás do eletrólito das partes inferiores e superior do dispositivo.
- Etapa de flutuação: Última fase no carregamento, mantendo a carga completa durante o uso.

Figura 2.3. Estágios de Carregamento da Bateria - Fonte: (CHARGETEK, s.d.)



2.3.4 Inversores

Os inversores têm como função converter a corrente contínua (CC) gerada nos painéis fotovoltaicos em corrente alternada (CA) (SOLAR, s.d.c). Existem diferentes tipos de inversores solares, como o *on-grid*, que interage com a corrente alternada da rede elétrica e injeta energia na rede. O *off-grid*, que fornece energia diretamente para as cargas elétricas, retirando energia dos painéis fotovoltaicos ou do banco de baterias. E, o híbrido, que pode ser utilizado em sistemas isolados ou conectados à rede. Observa-se que este tipo possui um custo mais elevado (MIRANDA, 2022).

2.4 IMPACTOS SOCIAIS, AMBIENTAIS E FINANCEIROS DA UTILIZAÇÃO DO DIESEL

De acordo com uma pesquisa realizada em 2021 pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a matriz energética brasileira é majoritariamente composta por fontes não renováveis. Cerca de 34,4% da matriz é composta por petróleo e seus derivados (SOARES *et al.*, 2020).

Essa predominância de fontes não renováveis na matriz energética representa um fator extremamente negativo, uma vez que os combustíveis não renováveis são uma das principais fontes de emissão de gases de efeito estufa. De acordo com uma reportagem publicada em 2022 pelo *World Wide Fund for Nature* (WWF), a extração de petróleo é a segunda atividade que mais emite gases de efeito estufa. Além disso, a extração desse tipo de combustível acarreta impactos significativos no solo, na água e no ar, afetando diversos habitats e seres vivos (WWF-BRASIL, 2022). Tragédias ambientais, como o derramamento de petróleo ocorrido em 2019 no Brasil, que impactou 130 municípios em 11 estados no Nordeste e Sudeste, foram documentadas em relatório disponibilizado pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente (IBAMA) (LEITE, s.d.).

O óleo diesel é um combustível fóssil proveniente do refinamento do petróleo, além de estar atrelado a diversos efeitos negativos relacionados a impactos ao meio ambiente, para comunidades que não possuem acesso à energia elétrica convencional, o diesel é a única fonte de energia. Porém, para essas comunidades localizadas em lugares de difícil acesso e com poucos recursos financeiros, o diesel acaba se tornando um elemento necessário, mas muito difícil de ser obtido.

Uma iniciativa promovida em parceria com o Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio) em 2017 revelou que a falta de acesso ao diesel afeta diretamente a educação das crianças e adolescentes nessas comunidades. Segundo relatos de líderes comunitários, em muitas ocasiões as crianças ficam sem aulas por até três dias devido à escassez de combustível (BRASIL, 2017).

2.5 PROGRAMAS GOVERNAMENTAIS

Existem alguns programas governamentais que têm como objetivo levar sistemas fotovoltaicos para regiões remotas não conectadas ao Sistema Interligado Nacional (SIN). Dois dos principais exemplos são o programa Luz para Todos e o Mais Luz para a Amazônia.

2.5.1 Luz para todos

O programa Luz para Todos foi iniciado em novembro de 2003 pelo Ministério de Minas e Energia (MME) com o propósito de fornecer acesso à energia elétrica para domicílios rurais identificados pelo IBGE que não possuíam energia elétrica até 2008. O censo publicado na época abarcou cerca de dois milhões de domicílios na situação de exclusão energética. Porém o programa enfrentou desafios, pois foi identificada uma quantidade maior de domicílios sem energia do que o inicialmente previsto no censo. Por essa razão, o programa foi prorrogado várias vezes, até o ano de 2022. Estima-se que mais de 16 milhões de brasileiros tenham sido beneficiados pelo programa, especialmente nas regiões Norte e Nordeste do país (ENERGIA, 2021).

Conforme divulgado pela Agência Gov, portal de notícias governamentais do governo federal, está previsto um investimento de aproximadamente 2,5 bilhões de reais no programa "Mais Luz para Todos" para o ano de 2024. Esse investimento será direcionado à implementação de novos sistemas fotovoltaicos, com o objetivo de viabilizar o acesso à energia elétrica para 78.752 residências (GOV, 2023).

Para garantir a padronização das instalações dos sistemas fotovoltaicos, o programa estabeleceu algumas regras e premissas. O manual do programa abrange aspectos como especificações dos módulos fotovoltaicos, inversores e outros componentes do sistema, a fim de garantir a qualidade e a eficiência das instalações (ENERGIA, 2017).

2.5.1.1 Especificações para módulos fotovoltaicos

O manual do programa Luz para Todos apresenta as especificações dos módulos fotovoltaicos a serem utilizados. Essas informações podem ser consultadas na Tabela II.1 a página 61 do manual (ENERGIA, 2017).

2.5.1.2 Especificações dos inversores

Em relação aos inversores, o manual estabelece critérios específicos. Eles devem apresentar uma eficiência superior a 85% e a potência nominal deve estar dentro da faixa de 50% a

100%. Além disso, o manual descreve características necessárias, como alta confiabilidade, baixa necessidade de manutenção, boa regulação de tensão de saída, baixa emissão de interferência eletromagnética, segurança para pessoas e instalações, entre outros requisitos. Informações complementares podem ser encontradas na Tabela II.4 na página 65 do manual.

2.5.1.3 Especificações dos controladores de carga

As especificações dos controladores de carga utilizados no programa são detalhadas no manual, fornecendo informações sobre características como eficiência e funções específicas para garantir o funcionamento efetivo do componente, estas estão disponíveis na Tabela II.3 na página 64 do manual (ENERGIA, 2017).

2.5.1.4 Especificações das baterias

O manual também apresenta uma variedade de opções de baterias, acompanhadas de suas vantagens e desvantagens. Considerando o contexto de regiões remotas de difícil acesso, é fundamental avaliar o desempenho e as necessidades de manutenção de cada tipo de bateria. Mais detalhes sobre as especificações podem ser consultados na Tabela II.5 na página 66 do manual (ENERGIA, 2017).

2.5.2 Mais luz para a Amazônia

O programa Mais Luz para a Amazônia, iniciado em 2020 pelo Ministério de Minas e Energia (MME), tem como principal objetivo fornecer energia elétrica para populações de regiões remotas da Amazônia Legal. O programa abrange tanto a parcela da população que não possui acesso ao serviço público de energia elétrica quanto aquela que não possui fontes de energia renovável.

Dentro do programa, são consideradas diferentes fontes de geração de energia, como solar, eólica, hídrica e biomassa. O foco é utilizar a tecnologia que melhor aproveite o potencial energético da região, buscando garantir a sustentabilidade e a eficiência dos sistemas fotovoltaicos instalados nessas áreas (ENERGIA, 2020).

2.6 AVANÇOS DA FOTOVOLTAICA *OFF-GRID*

Cada vez mais novos projetos de fotovoltaica *off-grid* vem sendo implementados, por se tratar de uma solução sustentável, possível de ser implementada em comunidades isoladas que não possuem acesso à energia elétrica convencional.

O Brasil abriga um grande potencial de geração de energia solar fotovoltaica. Segundo o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), mesmo nas regiões menos ensolaradas do país, é possível gerar mais eletricidade do que nas regiões mais ensolaradas da Alemanha (INPE, 2017).

Um indicativo desse avanço é a expansão da capacidade instalada na matriz elétrica brasileira durante o período de janeiro a agosto de 2023, que totalizou 7 gigawatts (GW). Desse acréscimo, 3 GW foram provenientes de fontes de energia solar, representando um marco importante no setor de energia renovável. Vale ressaltar que essa expansão não abrange sistemas de micro e minigeração distribuída, que englobam a instalação de painéis solares em residências, estabelecimentos comerciais e fábricas (ENERGIA, 2023).

Esse crescimento considerável na capacidade de geração de energia solar fotovoltaica demonstra o compromisso do Brasil em ampliar sua presença no cenário de energias renováveis, aproveitando seu enorme potencial solar e contribuindo para a transição para uma matriz energética cada vez mais sustentável.

Desde a descoberta da energia solar pelo físico Alexandre Edmond Becquerel em 1839, houve avanços significativos. Em 1883, Charles Fritts produziu a primeira célula fotovoltaica em estado sólido de selênio, que tinha uma eficiência de conversão de apenas 1%. No entanto, ao longo dos anos, a ciência avançou, e em 1954, foi produzida a primeira célula fotovoltaica de silício com eficiência de 6%. Em 2004, foram fabricadas células com eficiência de cerca de 24,7% (BRASIL, s.d.). E em 2022, pesquisadores do Instituto de Pesquisa de Helmholtz (HZB) desenvolveram um novo tipo de célula solar com uma eficiência impressionante de 32,5% (BADRA, 2022b).

No entanto, o armazenamento de energia ainda é um desafio para o avanço de sistemas fotovoltaicos *off-grid*, devido à falta de compreensão sobre o comportamento das dinâmicas químicas dos materiais das baterias em condições operacionais. Na última década, a inteligên-

cia artificial tem sido amplamente utilizada para coletar informações sobre materiais e tem sido aplicada no desenvolvimento de dispositivos, incluindo baterias de íons alcalinos e outras aplicações semelhantes. Portanto, acredita-se que o *design* de materiais orientado por computação pode reduzir significativamente o tempo e o custo do desenvolvimento de componentes, desempenhando um papel crucial no desenvolvimento de baterias de próxima geração (BARRETT; HARUNA, 2020).

A energia solar off-grid, além de proporcionar uma melhoria significativa na qualidade de vida das comunidades sem acesso à eletricidade convencional, é um dos maiores geradores de empregos no setor de energias renováveis em todo o mundo. A Agência Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR) prevê que a instalação de cada megawatt (MW) de capacidade gera entre 25 e 30 empregos diretos, abrangendo áreas como instalação, fabricação, vendas, distribuição e desenvolvimento de projetos, entre outras.

Essa geração de empregos não apenas estimula a economia local, mas também aumenta a renda e o poder de compra nas comunidades atendidas. Entretanto, um estudo publicado pela Fundação Estadual do Meio Ambiente em 2015 destaca que a implementação da energia solar pode resultar em alguns impactos socioeconômicos e ambientais. Entre os aspectos positivos citados pelo estudo, observa-se o crescimento do mercado local, uma melhoria na confiabilidade do fornecimento de energia elétrica e um aumento na segurança geral.

Por outro lado, esses benefícios podem estar acompanhados de desafios, como um possível aumento da tributação, um aumento no tráfego de veículos e um consumo excessivo de materiais, o que poderia levar à escassez em algum momento. Além disso, a instalação de sistemas solares pode ter impactos ambientais, incluindo a fuga de biodiversidade, perda de vegetação e a geração de resíduos sólidos. No entanto, vale ressaltar que, no geral, a energia solar fotovoltaica continua sendo uma solução sustentável e viável, pois não emite poluentes durante sua operação (FILHO *et al.*, 2015).

No cenário atual, marcado por avanços notáveis na energia fotovoltaica, a política exerce um papel crucial na promoção desse tipo de geração de energia. Conforme observado em um estudo conduzido por Rutelly Marques da Silva em 2015, diversas iniciativas governamentais desempenham um papel fundamental na implementação desse tipo de solução. Entre essas iniciativas, destacam-se a venda direta de energia para os consumidores, descontos nas tarifas de uso dos

sistemas de transmissão (TUST) e nas tarifas de uso dos sistemas de distribuição (TUSD), o Sistema de Compensação de Energia Elétrica para a Microgeração e Minigeração Distribuídas, o Regime Especial de Incentivos para o Desenvolvimento da Infraestrutura (REIDI) e programas governamentais como "Luz para Todos" e "Mais Luz para a Amazônia".

Essas políticas são complementadas por condições diferenciadas de financiamento e outros incentivos, criando um ambiente propício para o crescimento da energia solar fotovoltaica e sua ampla adoção em todo o país (SILVA, 2015).

2.7 TRABALHOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS *OFF-GRID* PARA REGIÕES REMOTAS

Diversos estudos vêm sendo conduzidos com foco em sistemas fotovoltaicos *off-grid* para regiões remotas sem acesso à energia elétrica convencional. No estudo conduzido por Docentes e discentes da Universidade Nilton Lins, foi desenvolvido um protótipo de um Sistema de Geração Individual como Fonte Intermitente (SIGIF) para atender às necessidades de uma comunidade ribeirinha situada na cidade de Manacapuru, no estado do Amazonas. Até o início do estudo, essa comunidade dependia de motores movidos a diesel, que forneciam eletricidade por apenas quatro horas diárias. O propósito do projeto era introduzir um sistema mais confiável e sustentável, possibilitando um desenvolvimento econômico mais sólido na comunidade.

Como resultado do projeto, o protótipo demonstrou a viabilidade de fornecer ininterruptamente oito horas de eletricidade à comunidade com a instalação de um sistema fotovoltaico *off-grid*. Embora isso represente apenas um terço do dia, para os moradores da comunidade, a implementação bem-sucedida desse projeto poderia ter um impacto profundamente positivo na qualidade de vida das pessoas locais (JUNIOR *et al.*, 2021).

Um estudo conduzido por acadêmicos da Faculdade Integrada Carajás, investiga as vantagens e desvantagens associadas à implementação de sistemas fotovoltaicos *off-grid* em comunidades de difícil acesso. Nestes locais, a distribuição de energia elétrica pelas concessionárias se torna inviável tanto do ponto de vista técnico quanto financeiro. A análise abarca onze artigos, com o intuito de fornecer uma visão abrangente sobre o assunto.

Dentre as vantagens destacadas na pesquisa, destaca-se a capacidade dos sistemas fotovoltaicos

cos *off-grid* de armazenar energia em baterias para uso durante períodos de escassez de luz solar, como à noite. Adicionalmente, a ausência de despesas com combustíveis fósseis torna-se um atrativo evidente. Além disso, esses sistemas demonstram uma confiabilidade superior quando comparados aos sistemas movidos a diesel frequentemente utilizados nessas comunidades.

No entanto, como contrapartida, observam-se desafios a serem superados. O custo inicial da instalação é substancial e exige um investimento considerável. Além disso, a necessidade de substituição das baterias a cada cinco anos acrescenta complexidade e custos operacionais.

Ao concluir o estudo, os autores ressaltam a indispensabilidade do sistema *off-grid* em termos de viabilidade para áreas rurais. "Visto que as concessionárias de energia não estão dispostas a arcar com os custos de instalação de redes de distribuição para áreas com pouca demanda."(SILVA *et al.*, 2022). Apesar de existir um investimento inicial significativo, os pesquisadores propõem o aprimoramento das tecnologias existentes, visando tornar os sistemas mais acessíveis e, assim, garantir um acesso mais democrático a essa parcela da população.

Inúmeras iniciativas e projetos estão atualmente direcionados à implantação de sistemas fotovoltaicos *off-grid* em comunidades remotas, com o objetivo principal de proporcionar uma melhoria na qualidade de vida para essa parcela da população. Muitas dessas ações são conduzidas por entidades governamentais.

Um exemplo interessante foi a parceria entre a Eletrobras e o governo, que resultou em projetos significativos. Em 2011, a Eletrobras colaborou na implementação de 12 miniusinas em seis estados da região amazônica, beneficiando 222 residências (ELETROBRAS, 2017).

Outro projeto relevante foi o projeto-piloto de Araras, desenvolvido pela Celpa em conjunto com a Eletrobras e com o suporte do Instituto Interamericano de Cooperação para a Agricultura (IICA). Esse projeto beneficiou aproximadamente 80 unidades consumidoras na comunidade da ilha de Araras. De acordo com a Eletrobras, o sistema combina tecnologias fotovoltaicas e eólicas, com a geração a diesel como alternativa (ELETROBRAS, 2017).

Um terceiro exemplo notável foi o projeto-piloto de Xapuri, realizado pela Eletrobras Distribuição Acre em colaboração com a Eletrobras e com o apoio do governo do Acre. Este projeto, implantado em 2007, utilizou sistemas fotovoltaicos individuais para atender a cerca de 100 famílias (ELETROBRAS, 2017), estima-se que o investimento inicial foi de aproximadamente

R\$8.000 por unidade consumidora (ELETROBRAS, 2010).

Essas iniciativas enfatizam a importância do fornecimento de eletricidade a comunidades isoladas, destacando que tais iniciativas desempenham um papel fundamental no estímulo ao crescimento do país e na ampliação da inclusão social dos cidadãos.

2.8 ESTUDO SOBRE PERFIL DE CARGA EM ESCOLAS

Por a Escola Alacy Pena Vieira ser uma instituição que não está conectada à rede elétrica da concessionária estadual, ela não possui contas de energia elétrica. Com o propósito de viabilizar o projeto fotovoltaico *off-grid* para a escola, foi elaborado um estudo de caso focado nos perfis de consumo de energia em escolas. Esse estudo teve como objetivo principal estimar o padrão de consumo de energia na Escola Alacy Pena Vieira, para que fosse possível desenvolver o projeto de forma confiável.

2.8.1 Padrão de consumo no Centro de Ensino Médio 02 de Ceilândia

A primeira escola analisada foi a instituição Centro de Ensino Médio 02 de Ceilândia em Brasília no Distrito Federal, foram analisados os anos de 2018 até 2022. Os valores de consumo da instituição estão descritos na Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Tabela de consumo de energia em kWh por ano - Fonte: Neoenergia Brasília

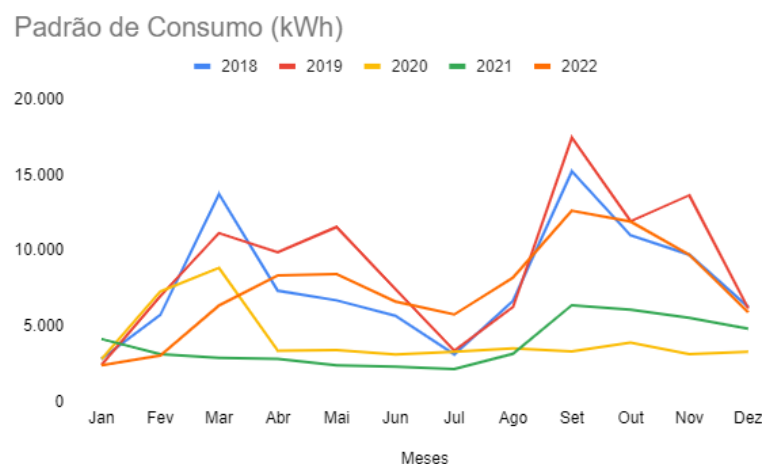
Consumo (kWh)					
Meses	2018	2019	2020	2021	2022
Jan	2.861	2.466	2.852	4.174	2.432
Fev	5.767	7.004	7.309	3.182	3.088
Mar	13.750	11.166	8.875	2.927	6.388
Abr	7.362	9.897	3.404	2.854	8.378
Mai	6.729	11.573	3.445	2.442	8.456
Jun	5.709	7.472	3.151	2.353	6.647
Jul	3.163	3.404	3.325	2.191	5.798
Ago	6.693	6.294	3.563	3.197	8.225
Set	15.254	17.475	3.358	6.401	12.649
Out	11.020	11.949	3.930	6.104	11.934
Nov	9.744	13.667	3.174	5.576	9.736
Dez	6.281	6.192	3.337	4.867	5.947
Total Anual	94.333	108.559	49.723	46.268	89.678

Por meio da análise do consumo mensal, é possível determinar a contribuição de cada mês para o consumo anual da instituição de ensino. A proporção de consumo de cada mês é apresentada na Tabela 2.2, fornecendo informações importantes sobre o padrão de consumo da instituição ao longo do ano.

Tabela 2.2. Tabela de % Consumo de Energia Mensal em Relação ao Total Anual - Fonte: Neoenergia Brasília

% Consumo Mensal/Consumo Total Anual					
Meses	2018	2019	2020	2021	2022
Jan	3%	2%	6%	9%	3%
Fev	6%	6%	15%	7%	3%
Mar	15%	10%	18%	6%	7%
Abr	8%	9%	7%	6%	9%
Mai	7%	11%	7%	5%	9%
Jun	6%	7%	6%	5%	7%
Jul	3%	3%	7%	5%	6%
Ago	7%	6%	7%	7%	9%
Set	16%	16%	7%	14%	14%
Out	12%	11%	8%	13%	13%
Nov	10%	13%	6%	12%	11%
Dez	7%	6%	7%	11%	7%

A partir dos dados apresentados na Tabela 2.2, é evidente que em todos os anos analisados o consumo de energia está concentrado nos meses que não coincidem com o período de férias escolares, abrangendo de fevereiro a junho e de agosto a novembro, esses meses representam, em média, 83% do consumo total. É importante ressaltar que nos anos de 2020 e 2021, o consumo de energia foi notavelmente inferior em comparação aos demais anos. Esse decréscimo significativo pode ser atribuído à pandemia de COVID-19, que resultou no fechamento das instituições de ensino e, conseqüentemente, na redução do consumo de energia durante esses anos. A análise desses dados permitiu a criação de um gráfico ilustrativo do padrão de consumo, apresentado na Figura 2.4.

Figura 2.4. Padrão de consumo do centro de ensino médio 02 de Ceilândia - Fonte: Autoria própria

2.8.2 Padrão de consumo em escolas públicas em Belo Horizonte

No âmbito deste trabalho de pesquisa, também foi abordado um estudo conduzido por uma discente da Faculdade Unileste em colaboração com a empresa CML *Energy*. O propósito deste estudo visava à otimização de custos e à redução do consumo de energia elétrica em escolas públicas localizadas na cidade de Belo Horizonte, no estado de Minas Gerais ((PITÁGORAS) *et al.*, 2012). Para alcançar esse objetivo, um levantamento foi realizado em nove instituições de ensino, com o intuito de compreender o padrão de consumo de energia ao longo do ano. O período abrangido por este estudo compreendeu o intervalo entre agosto de 2011 e setembro de 2012.

Os valores do consumo de energia de cada escola analisada, estão registrados na Tabela 2.3.

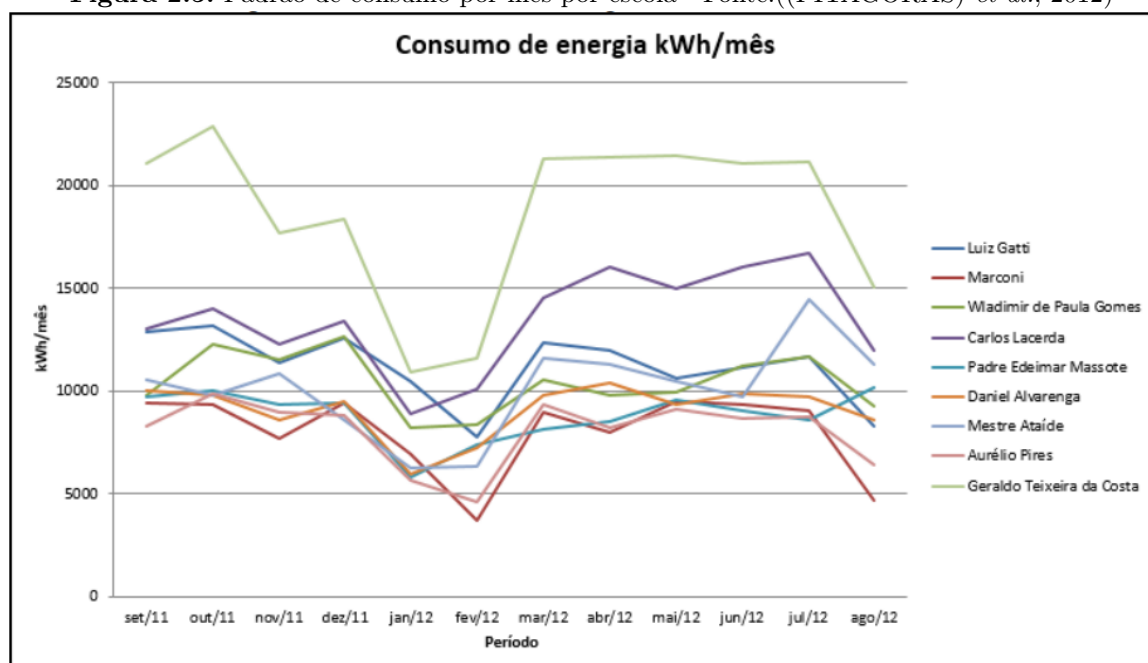
Tabela 2.3. Tabela de consumo de energia em escolas - Fonte:((PITÁGORAS) *et al.*, 2012)

Nome da Escola	Consumo kWh/ano
Escola Aurélio Pires	101.600
Escola Padre Edeimar Massote	105.880
Escola Prof. Daniel Alvarenga	108.814
Escola Marconi	113.200
Escola Mestre Ataíde	127.520
Escola Wladimir de Paula Gomes	133.537
Escola Luiz Gatti	145.720
Escola Gov. Carlos Lacerda	175.320
Escola Geraldo Teixeira da Costa	224.024

Os responsáveis pelo estudo aprofundaram a análise de consumo, examinando o comporta-

mento do consumo de energia mensalmente. Como ilustrado na Figura 2.5, o estudo menciona que o consumo registrado nos meses de janeiro e fevereiro corresponde ao consumo de dezembro e janeiro, respectivamente, e o consumo em agosto se refere ao mês de julho. A Figura demonstra claramente que, nos períodos de férias escolares regulares, há uma drástica redução no consumo de energia nas instituições, um fenômeno que também ocorreu no Centro de Ensino Médio 02 de Ceilândia, conforme evidenciado na Figura 2.4

Figura 2.5. Padrão de consumo por mês por escola - Fonte: ((PITÁGORAS) *et al.*, 2012)



A partir da pesquisa conduzida, desenvolveu-se uma estimativa de carga de consumo para a Escola Alacy Pena Vieira. As previsões para o consumo de carga por hora, considerando os dias da semana e feriados (dias úteis e não úteis) e mensal estão detalhadas no Capítulo 3, nas Tabelas 3.9 e 3.10, respectivamente.

2.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A revisão bibliográfica descreve que, no cenário atual, existem várias iniciativas voltadas para o desenvolvimento sustentável, destacando a importância dessas na mitigação dos impactos das mudanças climáticas e do aquecimento global, como exemplo são citados os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

É destacado, o crescente papel das soluções no campo das energias renováveis, com destaque para a energia fotovoltaica, que vem ganhando grande visibilidade e investimento. Nesse contexto, foram identificadas três modalidades de geração fotovoltaica: *on-grid*, integrada à rede elétrica, *off-grid*, que incorpora sistemas de armazenamento por meio de baterias, e sistemas híbridos, permitindo conexão à rede e uso de armazenamento.

No contexto de comunidades remotas sem acesso à rede elétrica convencional, foi observado o uso de geradores movidos a combustíveis fósseis, uma opção atrelada à diversos desafios, devido à dificuldade de acesso e ao alto custo dos combustíveis. Iniciativas governamentais como o Luz para Todos e o Mais Luz para a Amazônia buscam reverter esse quadro, promovendo a instalação de sistemas fotovoltaicos para melhorar as condições de vida nessas áreas.

A revisão também ressalta as pesquisas voltadas para a melhoria dos componentes dos sistemas fotovoltaicos *off-grid* e estudos específicos para implementações em regiões remotas. Destaca-se, ainda, um estudo de caso detalhado sobre o perfil de cargas em escolas, fornecendo informações importantes para o dimensionamento adequado do consumo da Escola Alacy Pena Vieira.

No próximo capítulo, será apresentada a Metodologia para o desenvolvimento de projetos fotovoltaicos *off-grid*, com foco no desenvolvimento do sistema fotovoltaico para a escola Alacy Pena Vieira.

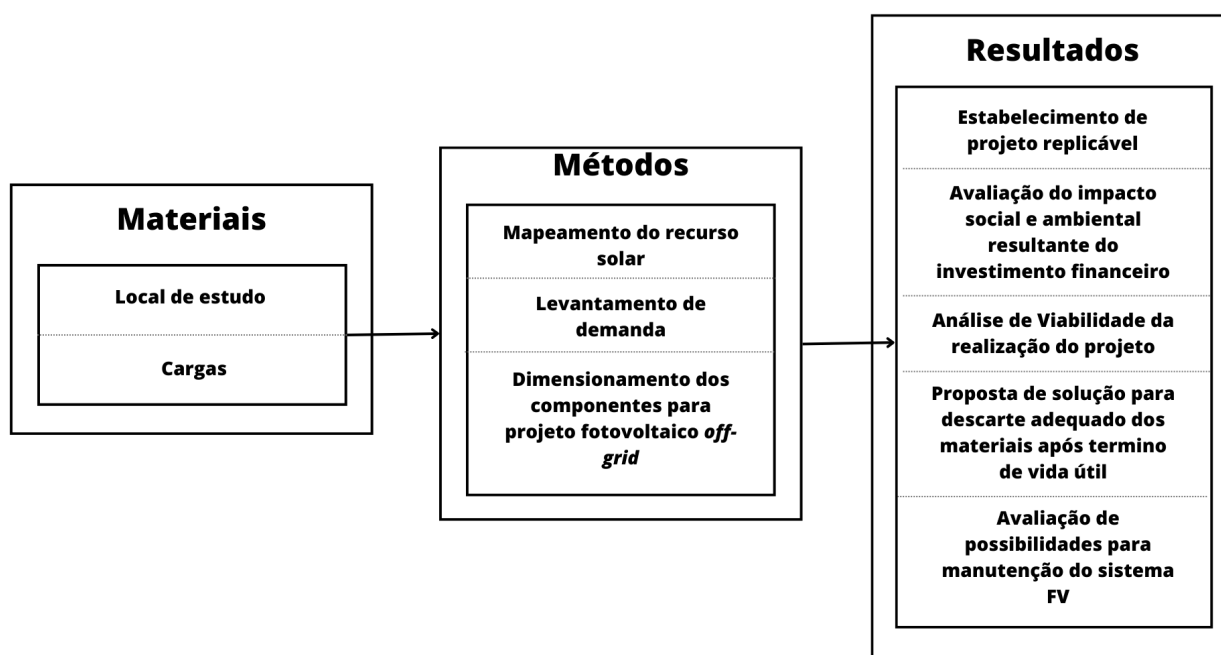
METODOLOGIA

Neste capítulo estão descritas as etapas para o desenvolvimento de um sistema fotovoltaico *off-grid*, considerando a parte teórica do processo, especificamente para a escola Alacy Pena Vieira, mas que também pode ser adaptado e replicado para outras instituições. O capítulo irá abranger o processo para a estimativa da carga da instituição, o processo teórico para o dimensionamento dos componentes do sistema fotovoltaico *off-grid* e para o dimensionamento dos disjuntores, fusíveis e condutores.

3.1 ESTRUTURA DO PROJETO

As etapas adotadas para a realização do projeto estão descritas no fluxograma apresentado na Figura 3.1, e serão detalhadas ao longo deste capítulo do trabalho.

Figura 3.1. Fluxograma do trabalho - Fonte: Autoria própria



3.2 MODELOS DOS DISPOSITIVOS UTILIZADOS

Um ponto importante que deve ser definido para que o sistema seja dimensionado de forma apropriada é o modelo dos dispositivos a serem utilizados. Nesta seção estão descritos os modelos, marcas e informações principais dos *datasheets* de cada um dos principais dispositivos.

3.2.1 Dados dos módulos fotovoltaicos

Para o projeto foi selecionado, o módulo fotovoltaico da marca SunNova Solar®), modelo SS-BG615-78MDH(T), o módulo tem potência de 615 W. Na Tabela 3.1 estão representados os dados do *datasheet* do módulo. Esses dados são de extrema importância para que o sistema seja dimensionado de forma apropriada.

Tabela 3.1. Especificações do módulo fotovoltaico - SunNova Solar®)- Fonte: (SUNNOVA, s.d.)

Característica	Valor
Modelo	SS-BG615-78MDH(T)
Potência máxima (Pmp) - STC (W)	615
Tensão em circuito aberto - Voc (V) - STC	54,9
Corrente de curto-circuito - Isc (A) - STC	14,01
Tensão de máxima potência - Vmp (V) - STC	46,54
Corrente de máxima potência - Imp (A) - STC	13,21
Eficiência do módulo - STC	22,00%
Coefficiente de temperatura (Pmáx)	-0,32%/°C
Coefficiente de temperatura (Voc)	-0,26%/°C
Coefficiente de temperatura (Isc)	0,046%/°C
Temperatura nominal de operação da célula	43 ± 2 °C
Área de um módulo	2,79 m ²

3.2.2 Dados das baterias

Para as baterias, foi escolhido o modelo UPLFP48-100 3U da marca Unipower®), que possui uma tensão nominal de 48 V. Essas e outras informações detalhadas podem ser encontradas na Tabela 3.2, que representa o *datasheet* do dispositivo.

Tabela 3.2. Especificações da bateria Unipower®- Fonte: (UNIPOWER, s.d.)

Característica	Valor
Modelo	UPLFP48-100 3U
Composição	Lítio Ferro Fosfato
Vida útil	12 anos
Tensão (V)	48
Capacidade C5 (Ah)	100
Energia (Wh)	5000
Corrente máxima de recarga (A)	100
Corrente máxima de descarga contínua (A)	100
Corrente máxima de descarga (A) - por 2 segundos	200
Eficiência de recarga	98%

3.2.3 Dados dos inversores

Para os inversores, foi escolhido o modelo PH30-10048-T Series da marca Must®, que possui uma potência nominal de 10 kW. Essas e outras informações detalhadas podem ser encontradas na Tabela 3.3, que representa o *datasheet* do dispositivo.

Tabela 3.3. Especificações do inversor - Must®- Fonte: (SYSTEM, s.d.)

Característica	Valor
Modelo	PH30-10048-T
Potência de saída(VA/W)	10000
Eficiência	90%
Tensão de entrada/tensão nominal da bateria (V_{CC})	48
Tensão de saída (V_{CA})	230 V(F/N)/400 V(F/F)
Tensão nominal (V_{CC})	48
Corrente máxima de carga CC (A) - por canal	60
Máxima corrente de carga AC (A) - por fase	60
Corrente máxima de carga (A) - por fase	120
Tensão de entrada CC (V_{CC}) - por canal	145
Tipo de baterias aceitas	Lítio e chumbo-ácido
Frequência nominal de saída (Hz)	50/60
Corrente máxima de entrada CA (A) - por fase	14,3

3.2.4 Dados dos condutores para os arranjos fotovoltaicos

Para a parte do sistema sujeita a altas temperaturas, a escolha de um condutor adequado é fundamental. Optou-se pelo modelo Afumex Solar, da marca *Prysmian Group*®, que é um condutor especialmente projetado para sistemas fotovoltaicos, fabricado de cobre estanhado e

que possui resistência a raios UV. As principais características desse condutor estão detalhadas na Tabela 3.4. Essas informações são essenciais para garantir a eficiência e a segurança da instalação em condições de temperaturas elevadas. Além dessas informações, no *datasheet* existe uma tabela de capacidade de condução de corrente para diferentes seções de condutores, que está descrita na Tabela 3.5.

Tabela 3.4. Especificações do condutor Prysmian Group®- Afumex Solar - Fonte: (GROUP, 2016)

Característica	Valor
Modelo	Afumex Solar
Material	Cobre estanhado
Forma	Flexível
Tipo de resistência	Resistente a raios UV
Temperatura ambiente	-40°C até 90°C
Temperatura máxima de operação	120°C por 20.000 h

Tabela 3.5. Capacidade de condução de corrente (A) para diferentes tamanhos de condutores - Fonte: (GROUP, 2016)

Temp. do condutor	90°C				120°C				
	Temp. do ambiente	30°C	40°C	50°C	60°C	30°C	40°C	50°C	60°C
4 mm ²		53	48	56	51	48	42	52	46
6 mm ²		68	61	71	65	61	53	66	59
10 mm ²		95	85	99	90	85	74	91	81
16 mm ²		125	112	131	120	112	97	120	107

3.3 DETERMINAÇÃO DA LOCALIZAÇÃO

O processo de escolha de um local para a realização do projeto foi determinado pela ausência de um sistema de energia elétrica convencional. De acordo com dados do censo demográfico de 2022 do INEP (Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira) a escola Alacy Pena Vieira localizada na Ilha Pucu, em Limoeiro do Ajuru no estado do Pará é abastecida por meio de um gerador movido a diesel (EDU, 2022).

3.4 AVALIAÇÃO DO RECURSO SOLAR

A primeira etapa a ser seguida é a avaliação do recurso solar, para garantir que os componentes do sistema sejam dimensionados adequadamente de acordo com as necessidades do edifício.

Portanto, foi necessário obter as coordenadas geográficas da escola utilizada como usada como referência para o estudo de caso. Identificou-se que as coordenadas são -1,831527129311858, -49,65838369779372 (MAPS, 2023). Com essas informações, foi possível determinar os dados de irradiação solar na região utilizando o software disponível no site do CRESESB (CRESESB, 2018), conforme apresentado na Tabela 3.6.

Tabela 3.6. Recurso solar - Fonte: (CRESESB, 2018)

Cálculo no Plano Inclinado

Estação: Limoeiro do Ajuru
Município: Limoeiro do Ajuru , PA - BRASIL
Latitude: 1,801° S
Longitude: 49,649° O
Distância do ponto de ref. (1,831° s; 49,658° O) :3,5 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]												Média	Delta
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
<input checked="" type="checkbox"/>	Plano Horizontal	0° N	4,71	4,71	4,89	4,80	5,01	5,09	5,17	5,36	5,68	5,59	5,46	5,05	5,13	,98
<input checked="" type="checkbox"/>	Ângulo igual a latitude	2° N	4,65	4,68	4,89	4,83	5,08	5,17	5,25	5,41	5,69	5,56	5,39	4,98	5,13	1,04
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior média anual	3° N	4,62	4,66	4,88	4,84	5,11	5,21	5,29	5,43	5,70	5,54	5,36	4,94	5,13	1,08
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior mínimo mensal	3° S	4,79	4,75	4,89	4,75	4,91	4,95	5,05	5,28	5,66	5,63	5,54	5,15	5,11	,91

Com base nos dados de irradiação solar, é possível calcular o número de Horas de Sol Pleno (HSP), que representa o número de horas em que a irradiância solar se mantém constante em 1 kW/m².

Conforme mostrado na Figura 3.6, o valor médio de irradiação solar é de 5,13 kWh/m².dia. Portanto, o valor das Horas de Sol Pleno (HSP) é de 5,13 h/dia.

3.5 LEVANTAMENTO DE DEMANDA E DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA

Para realizar o levantamento da carga instalada na escola, foi necessário mapear todos os materiais utilizados diariamente e a estrutura da escola tratada no projeto. Com base no censo de 2022 do INEP, a escola possui a seguinte infraestrutura: alimentação escolar para os alunos, água filtrada, água do rio, energia de gerador, fossa, lixo destinado à queima, acesso à internet e diversos espaços, como oito salas de aula, sala de diretoria, cozinha, sala de secretaria, despensa, pátio coberto e equipamentos como impressora (EDU, 2022).

Os dados fornecidos pelo censo são concisos, portanto, algumas suposições foram feitas, para evitar subdimensionamento do sistema, quanto à quantidade pontos de luz, quantidade de tomadas de uso geral (TUG) e de tomadas de uso específico (TUE), foram definidas de acordo

com a seção 9.5.2.1.2 da NBR 5410 (Norma Brasileira) (ABNT, 2004).

Devido à falta de informações sobre os tamanhos dos espaços, uma estimativa foi feita com base nas informações de infraestrutura do censo do INEP e com base na área calculada a partir da vista superior da escola, conforme mostrado na Figura 3.2 e na Figura 3.3

Figura 3.2. Vista superior 1 da escola Alacy Pena Vieira - Fonte: (MAPS, 2023)

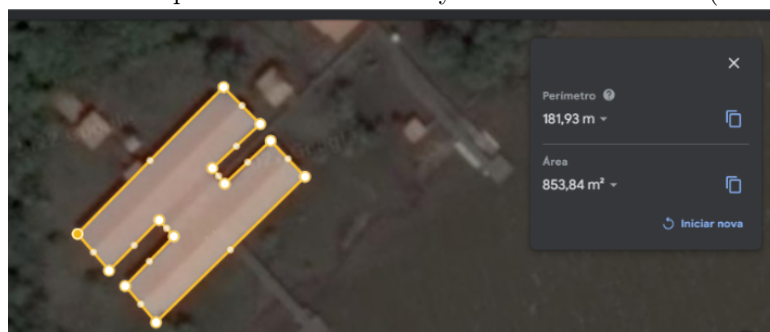


Figura 3.3. Vista superior 2 da escola Alacy Pena Vieira - Fonte: (MAPS, 2023)



Desta forma, o dimensionamento das cargas foi realizado em uma planilha no *software Google Sheets*®. O levantamento de carga considerou a quantidade e potência dos dispositivos. A Tabela 3.7 apresenta o dimensionamento realizado. Na tabela os valores em verde representam o subtotal de potência ativa, em W, os valores em azul representam o subtotal de potência aparente, em VA, o valor em amarelo representa a potência ativa total, em W e o valor em vermelho representa a potência aparente total, em VA.

Com as cargas da escola dimensionadas, aplica-se o fator de demanda à carga instalada em kW, que como estabelecido na Tabela 3.7 é de 50,775 kW. Neste valor estão abarcados os valores de carga instalada de tomadas de uso geral, tomadas de uso específico e pontos de iluminação. Além disso, aplica-se o fator de simultaneidade às bombas d'água presentes na escola.

Para calcular a demanda total do sistema é necessário considerar as subdemandas, que incluem:

- Subdemanda A - Demanda das potências de iluminação e tomada de uso geral;
- Subdemanda B - Demanda máxima dos equipamentos de aquecimento e ar-condicionado;
- Subdemanda C - Demanda máxima de potência solicitada por motores e máquinas de solda do tipo motor-gerador;
- Subdemanda D - Demanda máxima de potência solicitada por máquinas de solda a transformador e aparelhos de raio-x.

No contexto analisado, a subdemanda A será empregada para as cargas provenientes de pontos de iluminação e pontos de tomadas. A determinação do fator de demanda associado à subdemanda A baseou-se na consulta à Tabela 5 da Norma Técnica de Distribuição 6.01, conforme representado na Tabela 3.8. Para uma carga instalada de 50,775 kW, foi aplicado um fator de demanda de 0,24. Este valor é utilizado quando a carga instalada é superior à 10 kW.

Tabela 3.8. Tabela 5 - Fator de demanda - Subdemanda A - Fonte: NTD 6.01, 2004

Carga instalada (kW)	Fator de demanda (FD)
$C \leq 1$	0,86
$1 < C \leq 2$	0,75
$2 < C \leq 3$	0,66
$3 < C \leq 4$	0,59
$4 < C \leq 5$	0,52
$5 < C \leq 6$	0,45
$6 < C \leq 7$	0,4
$7 < C \leq 8$	0,35
$8 < C \leq 9$	0,31
$9 < C \leq 10$	0,27
$C > 10$	0,24

Conseqüentemente, para determinar o valor da demanda total das cargas englobadas pela

subdemanda A, realiza-se a multiplicação da potência aparente pelo respectivo fator de demanda, conforme ilustrado pela Equação 3.1.

$$\text{Demanda total - Subdemanda A} = 57.372,83 \times 0,24 = 13.769,479 \text{ VA} \quad (3.1)$$

As bombas de água da escola são avaliadas com base na Tabela 08 da NTD 6.01 para a determinação do fator de simultaneidade para motores. Conforme a tabela, para dois dispositivos, cada um com até 2,5 cv, aplica-se um fator de simultaneidade de 0,85. O cálculo da demanda total é delineado na norma e é expresso pela Equação 3.2.

$$\text{Demanda Total} = n^{\circ} \text{ de motores} \times P(\text{kVA}) \times F_s = 2 \times 614 \times 0,85 = 1.043,48 \text{ VA} \quad (3.2)$$

Para obter a demanda total, somam-se os valores das Equações 3.1 e 3.2. Assim, a demanda total do sistema resulta em 14.812,96 VA.

3.6 CÁLCULO DE ENERGIA CONSUMIDA MENSALMENTE

Para estimar a energia consumida mensalmente em Quilowatt-hora (kWh), realizou-se um estudo sobre o padrão de consumo em escolas, descrito no Capítulo 2. Foi realizada uma análise do nível de consumo, levando em conta fatores como períodos de férias escolares e horários noturnos.

Com base nessas informações, estabeleceu-se um padrão por horário do dia, para dias úteis e para dias não úteis, como feriados e finais de semana, e mês, os valores definidos estão descritos nas Tabelas 3.9 e 3.10, respectivamente. Nessas tabelas, está sendo considerado um valor total de consumo possível máximo de 100%.

Tabela 3.9. Utilização de demanda durante os tipos de dias - Fonte: Autoria própria

Horário do dia	Utilização de demanda dia útil	Utilização de demanda dia não útil
06:00:00	40%	8%
07:00:00	40%	8%
08:00:00	80%	16%
09:00:00	80%	16%
10:00:00	80%	16%
11:00:00	80%	16%
12:00:00	50%	10%
13:00:00	50%	10%
14:00:00	80%	16%
15:00:00	80%	16%
16:00:00	80%	16%
17:00:00	80%	16%
18:00:00	80%	16%
19:00:00	60%	12%
20:00:00	50%	10%
21:00:00	40%	8%
22:00:00	40%	8%
23:00:00	40%	8%
00:00:00	40%	8%
01:00:00	40%	8%
02:00:00	40%	8%
03:00:00	40%	8%
04:00:00	40%	8%
05:00:00	40%	8%

Tabela 3.10. Tabela de porcentagem de utilização de demanda mensal - Fonte: Autoria própria

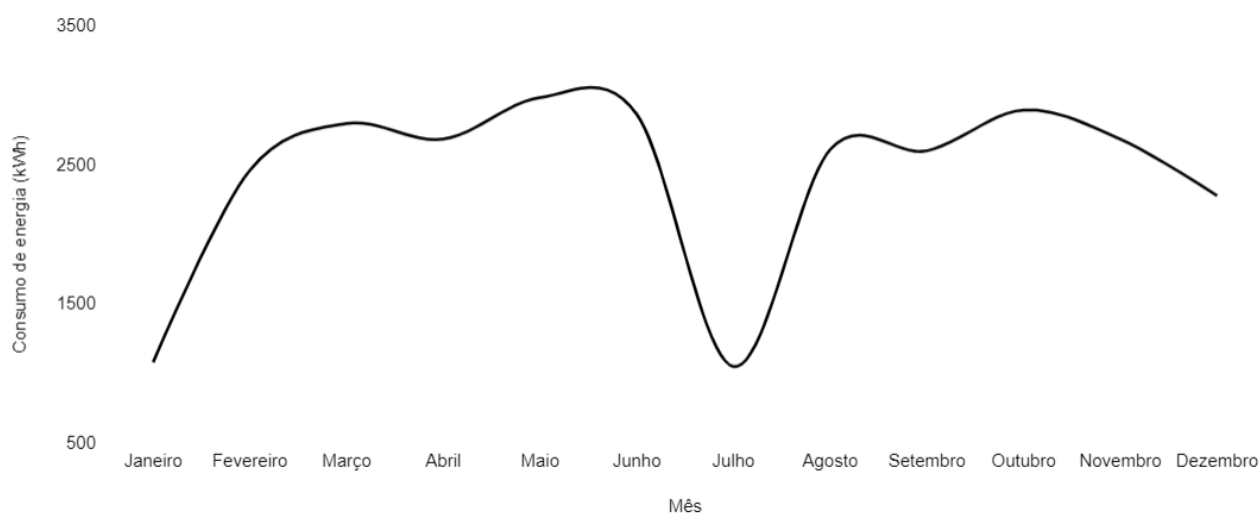
Mês	Porcentagem de Utilização
Janeiro	30%
Fevereiro	75%
Março	75%
Abril	80%
Maio	80%
Junho	80%
Julho	30%
Agosto	70%
Setembro	75%
Outubro	80%
Novembro	75%
Dezembro	65%

A partir dessas definições, foi possível estabelecer uma estimativa do consumo médio mensal para a Escola Alacy Pena Vieira, valores descritos na Tabela 3.11.

Tabela 3.11. Consumo de energia ao longo do ano - Fonte: Autoria própria

Mês	Energia Média Consumida (kWh)
Janeiro	1.085
Fevereiro	2.464
Março	2.801
Abril	2.689
Maió	2.987
Junho	2.868
Julho	1.053
Agosto	2.614
Setembro	2.604
Outubro	2.898
Novembro	2.689
Dezembro	2.282
Total - Ano	29.032

A partir dessas definições foi possível estabelecer uma curva de consumo estimada para a Escola, a curva está representada na Figura 3.4.

Figura 3.4. Curva de consumo de energia estimado - Escola Alacy Pena Vieira - Fonte: Autoria própria

3.7 DIMENSIONAMENTO DOS COMPONENTES

Para o desenvolvimento do projeto fotovoltaico *off-grid* abordado neste capítulo, foi utilizado como referência o Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos, publicado pelo Grupo de Trabalho de Energia Solar da CRESESB (Centro de Referência para Energia Solar e Eólica) em parceria com o CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica) (PINHO; GALDINO,

2014), além de outras referências encontradas na internet, que serão referenciadas ao longo do texto.

Para sistemas fotovoltaicos *off-grid*, entende-se que, na ausência de um banco de baterias, o sistema opera plenamente apenas durante períodos com alta incidência solar. Dessa forma, para que a edificação não fique sem energia durante a noite e durante meses com pouca incidência solar é necessário realizar o dimensionamento de um banco de baterias com uma autonomia, que é definida por meio da equação 3.3, assim como citado no Manual da engenharia (PINHO; GALDINO, 2014).

$$N = -0,48 \times \text{HSP}_{\min} + 4,58 \quad (3.3)$$

Para a região onde o sistema está sendo instalado, o mês com menor incidência solar é Janeiro, com uma irradiação solar média mensal de 4,62 kWh/m².dia, conforme representado na Figura 3.6, equivalente a 4,62 horas por dia de Horas de Sol Pleno (HSP). O valor de dias de autonomia é encontrado com base na Equação 3.4.

$$N = -0,48 \times \text{HSP}_{\min} + 4,58 = 2,36 \text{ dias} \quad (3.4)$$

O dimensionamento do sistema fotovoltaico será feito para dois cenários distintos: o primeiro considera uma autonomia para o banco de baterias de 1 dia e o segundo considera uma autonomia de 2,36 dias para as baterias.

O cálculo será realizado para ambas as opções, considerando que o primeiro caso representa uma alternativa menos dispendiosa. Essa abordagem pode proporcionar uma confiabilidade aceitável na geração de energia para a escola. Já o segundo caso, apesar de exigir um investimento inicial maior, destaca-se por apresentar uma confiabilidade mais robusta na geração de energia para a instituição.

3.7.1 Energia ativa necessária diariamente

Para a realização do cálculo de energia ativa necessária diariamente é necessário estabelecer os tipos de carga em corrente alternada, corrente contínua e a eficiência dos componentes

utilizados para armazenamento e condicionamento de potência do sistema. Isso inclui a eficiência dos inversores e das baterias, informações que podem ser encontradas nos *datasheets* dos materiais.

Desta forma, o cálculo realizado para encontrar o valor de energia ativa necessária diariamente pela edificação está descrito na equação 3.5:

$$L = \frac{L_{cc}}{N_{bat}} + \frac{L_{ca}}{N_{bat} \cdot N_{inv}} \quad (3.5)$$

Em que:

- L_{cc} (Wh/dia) representa a quantidade de energia consumida diariamente em corrente contínua em um determinado mês;
- L_{ca} (Wh/dia) representa a quantidade de energia consumida diariamente em corrente alternada no mesmo mês;
- N_{bat} (%) é a eficiência da bateria;
- N_{inv} (%) é a eficiência do inversor.

Com o valor encontrado por meio dessa equação é possível encontrar a capacidade necessária para os bancos de baterias.

3.7.2 Capacidade do banco de baterias - CBB

Para calcular a capacidade do banco de baterias, é necessário definir o tempo de autonomia do banco de baterias, a energia ativa consumida diariamente e a profundidade de descarga da bateria. Os dois primeiros foram definidos nas Equações 3.4 e 3.5, respectivamente. Como critério padrão, será adotada uma profundidade de descarga de 80%. A fórmula para o cálculo da capacidade do banco de baterias é apresentada na Equação 3.6.

$$CBB = \frac{\text{Energia ativa consumida diariamente} \times \text{Tempo de autonomia}}{\text{profundidade de descarga da bateria}} \quad (3.6)$$

A partir dos valores encontrados para a capacidade dos bancos de bateria, é necessário determinar a capacidade das baterias em Ampère-hora (Ah). Para fazer isso, é preciso determinar a tensão nominal do banco de baterias, que para esse caso é de 48 V, assim como descrito no *datasheet* do dispositivo, descrito na Tabela 3.2. Com essas definições, a Equação 3.7 descreve como é possível calcular a capacidade em Ah.

$$\text{Capacidade em Ah} = \frac{\text{Capacidade do banco de baterias}}{\text{Tensão nominal do banco de baterias}} \quad (3.7)$$

Por fim, a partir do valor de capacidade das baterias em Ampère-hora (Ah), é possível determinar a quantidade de baterias necessárias, com base na capacidade de cada bateria que conforme especificado no *datasheet* do dispositivo é de 100 Ah. A fórmula para calcular a quantidade de baterias está descrita na Equação 3.8.

$$\text{N}^{\circ} \text{ de baterias} = \frac{\text{Capacidade do banco de baterias (Ah)}}{\text{Capacidade da bateria (Ah)}} \quad (3.8)$$

A partir dos valores encontrados por meio das equações citadas previamente é possível definir a potência necessária que deve ser gerada pelo sistema fotovoltaico.

3.7.3 Potência necessária a ser gerada pelo sistema fotovoltaico

Para calcular o tamanho do sistema fotovoltaico, é essencial levar em consideração vários fatores, incluindo:

- O fator de correção para perdas no sistema, com um valor recomendado padrão de 90%;
- O fator de correção para perdas provenientes de sujeira, defeitos e especificidades de fabricação do módulo fotovoltaico, com um valor recomendado padrão de 75%;
- O número de horas de sol pleno durante o mês de maior consumo. Para o mês de Maio, esse valor é de 5,11 h/dia, conforme indicado na Figura 3.6;
- A energia ativa consumida diariamente no mês de maior consumo (kWh);
- A capacidade do banco de baterias (kWh).

É possível encontrar o valor de potência necessária do sistema por meio da equação 3.9.

$$P_m = \max_{i=1}^{12} \left(\frac{L_i}{HSP_i \cdot Red_1 \cdot Red_2} \right) \quad (3.9)$$

Em que:

- P_m (Wp) é a potência do painel fotovoltaico;
- L_i (Wh/dia) é a energia consumida diariamente no mês i , valor calculado na equação 3.5;
- HSP_i se trata das horas de sol pleno do mês de maior consumo (Maio);
- Red_1 é o fator de redução da potência dos módulos fotovoltaicos, valor recomendado padrão de 0,75;
- Red_2 é o fator de redução relacionado às perdas do sistema, valor recomendado padrão de 0,9.

Porém, como o sistema não é conectado à rede é necessário que exista um banco de baterias, dessa forma, o cálculo da potência necessária, considerando a capacidade do banco de baterias, é descrito pela equação 3.10. Por meio dessa, é possível dimensionar a potência correta para os dois casos descritos previamente.

$$P_m = \max_{i=1}^{12} \left(\frac{L_i + CBB}{HSP_i \cdot Red_1 \cdot Red_2} \right) \quad (3.10)$$

Por meio dessa definição se faz possível o dimensionamento do restante do sistema fotovoltaico.

3.7.4 Definição da quantidade de módulos fotovoltaicos

Para definir a quantidade de módulos fotovoltaicos necessários para o sistema fotovoltaico, utiliza-se o valor de potência definido por meio da Equação 3.10 e a potência de pico do módulo fotovoltaico. O modelo de módulo selecionado tem uma potência de pico de 615 Wp, como descrito na Tabela 3.1. Desta forma, para determinar a quantidade de módulos necessários para o sistema, realiza-se o cálculo descrito na equação 3.11.

$$\text{Quantidade de módulos} = \left(\frac{\text{Potência do sistema}}{\text{Potência do módulo}} \right) \quad (3.11)$$

3.7.5 Correção da tensão de máxima potência (V_{mp}) para a temperatura máxima e mínima

A temperatura é um fator que tem grande influência no funcionamento dos sistemas fotovoltaicos, por essa razão, antes de definir a disposição dos módulos fotovoltaicos, é necessário calcular a correção da tensão de máxima potência (V_{mp}). Essa correção é realizada com base no valor de V_{mp} para uma temperatura máxima.

A correção é realizada com base no valor de V_{mp} e com base no valor do coeficiente de máxima potência (P_{mp}), ambos disponíveis no *datasheet* do módulo, que de acordo com a Tabela 3.1 é 46,54 V e -0,32%/°C, respectivamente. Utiliza-se a temperatura máxima como sendo 70°C. Por meio da equação 3.12 é possível calcular o valor de V_{mp} mínimo, que ocorre quando a temperatura é máxima.

$$V_{mpT_{\text{máx}}} = V_{mp} \cdot \left(1 + (T_{\text{máx}} - 25) \cdot \frac{P_{mp}}{100} \right) \quad (3.12)$$

Também é importante calcular o valor de tensão de máxima potência para a temperatura mínima, assim como descrito por meio da equação 3.13.

$$V_{mpT_{\text{mín}}} = V_{mp} \cdot \left(1 + (T_{\text{mín}} - 25) \cdot \frac{P_{mp}}{100} \right) \quad (3.13)$$

A partir dos valores definidos é possível definir a quantidade de módulos dispostos em série.

3.7.5.1 Quantidade de módulos em série

Para o cálculo da quantidade de módulos em série é necessário definir a tensão nominal do sistema (V_{sist}), que é igual à tensão nominal do banco de baterias. Para esse caso, define-se V_{sist} como sendo 48 V assim como apresentado no *datasheet* da bateria, descrito na Tabela 3.2. Dessa forma, descreve-se o cálculo da quantidade de módulos em série pela equação 3.14.

$$N_{\text{mínimo de módulos em série}} = \frac{1,2 \times V_{\text{sist}}}{V_{\text{mpTmax}}} \quad (3.14)$$

Em conexões em série a tensão é somada, portanto, ressalta-se que a tensão máxima de entrada do controlador de carga não deve ser ultrapassada, nesse caso o controlador está disposto no inversor. Nesse caso, a tensão de circuito aberto do conjunto fotovoltaico não deve ultrapassar $145 V_{CC}$, assim como descrito no *datasheet* do inversor, disponível na Tabela 3.3.

3.7.5.2 Quantidade de módulos em paralelo

Para finalizar o cálculo da disposição dos módulos, é necessário calcular a quantidade de módulos em paralelo por arranjo e a quantidade de arranjos.

Para definir a quantidade de módulos em paralelo por arranjo é preciso entender que a potência do arranjo não deve ultrapassar a potência do controlador de carga, que nesse caso está disposto dentro do inversor e é de 10.000 W e a corrente equivalente do arranjo não deve ultrapassar a corrente suportada pelo inversor, que nesse caso é de 60 A por canal, sendo um para a entrada das baterias e outro canal para a entrada do módulos.

Dessa forma, a primeira condição citada, de que a potência do arranjo não deve ultrapassar a potência suportada pelo controlador (disposto dentro do inversor) está descrita na equação 3.15.

$$\text{Pot. módulo} \times (N_{\text{N}^\circ \text{ mod. em paralelo}} \times N_{\text{N}^\circ \text{ mod. em série}}) < \text{Potência suportada pelo inversor} \quad (3.15)$$

E a segunda condição, de que a corrente do arranjo não deve ultrapassar a corrente do controlador (disposto dentro do inversor) está descrita na equação 3.16

$$\text{Imp} \times \text{n}^\circ \text{ de mod. em paralelo} < \text{Corrente suportada pelo inversor} \quad (3.16)$$

Em que, Imp é a corrente de máxima potência do módulo, valor disponível no *datasheet* do dispositivo, que nesse caso é de 13,21 A, assim como descrito na Tabela 3.1.

Em seguida, é necessário calcular a quantidade de arranjos, cálculo definido pela equação

3.17.

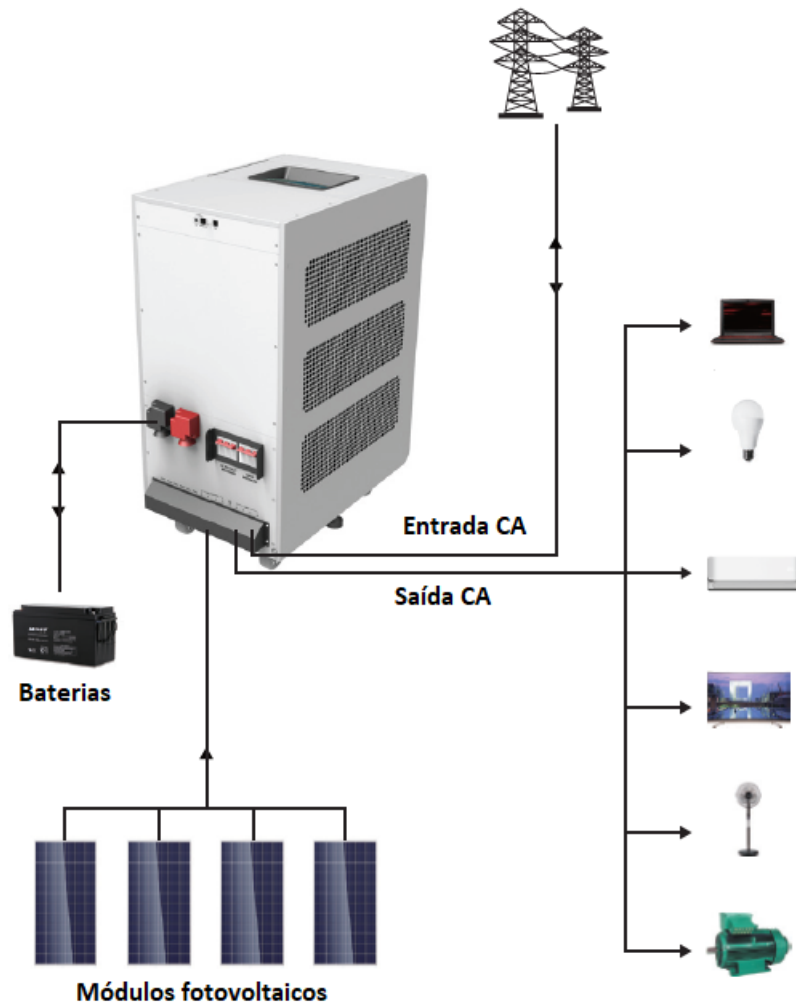
$$N_{Arranjos} = \frac{P_m}{N_{módulos \text{ por arranjo}} \times P_{módulo}} \quad (3.17)$$

Em que,

- P_m é a potência necessária a ser gerada pelo módulo, calculada por meio da equação 3.9;
- $P_{módulo}$ é a potência nominal do módulo, definido na Tabela 3.1, que é de 615 Wp.

3.7.6 Dimensionamento dos controladores de carga

Pelo modelo do inversor escolhido ser híbrido, dentro do inversor já existem os componentes de um controlador de carga, dessa forma, não se faz necessário a utilização de um controlador de carga a parte. É possível observar por meio da Figura 3.5, referente ao diagrama disponível no *datasheet* do inversor, que os módulos fotovoltaicos e as baterias são conectados diretamente no inversor.

Figura 3.5. Diagrama de conexões do inversor híbrido - Fonte: 3.3

Porém, no dimensionamento do inversor é necessário se atentar às condições de tensão, potência e corrente máximas citadas previamente.

3.7.7 Avaliação de compatibilidade do inversor híbrido com os arranjos

O dimensionamento da quantidade de inversores deve ser realizado considerando as especificações disponíveis no *datasheet* do dispositivo, e algumas condições principais devem ser respeitadas, como descrito a seguir:

- A tensão de saída da combinação dos módulos fotovoltaicos não pode ser superior à tensão de entrada do inversor que, de acordo com o *datasheet* do dispositivo disponível na Tabela 3.3 é de $145 V_{CC}$;

- A potência de saída da combinação dos módulos fotovoltaicos não pode ser superior à potência suportada pelo inversor que é de 10.000 W;
- A corrente de saída da combinação dos módulos fotovoltaicos não pode ser superior à corrente suportada pelo inversor que é de 60 A;
- A corrente de saída da bateria não pode ser superior à corrente suportada pelo inversor que é de 60 A.

Cumprindo com essas condições, a definição da quantidade de inversores segue a mesma lógica da definição da quantidade de arranjos, considerando a potência necessária, valor calculado por meio da equação 3.9 e a potência proveniente da combinação dos módulos fotovoltaicos, que se dá pela quantidade de módulos em um arranjo multiplicado pela potência de um módulo. É possível calcular a quantidade de inversores por meio da equação 3.18.

$$\text{Qtd de inversores} = \frac{P_m}{\text{Potência gerada pelos módulos ftv}} = \text{Qtd de arranjos} \quad (3.18)$$

Um ponto importante a ser citado é que, de acordo com o diagrama representado por meio da Figura 3.5, existe uma entrada no inversor para conexão com a rede elétrica. Entretanto, dado que o sistema fotovoltaico a ser dimensionado neste trabalho é destinado a uma instituição sem acesso a uma rede elétrica convencional, essa entrada específica será desconsiderada. Portanto, o inversor será empregado exclusivamente como um inversor *off-grid*.

3.7.8 Distribuição das baterias nos arranjos

A quantidade de baterias foi determinada pela equação 3.8, considerando a capacidade da bateria em Ah. No entanto, com o número de arranjos definido, é necessário distribuir as baterias em cada arranjo de maneira que a potência total do banco, considerando todos os arranjos, alcance o valor da capacidade do banco de baterias dimensionado pela equação 3.6.

Para estabelecer a potência do banco de baterias para cada arranjo, de modo a atingir a capacidade total do banco de baterias, basta dividir o valor da CBB encontrado pela equação 3.6 pela quantidade de arranjos. Assim como descrito por meio da equação 3.19

$$\text{Pot. banco de bateria por arranjo} = \frac{\text{Capacidade do Banco de Baterias Total}}{\text{Qtd. de arranjos}} \quad (3.19)$$

Porém, é importante ressaltar que de acordo com o *datasheet* da bateria selecionada, cada bateria possui uma potência de 5 kWh.

3.7.9 Dimensionamento dos condutores

A determinação da seção dos condutores no sistema fotovoltaico é essencial para garantir o correto funcionamento e segurança da instalação. O sistema pode ser dividido em duas partes distintas: o lado de corrente contínua (CC) e o lado de corrente alternada (CA). A corrente proveniente dos módulos fotovoltaicos e da bateria é contínua. Após a conversão realizada pelo inversor, a corrente se transforma em corrente alternada, pronta para ser usada nos equipamentos elétricos da edificação.

Portanto, o dimensionamento dos condutores é abordado separadamente para cada uma dessas partes. Vale destacar que as considerações e cálculos realizados são aplicáveis aos dois casos analisados nesse projeto, uma vez que os modelos de dispositivos são idênticos em todos eles. Isso proporciona uma abordagem unificada e facilita a aplicação das mesmas diretrizes em diferentes cenários.

3.7.9.1 Lado de corrente contínua

É possível dividir o lado de corrente contínua em três partes. A primeira parte refere-se ao caminho percorrido pela corrente entre os módulos, onde a seção dos condutores é definida pelo *datasheet* dos módulos, conforme demonstrado na Tabela 3.1. Neste caso, a seção do condutor é de 4 mm².

Em seguida, é necessário calcular as dimensões do condutor entre o arranjo dos módulos fotovoltaicos e o controlador de carga, que nesse caso está dentro do inversor. Para esse cálculo, é necessário encontrar a corrente que passa pelo condutor, que é determinada pela corrente de potência máxima do módulo (I_{mp}), valor disponível no *datasheet*, conforme descrito na Tabela 3.1. O cálculo da corrente que percorrerá o caminho entre os módulos e o controlador de carga

está descrito na equação 4.33.

$$\text{Corrente (Módulos } \rightarrow \text{ Inversor)} = \text{Qtd. de módulos em paralelo} \times (I_{mp}) \quad (3.20)$$

Para determinar a seção do condutor, é crucial escolher um modelo comercial adequado. Neste caso, o modelo selecionado é o "Afumex Solar" de cobre estanhado da marca Prysmian Group®), que é capaz de suportar temperaturas extremamente altas.

Em seguida, calcula-se a seção do condutor que sai das baterias e chega no inversor. Para definir essa seção do condutor é considerada a corrente máxima de entrada CC do inversor, que é de 60 A, valor descrito no *datasheet* do dispositivo, assim como representado na Tabela 3.3.

3.7.9.2 Lado de corrente alternada

Este cálculo é realizado por meio da Norma Brasileira (NBR) 5410 de 2004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

De acordo com a NBR 5410:2004 existem algumas formas para dimensionar os condutores:

- Método da seção mínima;
- Método da capacidade de condução da corrente;
- Método de queda de tensão.

Para este projeto aplicam-se os três métodos e adota-se a maior seção encontrada.

3.7.9.3 Método da seção mínima

O primeiro método a ser analisado é o método de seção mínima, este está descrito na Tabela 47 da NBR 5410:2004. Na tabela está descrita a seção mínima do condutor para circuitos de força, de iluminação, de sinalização, controle e circuitos para aplicações especiais. Para um sistema fotovoltaico é considerada a seção aplicada para circuitos de força.

3.7.9.4 Método da capacidade de condução da corrente

Para a utilização do método da capacidade de condução da corrente utilizam-se alguns fatores. O primeiro é o cálculo da corrente de projeto do circuito, em seguida a definição do método de instalação, a aplicação dos fatores de correção e a identificação da seção do condutor.

Para o cálculo da corrente de projeto de um sistema monofásico utiliza-se a equação 3.21 e para o cálculo de sistemas trifásicos utiliza-se a equação 3.22

$$I_b = \frac{P}{V} \quad (3.21)$$

$$I_b = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V} \quad (3.22)$$

Em que:

- I_b (A) corresponde à corrente de projeto calculada;
- P (W) corresponde à potência ativa do sistema (utiliza-se a potência ativa, dado que o fator de potência é unitário);
- V (V) corresponde à tensão nominal do circuito.

Em seguida, calcula-se a corrente de projeto corrigida (I'_b) que leva em consideração alguns fatores de correção, descreve-se a equação para o cálculo desse valor na equação 3.23

$$I'_b = \frac{I_b}{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3} \quad (3.23)$$

Em que:

- I'_b corresponde à corrente de projeto corrigida;
- I_b corresponde à corrente de projeto calculada na equação 3.22;
- k_1 corresponde ao fator de correção de temperatura;
- k_2 corresponde ao fator de correção de agrupamento;

- K_3 corresponde ao fator de correção para linhas subterrâneas em solo com resistividade térmica diferente de 2,5 K.m/W.

Por meio do cálculo da corrente de projeto corrigida é possível definir a seção transversal do condutor mais apropriada, por meio da Tabela 37 da NBR 5410:2004.

3.7.9.5 Método de queda de tensão

O Método de queda de tensão prevê a existência de uma queda de tensão decorrente do caminho percorrido pela corrente. A NBR 5410:2004 estabelece algumas definições quanto ao valor máximo para a queda de tensão, para sistemas com geração própria, a norma estabelece um limite de queda de tensão no circuito de distribuição de até 7%. Desta forma, para um circuito trifásico calcula-se a seção do condutor por meio da equação 3.24 (JÚNIOR, s.d.).

$$S = \frac{\rho \cdot L \cdot I_B \cdot \sqrt{3}}{V\% \cdot V} \times 100 \quad (3.24)$$

Em que:

- S (mm²) corresponde à seção transversal do condutor calculada;
- ρ ($\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$) corresponde à resistividade do material do condutor;
- L (m) corresponde à distância percorrida pelo circuito, em metros;
- I (A) corresponde à corrente de projeto corrigida, calculada a partir da equação 3.23;
- V% corresponde à queda de tensão permitida;
- V corresponde à tensão do circuito fase-fase, valor descrito no *datasheet* do dispositivo.

3.7.10 Dimensionamento dos dispositivos de proteção

Em sistemas fotovoltaicos *off-grid*, são estabelecidos diversos tipos de medidas de proteção, incluindo o uso de disjuntores e fusíveis. Essas medidas são aplicadas tanto no lado de corrente contínua (CC) quanto no lado de corrente alternada (CA).

Como está sendo tratado dos mesmos modelos de dispositivos para os dois casos citados previamente, as definições realizadas nessa seção podem ser replicadas para ambos os casos.

3.7.10.1 Dimensionamento dos fusíveis - Corrente contínua

Para o dimensionamento dos fusíveis para o lado do sistema de corrente contínua, para cada série, é necessário determinar a corrente nominal do fusível (I_n), por meio dos valores da corrente de curto-circuito (I_{sc}) e da tensão de circuito aberto (V_{oc}), descritos no *datasheet* do módulo, assim como representado na Tabela 3.1. As definições do tipo de fusível a ser utilizado são feitas a partir das equações 3.25 e 3.26.

$$V_{oc_{total}} = V_{oc_{módulo}} \times N^o \text{ de módulos em série} \quad (3.25)$$

$$I_{sc_{total}} = I_{sc_{módulo}} \times N^o \text{ de módulos em paralelo} \quad (3.26)$$

A partir dos valores encontrados, é possível aplicar a condição estabelecida na NBR 16690, que está descrita na equação 3.27. Essa condição determina que a corrente nominal do dispositivo de proteção deve ser maior que 1,5 vezes a corrente de curto-circuito da série e menor que 2,4 vezes essa corrente.

$$1,5 \cdot I_{sc} < I_n < 2,4 \cdot I_{sc} \quad (3.27)$$

3.7.10.2 Dimensionamento dos disjuntores - Corrente contínua

Para a parte de corrente contínua, é fundamental realizar o dimensionamento de disjuntores para duas partes distintas do sistema. Estes disjuntores são instalados entre os módulos fotovoltaicos e os inversores e entre as baterias e os inversores.

- Disjuntor entre o arranjo dos módulos fotovoltaicos e o inversor:

Para dimensionar a corrente do disjuntor entre o arranjo de módulos fotovoltaicos e o inversor é necessário multiplicar a quantidade de módulos em paralelo pela corrente de curto-

circuito disponível no *datasheet* do módulo. Nesse cenário, é selecionado um disjuntor de corrente contínua com capacidade igual ou superior a essa corrente, atentando-se à corrente máxima de entrada do inversor.

- Disjuntor entre a bateria e o inversor:

Para dimensionar o disjuntor entre a bateria e o inversor, basta selecionar um disjuntor com uma corrente nominal igual ou inferior à corrente máxima de entrada do inversor que é de 60 A, assim como descrito no *datasheet* do dispositivo representado na Tabela 3.3.

3.7.10.3 Dimensionamento dos disjuntores - Corrente alternada

Para dimensionar os disjuntores de corrente alternada entre o inversores e as cargas, é necessário aplicar a relação que define a potência como sendo o produto da tensão pela corrente.

Comumente, a potência a ser considerada é a potência instalada, porém como o sistema é composto por diversos inversores, a potência considerada será a potência ativa do inversor, que de acordo com o *datasheet* dos dispositivos, representado na Tabela 3.3 é de 10.000 W, e será considerada a tensão de saída do inversor que de acordo com o *datasheet* é de 400 V_{CA} , entre fases. Além disso, aplica-se um fator de 15% sobre o valor da corrente para encontrar o valor máximo possível para a corrente do disjuntor. O cálculo da corrente do disjuntor está representado na equação 3.28.

$$0,85 \cdot I_{\text{disjuntor}_{ca}} = \frac{\text{Potência Real do Inversor}}{\text{Tensão de Saída do Inversor} \cdot \sqrt{3}} \quad (3.28)$$

A partir dos métodos descritos nesse capítulo é possível dimensionar de forma apropriada os dispositivos necessários para compor o sistema fotovoltaico *off-grid* para a Instituição de ensino Alacy Pena Vieira. Esse cálculo será descrito no próximo capítulo.

3.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na metodologia foi destacado o processo de dimensionamento de cargas para a escola Alacy Pena Vieira. Além disso, foram apresentadas as etapas que devem ser seguidas de forma a

dimensionar apropriadamente um sistema fotovoltaico *off-grid* e seus componentes.

O próximo capítulo aplicará, de maneira prática, os passos apresentados na metodologia, com o intuito de estabelecer, de forma concreta, o sistema fotovoltaico mais adequado para a instituição Alacy Pena Vieira, considerando ambas as situações citadas previamente.

DIMENSIONAMENTO E RESULTADOS

Nesse capítulo serão apresentados o dimensionamento do sistema fotovoltaico *off-grid* para a escola Alacy Pena Vieira e os resultados que podem ser obtidos a partir da instalação do sistema. Foi explorado de forma minuciosa as especificações e os cálculos essenciais para assegurar um dimensionamento preciso.

4.1 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO *OFF-GRID*

A partir dos cálculos descritos no capítulo 3 é possível dimensionar os componentes do sistema fotovoltaico *off-grid*. Os cálculos estarão descritos nesta seção.

4.1.1 Cálculo da energia consumida diariamente

Assim como descrito na equação 3.5 é possível dimensionar a energia consumida por meio do conhecimento sobre os tipos de carga do sistema e da eficiência dos componentes a serem utilizados. Desta forma, calcula-se a energia ativa média diária, considerando a energia consumida anualmente, descrita na Tabela 3.11, que é de 29.032 kWh. Para esse valor é possível encontrar um valor médio diário de 80,64 kWh, como mostrado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Consumo médio diário

Período considerado	Consumo (kWh)
Consumo médio anual	29.032
Consumo médio mensal	2.419,33
Consumo médio diário	80,64

De acordo com os *datasheets* dos dispositivos selecionados, o valor da eficiência do Inversor é de 90%, como descrito na Tabela 3.3 e a eficiência da bateria é de 98%, como descrita na Tabela 3.2.

Para o caso analisado não existem cargas em Corrente Contínua, desta forma, é possível encontrar o valor da quantidade de energia **média** consumida diariamente, por meio da equação 4.1.

$$L_{\text{médio}} = \frac{L_{cc}}{N_{\text{bat}}} + \frac{L_{ca}}{N_{\text{bat}} \cdot N_{\text{inv}}} = \frac{80,64}{0,9 \cdot 0,98} + \frac{0}{0,98} = 91,43 \text{ kWh/dia} \quad (4.1)$$

Porém, para o dimensionamento de um sistema mais confiável é necessário utilizar o mês com maior energia consumida para o cálculo da energia ativa necessária diariamente. Como descrito na Tabela 3.11 o mês com maior consumo é o mês de Maio, com 2.987 kWh. Na Tabela 4.2 define-se o valor de consumo médio diário do mês de maio.

Tabela 4.2. Consumo médio diário - Maio

Período considerado	Consumo (kWh)
Consumo médio mensal	2.987
Consumo médio diário	96,35

Com este valor e com os valores de eficiência citados previamente, encontra-se o valor de energia ativa necessária diariamente para o mês de maior consumo. O valor é encontrado na equação 4.2.

$$L_{\text{Maio}} = \frac{96,35}{0,9 \cdot 0,98} + \frac{0}{0,98} = 109,24 \text{ kWh/dia} \quad (4.2)$$

4.1.2 Cálculo da capacidade do banco de baterias - CBB

Como descrito no capítulo 3 serão considerados dois casos distintos para o dimensionamento do sistema e por meio das equações 3.6, 3.7 e 3.8 é possível dimensionar a capacidade dos bancos de bateria e a quantidade de baterias para cada caso.

4.1.2.1 Caso 1: Capacidade do banco de baterias - 1 dia de autonomia

No primeiro caso a ser analisado, referente a um banco de baterias com autonomia de 1 dia, o valor encontrado para a Capacidade do Banco de Baterias (CBB) está descrito na Equação 4.3.

$$\begin{aligned}
 CBB_{1\text{ dia}} &= \frac{\text{Energia ativa consumida diariamente} \times \text{Tempo de autonomia}}{\text{profundidade de descarga da bateria}} \\
 &= \frac{109,24 \text{ kWh} \times 1}{0,8} = \frac{109,24}{0,8} = 136,55 \text{ kWh}
 \end{aligned}
 \tag{4.3}$$

A partir do valor encontrado para a CBB é possível encontrar a capacidade da bateria em Ampère-hora (Ah). Para o primeiro caso, o valor da capacidade em Ah está descrito na equação 4.4.

$$\text{Capacidade (Ah) - 1 dia} = \frac{\text{Capacidade do banco de baterias}}{\text{Tensão nominal do banco de baterias}} = \frac{136,55 \text{ kWh}}{48 \text{ V}} = 2844,79 \text{ Ah}
 \tag{4.4}$$

Para o banco de baterias com autonomia de 1 dia a quantidade de baterias necessárias está descrita na equação 4.5

$$\text{N}^\circ \text{ de baterias - 1 dia} = \frac{\text{Capacidade do banco de baterias (Ah)}}{\text{Capacidade da bateria (Ah)}} = \frac{2844,79}{100} \approx 29 \text{ baterias}
 \tag{4.5}$$

4.1.2.2 Caso 2: Capacidade do banco de baterias - 2,36 dias de autonomia

Já no segundo caso, em que está sendo avaliado um banco de baterias com autonomia de 2,36 dias, o valor de CBB está apresentado na Equação 4.6.

$$CBB_{2,36 \text{ dias}} = \frac{109,24 \text{ kWh} \times 2,36}{0,8} = \frac{275,8}{0,8} = 322,258 \text{ kWh}
 \tag{4.6}$$

Com o valor encontrado na equação 4.6, o valor da capacidade em Ah, para o segundo caso, está descrito na equação 4.7.

$$\text{Capacidade (Ah) - 2,36 dias} = \frac{322,258 \text{ kWh}}{48 \text{ V}} = 6713,7 \text{ Ah}
 \tag{4.7}$$

A quantidade de baterias para o banco de baterias com autonomia de 2,36 dias está descrita na equação 4.8.

$$\text{N}^\circ \text{ de baterias} - 2,36 \text{ dias} = \frac{6713,7}{100} \approx 68 \text{ baterias} \quad (4.8)$$

4.1.3 Cálculo da potência necessária a ser gerada pelo sistema fotovoltaico

Caso não houvesse um banco de baterias a potência necessária para o mês de maio seria calculada por meio da equação 4.9.

$$Pm_{Maio} = \max_{i=1}^{12} \left(\frac{L_i}{HSP_i \cdot \text{Red}_1 \cdot \text{Red}_2} \right) = \left(\frac{109,24}{5,11 \cdot 0,75 \cdot 0,9} \right) = 31,6 \text{ kW}_p = 31.672 \text{ W}_p \quad (4.9)$$

Porém, como apresentado no Capítulo 3 é necessário o dimensionamento de um banco de baterias para o sistema. O cálculo desse valor é de extrema importância para que o sistema não fique subdimensionado e a escola não fique sem iluminação.

4.1.3.1 Caso 1: Potência necessária - 1 dia de autonomia

Para o primeiro caso, em que existe um banco de baterias com autonomia de 1 dia, a potência necessária está descrita na equação 4.10. Para esse cálculo é necessário utilizar o valor encontrado para a capacidade do banco de baterias descrito na equação 4.3.

$$Pm_{1dia} = \left(\frac{109,24 + 136,55}{5,11 \cdot 0,75 \cdot 0,9} \right) = 71,25 \text{ kW}_p = 71.258 \text{ W}_p \quad (4.10)$$

4.1.3.2 Caso 2: Potência necessária - 2,36 dias de autonomia

Já para o segundo caso, em que o banco de baterias tem uma autonomia de 2,36 dias, a potência necessária está descrita na equação 4.11.

$$Pm_{2,36dias} = \left(\frac{109,24 + 322,258}{5,11 \cdot 0,75 \cdot 0,9} \right) = 125,099 \text{ kW}_p = 125.099 \text{ W}_p \quad (4.11)$$

Por meio das potências calculadas é possível calcular a quantidade de módulos necessários no sistema.

4.1.4 Cálculo da quantidade de módulos fotovoltaicos

Para realizar o cálculo da quantidade de módulos fotovoltaicos é necessário utilizar a equação 3.11 descrita no Capítulo 3. Dessa forma, calcula-se a quantidade de módulos para os dois casos citados.

4.1.4.1 Caso 1: Cálculo da quantidade de módulos fotovoltaicos - 1 dia de autonomia

Para o primeiro caso, onde existe a presença de um banco de baterias com autonomia de 1 dia, o cálculo da quantidade de módulos necessária está descrita na equação 4.12.

$$\text{Quantidade de módulos} = \left(\frac{\text{Potência do sistema}}{\text{Potência do módulo}} \right) = \frac{71.258}{615} \approx 116 \text{ módulos} \quad (4.12)$$

4.1.4.2 Caso 2: Cálculo da quantidade de módulos fotovoltaicos - 2,36 dias de autonomia

Já para o segundo caso, onde existe a presença de um banco de baterias com autonomia de 2,36 dias, a quantidade de módulos está descrita na equação 4.13.

$$\text{Quantidade de módulos} = \frac{125.099}{615} \approx 204 \text{ módulos} \quad (4.13)$$

4.1.5 Cálculo da correção da tensão de máxima potência (V_{mp})

Por meio da equação 3.12 é possível calcular o valor de (V_{mp}) para o modelo de módulo selecionado. O cálculo para a temperatura máxima de 70 °C é realizado na equação 4.14

$$V_{mpTmax} = V_{mp} \cdot \left(1 + (T_{max} - 25) \cdot \frac{P_{mp}}{100} \right) = 46,54 \cdot \left(1 + (70 - 25) \cdot \frac{-0,32}{100} \right) = 39,83 \text{ V} \quad (4.14)$$

E o cálculo para a temperatura mínima (20 °C) é realizado por meio da equação 4.15

$$V_{mpTmin} = 46,54 \cdot \left(1 + (20 - 25) \cdot \frac{-0,32}{100} \right) = 47,28 \text{ V} \quad (4.15)$$

A partir dos valores encontrados é possível, então, calcular a quantidade de módulos em série para o sistema.

4.1.6 Cálculo da quantidade de módulos em série

Para o valor de $V_{mpTmáx}$ encontrado na equação 4.14 e para a tensão de sistema de 48 V, calcula-se a quantidade de módulos em série por meio da equação 3.14, sugerida no manual da engenharia (PINHO; GALDINO, 2014).

$$N_{\text{módulos em série}} = \frac{1.2 \times V_{\text{sist}}}{V_{mpTmax}} = \frac{1.2 \times 48}{39,83} \approx 2 \text{ módulos} \quad (4.16)$$

Porém, como citado no capítulo 3, em conexões em série a tensão é somada, portanto, é necessário calcular a tensão proveniente da disposição dos módulos para aferir que a tensão máxima de entrada do inversor não está sendo ultrapassada. Nesse caso, a tensão somada dos módulos está descrita na equação 4.17.

$$V_{\text{módulos em série}} = 2 \cdot V_{mp} = 2 \cdot 54,90 = 109,8 \text{ V} \quad (4.17)$$

Sabendo que a tensão de circuito aberto máxima suportada proveniente dos módulos fotovoltaicos pelo inversor é de $145 V_{CC}$, entende-se que não é possível adicionar mais um módulo em série, considerando a tensão de circuito aberto do módulo de 54,90 V, assim como apresentado na Tabela 3.1. É demonstrado pela equação 4.18 que a disposição de 3 módulos em série ultrapassa o valor permitido pelo inversor de $145 V_{CC}$.

$$V_{\text{módulos em série}} = 3 \cdot V_{mp} = 3 \cdot 54,90 = 164,70 \text{ V} \quad (4.18)$$

Dessa forma, é possível concluir, por meio da equação 4.19, que a tensão de circuito aberto com dois módulos dispostos em série atendem a condição.

$$V_{\text{módulos em série}} = 2 \cdot V_{\text{mp}} = 3 \cdot 54,90 = 109,8 \text{ V} \quad (4.19)$$

Dessa forma, para ambos os casos define-se que a quantidade é de 2 módulos em série, de forma a tensão do arranjo fotovoltaico não ultrapassem a tensão suportada pelo inversor.

4.1.7 Cálculo da quantidade de módulos fotovoltaicos em paralelo

4.1.7.1 Quantidade de módulos em paralelo por arranjo para os dois casos

Para definir a quantidade de módulos em paralelo por arranjo é necessário seguir as condições estabelecidas no capítulo 3. Dessa forma, a primeira condição é representada pela equação 4.20.

$$\text{Pot. módulo} \times (N_{\text{N}^\circ \text{ mód. em paralelo}} \times N_{\text{N}^\circ \text{ mód. em série}}) < \text{Potência suportada pelo inversor}$$

$$615 \times N^\circ \text{ mód. em paralelo} \times 2 < 10.000 \text{ W}$$

$$1.230 \times N^\circ \text{ mód. em paralelo} < 10.000 \text{ W}$$

$$N^\circ \text{ mód. em paralelo} < 8,13 \text{ módulos} \quad (4.20)$$

Para respeitar a primeira condição seria possível definir um arranjo com 8 módulos em paralelo, porém é necessário que a segunda condição também seja respeitada, essa está representada pela equação 4.21.

$$\text{Imp} \times n^\circ \text{ de mód. em paralelo} < \text{Corrente suportada pelo inversor}$$

$$13,21 \times N^\circ \text{ mód. em paralelo} < 60 \text{ A} \quad (4.21)$$

$$N^\circ \text{ mód. em paralelo} < 4,54 \text{ módulos}$$

Por meio das duas condições é possível estabelecer que cada arranjo, em ambos os casos, pode conter até 4 módulos em paralelo. Dessa forma, define-se que a quantidade total de módulos por arranjo é resultante da multiplicação da quantidade de módulos em série pela quantidade de módulos em paralelo, assim como descrito na equação 4.22.

$$N^{\circ} \text{ módulos por arranjo} = n^{\circ} \text{ módulos em paralelo} \times N^{\circ} \text{ módulos em série} = 4 \times 2 = 8 \text{ módulos} \quad (4.22)$$

4.1.7.2 Caso 1: Quantidade de arranjos - 1 dia de autonomia

Para definir a quantidade de arranjos para o primeiro caso é necessário aplicar, na equação 3.17, o valor de potência necessária, calculada na equação 4.10, e a quantidade de módulos por arranjo é calculada na equação 4.22. Dessa forma, a quantidade de arranjos para o sistema com um dia de autonomia está descrita na equação 4.23.

$$N_{\text{Arranjos-1dia}} = \frac{P_m}{N_{\text{módulos por arranjo}} \times P_{\text{módulo}}} = \frac{71.258}{8 \times 615} \approx 15 \text{ arranjos} \quad (4.23)$$

4.1.7.3 Caso 2: Quantidade de arranjos - 2,36 dias de autonomia

Já para o segundo caso, em que existe um banco de baterias com capacidade de 2,36 dias de autonomia, a quantidade de arranjos é definida por meio da equação 4.24.

$$N_{\text{Arranjos-2,36dias}} = \frac{125.099}{8 \times 615} \approx 26 \text{ arranjos} \quad (4.24)$$

4.1.8 Avaliação de compatibilidade do inversor híbrido com os arranjos

Para um dimensionamento adequado do inversor é necessário seguir as condições descritas no capítulo 3. A primeira condição citada é cumprida e é descrita na equação 4.19, em que é apresentado que a tensão de circuito aberto total dos módulos que é de 109,8 V é inferior à tensão máxima de circuito aberto do inversor que é de 145 V_{CC} .

A segunda condição citada é cumprida e é descrita na equação 4.25.

Potência dos módulos \times Quantidade de módulos em um arranjo $<$ Potência do inversor

$$615 \times 8 < 10000 \implies 4.920 \text{ W} < 10.000 \text{ W} \quad (4.25)$$

A terceira condição é descrita pela equação 4.33, que descreve que a corrente total do arranjo é de 52,84 A, sendo menor que a corrente de entrada do inversor que é de 60 A.

E por fim, a quarta condição é provada pelo próprio *datasheet* da bateria, descrito pela Tabela 3.2.

4.1.9 Distribuição das baterias nos arranjos

Com a definição da quantidade de arranjos para cada caso é possível definir a quantidade de baterias a serem dispostas em paralelo conectadas em cada inversor.

4.1.9.1 Distribuição das baterias nos arranjos - Caso 1

Assim como descrito no capítulo 3 é necessário calcular a potência do banco de baterias a ser conectado em cada arranjo para estabelecer a quantidade exata de baterias, levando em consideração a potência do dispositivo descrito na Tabela 3.2. O cálculo para o primeiro caso é feito pela equação 4.26.

$$\text{Pot. banco de bateria por arranjo} = \frac{\text{Capacidade do Banco de Baterias Total}}{\text{Qtd. de arranjos}} = \frac{136.550}{15} \approx 9.104 \text{ Wh} \quad (4.26)$$

Por meio da equação 4.26 é possível identificar que cada arranjo deve possuir um banco de baterias com pelo menos 9.104 Wh de potência. Considerando que a potência de cada bateria é de 5.000 Wh, conforme indicado na 3.2, são selecionadas duas baterias a serem dispostas em paralelo para cada arranjo.

No primeiro caso, o sistema completo terá um total de 30 baterias, considerando duas por arranjo e 15 arranjos. Apesar da quantidade obtida pela equação 4.26 diferir em uma unidade

do valor obtido pela equação 4.5, a situação não apresenta problemas, desde que a potência total do banco de baterias do sistema seja igual ou superior ao valor obtido pela equação 4.3.

A potência total do banco de baterias para o sistema para o primeiro caso é calculado por meio da equação 4.27.

$$\text{Pot. total Banco de baterias} = \text{Qtd. baterias} \cdot \text{Pot. por bateria} = 30 \cdot 5000 = 150\text{kWh} \quad (4.27)$$

4.1.9.2 Distribuição das baterias nos arranjos - Caso 2

Para o segundo caso, a quantidade de baterias por arranjo é determinada pela equação 4.28.

$$\text{Pot. banco de bateria por arranjo} = \frac{322.258}{26} \approx 12.400 \text{ Wh} \quad (4.28)$$

Para o segundo caso são necessárias três baterias em paralelo, assim como no primeiro caso, a quantidade de baterias será superior à quantidade calculada por meio da equação 4.8. O total de baterias para o segundo caso será de 78, dado que esse é composto por 3 baterias em paralelo por arranjo e por 26 arranjos.

A potência total do banco de baterias para o sistema para o segundo caso é calculado por meio da equação 4.29.

$$\text{Pot. total Banco de baterias} = \text{Qtd. baterias} \cdot \text{Pot. por bateria} = 78 \cdot 5000 = 390 \text{ kWh} \quad (4.29)$$

4.1.10 Tabela resumo do sistema

A tabela a seguir apresenta um resumo do sistema projetado, dividido por caso:

Tabela 4.3. Resumo Sistema Projetado - Fonte: Autoria própria

Caso	Caso 1	Caso 2
Autonomia (dias)	1	2,36
CBB (kWh)	150	390
Potência gerada (Wp)	73.800	127.920
Qtd. de arranjos	15	26
Qtd. de mód./arranjo	8	8
Qtd. mód. em paralelo	4	4
Qtd. mód. em série	2	2
Qtd. de inversores	15	26
Qtd. de baterias	30	78

4.2 ANÁLISE DO ESPAÇO PARA INSTALAÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

Para a instalação das baterias e dos inversores se faz necessário a construção de um ambiente climatizado e fechado. Recomenda-se que esse espaço seja disposto próximo à escola e próximo ao quadro geral.

Para os módulos fotovoltaicos, assim como descrito no capítulo 3 a escola possui uma área de telhado de, aproximadamente, 1.034 m². De acordo com o *datasheet* do módulo fotovoltaico, cada módulo possui uma área de 2,79 m². Descreve-se então o espaço necessário para cada caso.

4.2.1 Espaço necessário para o caso 1

Para o caso 1 foi estimada a utilização de 15 arranjos de módulos cada uma com 8 módulos, totalizando 120 módulos. O espaço total necessário é determinado pela quantidade de módulos multiplicada pela área de um módulo:

$$\text{Espaço total necessário} = \text{Quantidade de módulos} \times \text{Área de um módulo} \quad (4.30)$$

Para 120 módulos com 2,79 m² de área cada:

$$\text{Espaço total necessário} = 120 \times 2,79 \text{ m}^2 = 334,8 \text{ m}^2 \quad (4.31)$$

Logo, o espaço total necessário para o caso 1 seria de 334,8 m².

4.2.2 Espaço necessário para o caso 2

Já o caso 2 foi estimada a utilização de 26 arranjos de módulos cada uma com 8 módulos, totalizando 204 módulos. O espaço total necessário é determinado pela quantidade de módulos multiplicada pela área de um módulo:

Para 204 módulos com $2,79\text{ m}^2$ de área cada:

$$\text{Espaço total necessário} = 204 \times 2,79\text{ m}^2 = 569,16\text{ m}^2 \quad (4.32)$$

Logo, o espaço total necessário para o caso 1 seria de $569,16\text{ m}^2$.

Para ambos os casos o espaço disposto na escola seria suficiente para comportar os dispositivos do sistema fotovoltaico.

4.3 DIMENSIONAMENTO DOS CONDUTORES

Para a realização do dimensionamento apropriado dos condutores é necessário separar o sistema em dois lados, o lado de corrente contínua e o lado de corrente alternada. Ambos serão dimensionados nessa seção.

4.3.1 Lado de corrente contínua

Para o dimensionamento da seção do condutor que sai dos módulos e chega no inversor é necessário aplicar a equação 4.33

$$\begin{aligned} \text{Corrente (Módulos } \rightarrow \text{ Inversor)} &= \text{Qtd. de módulos em paralelo} \times I_{mp} \\ &= 4 \times 13,21 = 52,84\text{ A} \end{aligned} \quad (4.33)$$

Como citado no capítulo 3 o condutor utilizado é o "Afumex Solar" de cobre estanhado da marca "Prysmian Group", para determinar a seção apropriada do condutor é necessário consultar a tabela de capacidade de condução de corrente, disponível no *datasheet* do condutor, apresentado na Tabela 3.5. Para uma instalação ao ar livre com uma temperatura do condutor de $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ e uma temperatura ambiente de $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, e levando em consideração a corrente de

52,84 A, conforme calculado na Equação 4.33, a seção mais adequada do condutor é de 6 mm², que suporta uma corrente de até 59 A.

Em seguida, calcula-se a seção do condutor que sai das baterias e chega no inversor, como citado no capítulo 3 a corrente considerada é de 60 A, portanto a seção do condutor para esse caso é de 10 mm², que suporta uma corrente de até 81 A, assim como representado na Tabela 3.5.

4.3.2 Lado de corrente alternada

Assim como citado no capítulo 3, para a definição da seção do condutor para o lado de corrente alternada é necessário aplicar três métodos e selecionar a maior seção encontrada.

4.3.2.1 Método da seção mínima

Assim como apresentado na Tabela 4.4, que representa a Tabela 47 da NBR 5410:2004, para circuitos de força, assim como um sistema fotovoltaico, a seção mínima do condutor é de 2,5 mm².

Tabela 4.4. Tabela 47 - Método da Seção Mínima - Fonte: (ABNT, 2004)

Tipo de linha		Utilização do circuito	Seção mínima do condutor mm ² - material
Instalações fixas em geral	Condutores e cabos isolados	Circuitos de iluminação	1,5 Cu 16 Al
		Circuitos de força ²⁾	2,5 Cu 16 Al
		Circuitos de sinalização e circuitos de controle	0,5 Cu ³⁾
	Condutores nus	Circuitos de força	10Cu 16 Al
		Circuitos de sinalização e circuitos de controle	4 Cu
Linhas flexíveis com cabos isolados		Para um equipamento específico	Como especificado na norma do equipamento
		Para qualquer outra aplicação	0,75 Cu ⁴⁾
		Circuitos a extra baixa tensão para aplicações especiais	0,75 Cu

¹⁾ Seções mínimas ditadas por razões mecânicas
²⁾ Os circuitos de tomadas de corrente são considerados circuitos de força.
³⁾ Em circuitos de sinalização e controle destinados a equipamentos eletrônicos é admitida uma seção mínima de 0,1 mm².
⁴⁾ Em cabos multipolares flexíveis contendo sete ou mais veias é admitida uma seção mínima de 0,1 mm².

4.3.2.2 Método da capacidade de condução de corrente

Para o sistema fotovoltaico descrito neste documento utiliza-se a equação 3.22, descrita no capítulo 3, referente ao cálculo da corrente de projeto para sistemas trifásicos. Para encontrar o valor de corrente de projeto utiliza-se o valor de potência ativa de saída do inversor, que de acordo com o *datasheet* do dispositivo é de 10.000 W e utiliza-se da tensão nominal do sistema que de acordo com o *datasheet* do inversor é de 400 V_{CA} entre fases. Desta forma, calcula-se a corrente de projeto por meio da equação 4.34.

$$I_b = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V} = \frac{10.000}{\sqrt{3} \cdot 400} \approx 14,3 \text{ A} \quad (4.34)$$

Para o condutor do lado CA não será necessária a utilização de condutores de cobre estanhado, dado que o sistema ficará em um espaço coberto. Desta forma, define-se a utilização de isolamento de PVC. Para definir o fator de correção de temperatura, define-se a temperatura ambiente de 40 °C. Dessa forma, por meio da Tabela 40 da NBR 5410, representada na Tabela 4.5 o fator de correção de temperatura é de 0,87.

Tabela 4.5. Tabela 40 - Fator de correção de temperatura - Fonte: (ABNT, 2004)

Temperatura °C	Isolação	
	PVC	EPR ou XLPE
Ambiente		
10	1,22	1,15
15	1,17	1,12
20	1,12	1,08
25	1,06	1,04
35	0,94	0,96
40	0,87	0,91
45	0,79	0,87

Em seguida, define-se o método de instalação por meio da Tabela 33 da NBR 5410, para o sistema projetado é selecionado o tipo "B1", que é referente à "Condutores isolados ou cabos unipolares em eletroduto aparente de seção circular sobre a parede ou espaçado desta menos de 0,3 vezes o diâmetro do eletroduto"(ABNT, 2004).

Por meio da Tabela 46, da NBR 5410, define-se o número de condutores carregados a ser adotado, que para um sistema trifásico com neutro é de 3. Assim como representado na Tabela 4.6

Tabela 4.6. Tabela 46 - Número de condutores carregados a ser considerado - Fonte: (ABNT, 2004)

Esquema de Condutores vivos do circuito	Número de Condutores carregados a ser adotado
Monofásico a dois condutores	2
Monofásico a três condutores	2
Duas fases sem neutro	2
Duas fases com neutro	3
Trifásico sem neutro	3
Trifásico com neutro	3 ou 4*

Com a definição do método de instalação e com o número de condutores carregados é possível definir, por meio da Tabela 42 da NBR 5410, o fator de correção de agrupamento, que é 1. Assim como demonstrado na Tabela 4.7.

Tabela 4.7. Tabela 42 - Fator de correção de Agrupamento - Fonte: (ABNT, 2004)

Ref.	Forma de agrupamento dos condutores	Número de circuitos ou de cabos multipolares												Tabelas dos métodos de referência
		1	2	3	4	5	6	7	8	9 a 11	12 a 15	16 a 19	≥20	
1	Em feixe: ao ar livre ou sobre superfície; embutidos; em conduto fechado	1,00	0,80	0,70	0,65	0,60	0,57	0,54	0,52	0,50	0,45	0,41	0,38	36 a 39 (métodos A a F)
2	Camada única sobre parede, piso, ou em bandeja não perfurada ou prateleira	1,00	0,85	0,79	0,75	0,73	0,72	0,72	0,71	0,70				36 e 37 (método C)
3	Camada única no teto	0,95	0,81	0,72	0,68	0,66	0,64	0,63	0,62	0,61				
4	Camada única em bandeja perfurada	1,00	0,88	0,82	0,77	0,75	0,73	0,73	0,72	0,72				38 e 39 (métodos E e F)
5	Camada única sobre leito, suporte etc.	1,00	0,87	0,82	0,80	0,80	0,79	0,79	0,78	0,78				

O fator de resistividade térmica do solo, aplica-se somente para condutores aterrados, dessa forma, não será considerado no cálculo da corrente de projeto corrigida.

Calcula-se a corrente de projeto corrigida na equação 4.35. O coeficiente k_1 corresponde ao fator de correção de temperatura e k_2 corresponde ao fator de correção de agrupamento.

$$I'_b = \frac{I_b}{k_1 \cdot k_2} = \frac{14,3}{0,87 \cdot 1} \approx 16,43 \text{ A} \quad (4.35)$$

Com o valor de corrente corrigida é possível selecionar a seção do condutor a partir da Tabela 36 da NBR 5410, assim como demonstrado da Tabela 4.8. A seção que suporta uma corrente mais próxima à corrente de projeto corrigida é a de 2,5 mm², que tem capacidade máxima de 21 A, mas para uma segurança maior sugere-se a utilização do condutor com seção de 4 mm², com capacidade máxima de até 28 A.

Tabela 4.8. Tabela 36 - Seção do condutor - Método Capacidade de Condução de Corrente - Fonte: (ABNT, 2004)

Seções nominais mm ²	Métodos de referência indicados na tabela 33											
	A1		A2		B1		B2		C		D	
	Número de condutores carregados											
	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
Cobre												
0,5	7	7	7	7	9	8	9	8	10	9	12	10
0,75	9	9	9	9	11	10	11	10	13	11	15	12
1	11	10	11	10	14	12	13	12	15	14	18	15
1,5	14,5	13,5	14	13	17,5	15,5	16,5	15	19,5	17,5	22	18
2,5	19,5	18	18,5	17,5	24	21	23	20	27	24	29	24
4	26	24	25	23	32	28	30	27	36	32	38	31
6	34	31	32	29	41	36	38	34	46	41	47	39

4.3.2.3 Método da queda de tensão

Para o cálculo da seção do condutor por meio do método de queda de tensão aplica-se a equação 3.24 apresentada no capítulo 3. Dessa forma, alguns valores são definidos para realizar o cálculo do método, a resistividade do material é de aproximadamente $0,017 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$, a distância a ser percorrida pela corrente é estimada em 10 metros, a corrente de projeto foi calculada previamente por meio da equação 4.35, a queda de tensão máxima é definida, por meio da NBR 5410:2004, como sendo 7% e a tensão do circuito é equivalente à tensão de saída do inversor, de 400 V, assim como descrito por meio da Tabela 3.3. Portanto, calcula-se a seção do condutor por meio da equação 4.36.

$$S = \frac{\rho \cdot L \cdot I_B \cdot \sqrt{3}}{V\% \cdot V} \times 100 = \frac{0,017 \cdot 10 \cdot 16,43 \cdot \sqrt{3}}{7 \cdot 400} \times 100 = 0,2 \approx 1 \text{ mm}^2 \quad (4.36)$$

Como a seção do condutor encontrada por meio do método de capacidade de condução de corrente foi a maior seção é considerada a seção de 4 mm².

4.4 DIMENSIONAMENTO DOS DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO

Para o dimensionamento dos dispositivos de proteção é necessário seguir as etapas descritas no Capítulo 3.

4.4.1 Dimensionamento dos fusíveis

O dimensionamento dos fusíveis para cada série segue o raciocínio apresentado no Capítulo 3. Nesse contexto, são calculadas, por meio das Equações 4.37 e 4.38, a tensão e a corrente totais que devem ser consideradas na aplicação da condição apresentada na Equação 3.27.

$$V_{oc_{total}} = V_{oc_{mdulo}} \times N^{\circ} \text{ de módulos em série} = 54,9 \times 2 = 109,8 \text{ V} \quad (4.37)$$

A corrente total é equivalente à corrente de circuito aberto do módulo, dado que a corrente somente se combina quando há paralelismo, uma condição que não se aplica quando se observa uma única série.

$$I_{sc_{total}} = I_{sc_{mdulo}} = 14,01 \text{ A} \quad (4.38)$$

Portanto, a condição do fusível, expressa pela Equação 3.27, é aplicada.

$$1,5 \cdot 14,01 < I_n < 2,4 \cdot 14,01 \rightarrow 21,06 < I_n < 33,624 \quad (4.39)$$

Por meio da condição é possível identificar que a corrente do fusível deve estar entre 21,06 A e 33,624 A, define-se, então, um fusível de 25 A para cada série de módulos.

Além disso, o fusível selecionado deve ser do tipo gPV, adequado para sistemas fotovoltaicos. Esse tipo de dispositivo proporciona proteção tanto contra sobrecargas quanto contra curtos-circuitos. Esse cuidado garante a segurança e o bom funcionamento do sistema.

4.4.2 Dimensionamento dos disjuntores - Corrente contínua

4.4.2.1 Disjuntor entre o arranjo dos módulos e o inversor

Como citado no Capítulo 3, a corrente do disjuntor deve ser superior à corrente total de curto-circuito do arranjo de módulos, que é calculada por meio da equação 4.40.

$$I \text{ total do sistema} = I_{sc} \times \text{Qtd de módulos em paralelo} = 14,01 \times 4 = 56,04 \text{ A} \quad (4.40)$$

Dessa forma, optou-se por um disjuntor de 60 A para garantir a proteção adequada do sistema.

4.4.2.2 Disjuntor entre a bateria e o inversor

Para garantir a segurança do sistema fotovoltaico, optou-se por um disjuntor de corrente contínua com capacidade de 60 A, de forma que a corrente entre a bateria e o inversor não ultrapasse o valor de corrente máxima suportada pelo inversor. Se fosse selecionado um disjuntor com corrente nominal superior à corrente suportada pelo inversor o dispositivo poderia queimar.

4.4.3 Dimensionamento dos disjuntores - Corrente alternada

Para realizar o dimensionamento do disjuntor localizado entre o inversor e as cargas é necessário aplicar a equação 3.28 apresentada no capítulo 3.

$$0,85 \cdot I_{\text{disjuntor}_{ca}} = \frac{\text{Potência Real do Inversor}}{\text{Tensão de Saída do Inversor} \cdot \sqrt{3}} = \frac{10.000}{400 \cdot \sqrt{3} \cdot 0,85} \approx 16 \text{ A} \quad (4.41)$$

Desta forma, será utilizado um disjuntor de corrente alternada com corrente nominal de 16 A.

4.5 DIAGRAMA UNIFILAR

A partir do desenvolvimento do projeto, se faz possível definir o diagrama unifilar para o sistema proposto, contendo as seções dos condutores e as especificidades de cada dispositivo. O sistema proposto foi desenvolvido de acordo com as normas descritas na NBR 5410:2004 da ABNT.

O desenvolvimento desse diagrama foi realizado por meio do software AutoCAD®[®], uma plataforma especializada na criação de desenhos técnicos bidimensionais. Essa escolha foi feita visando à precisão e detalhamento necessários para uma representação técnica eficiente do sistema.

Para o primeiro caso, onde existe um banco de baterias com autonomia de 1 dia, o diagrama unifilar para um arranjo está representado na Figura 4.1. Nesse caso, existem 15 arranjos. Todos os inversores de todos os arranjos chegam no barramento de cobre.

Já para o caso 2, onde existe um banco de baterias com autonomia de 2,36 dias, o diagrama unifilar de um arranjo está representado na Figura 4.2, para esse caso existem 26 arranjos, com todos com os inversores chegando no barramento de cobre.

A maior diferença entre o primeiro caso e o segundo é a quantidade de arranjos e a quantidade de baterias dispostas em paralelo, no primeiro caso existem duas baterias em paralelo, enquanto no segundo caso existem três baterias em paralelo.

Figura 4.1. Diagrama unifilar AutoCAD®- Caso 1 - Fuente: Autoria própria

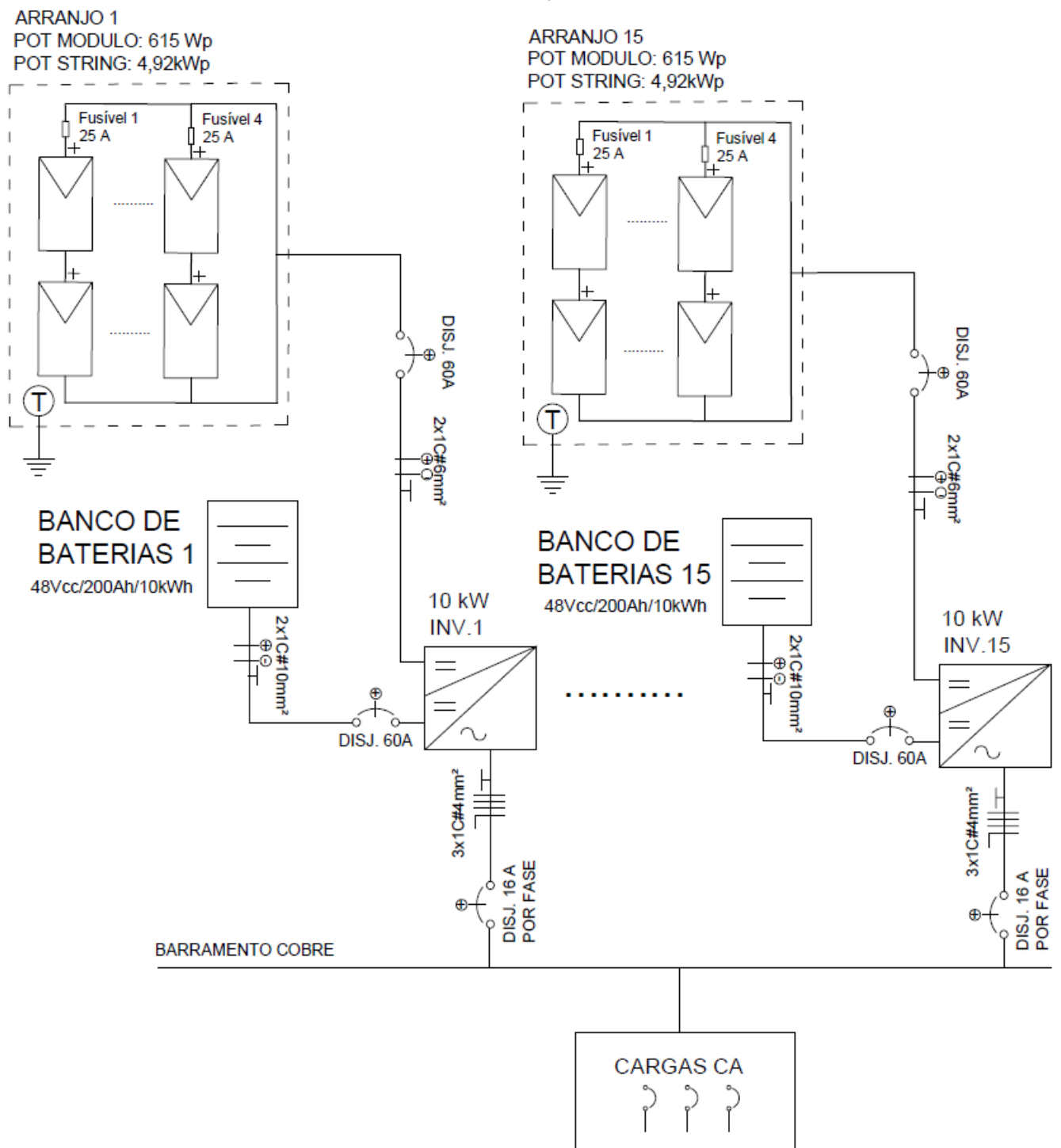
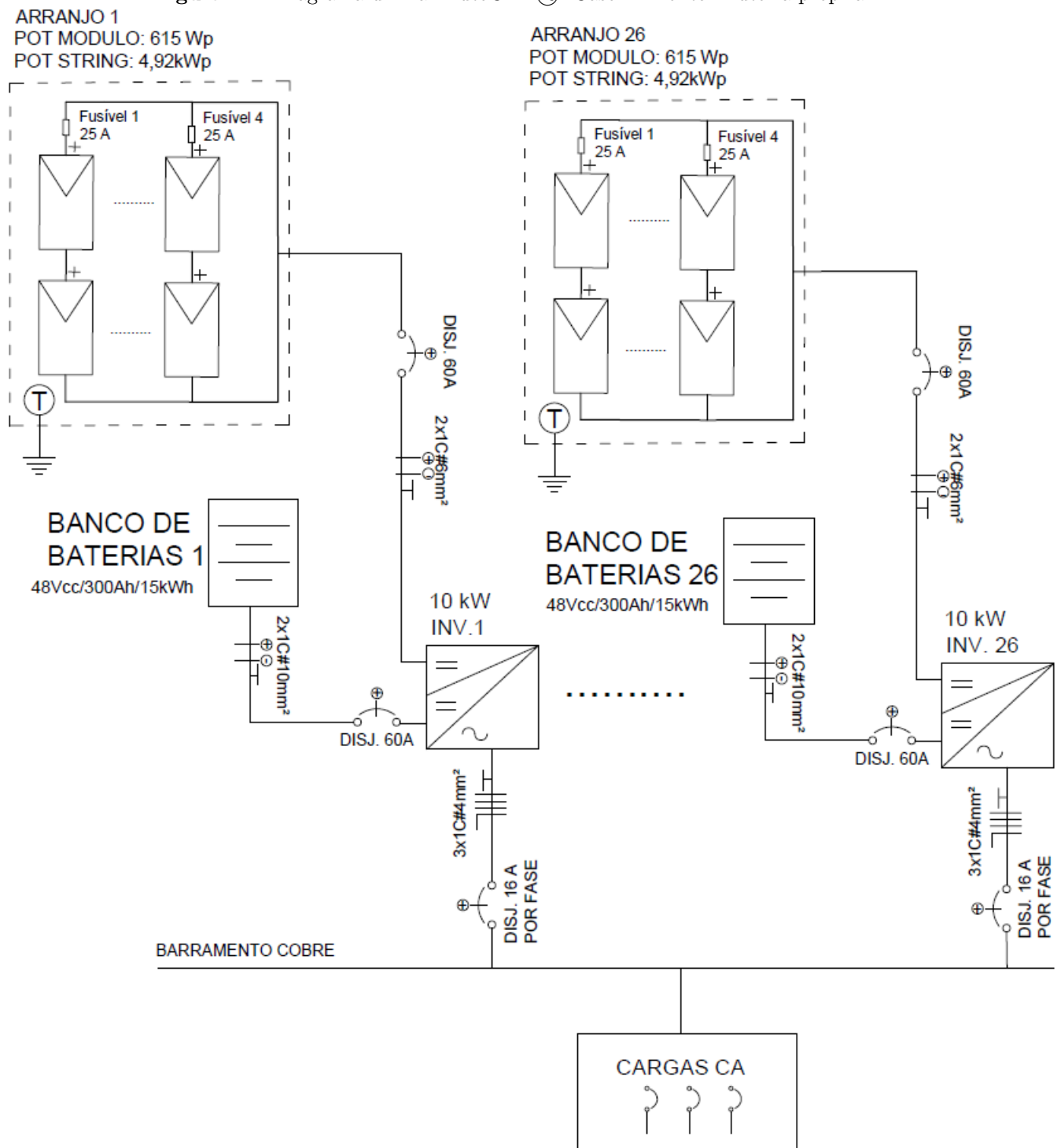


Figura 4.2. Diagrama unifilar AutoCAD®- Caso 2 - Fonte: Autoria própria



4.6 CUSTO DO EMPREENDIMENTO

Os cálculos realizados para determinar os custos do projeto consideraram apenas os principais componentes do sistema fotovoltaico, como os módulos, baterias e inversores. A quantidade

de cada componente foi estimada no dimensionamento detalhado do sistema fotovoltaico. Além disso, foram realizados cálculos distintos para cada um dos dois casos analisados: no primeiro caso, além do consumo diário da escola, incluiu-se um banco de baterias com 1 dia de autonomia e, no segundo caso, levou-se em conta o consumo diário da escola e um banco de baterias com autonomia de 2,36 dias.

Os valores atribuídos a cada dispositivo foram baseados na média de preços encontrados na internet. O custo total do sistema pode ser visualizado na Tabela 4.9.

Tabela 4.9. Custo total do sistema por caso - Fonte: Autoria própria

Caso	Dispositivo	Modelo	Marca	Quantidade	Valor médio	Valor total
1	Módulos	SS-BG615-78MDH(T)	SunNova Solar	120	R\$ 700,00	R\$ 84.000,00
	Bateria	UPLFP48 - 100 3U	Unipower	30	R\$ 8.000,00	R\$ 240.000
	Inversor	PH30-10048-T	Must	15	R\$ 5.500,00	R\$ 82.500,00
					Valor total Caso 1	R\$ 406.500,00
2	Módulos	SS-BG615-78MDH(T)	SunNova Solar	204	R\$ 700,00	R\$ 142.800,00
	Bateria	UPLFP48 - 100 3U	Unipower	78	R\$ 8.000,00	R\$ 624.000,00
	Inversor	PH30-10048-T	Must	26	R\$ 5.500,00	R\$ 143.000,00
					Valor total Caso 2	R\$ 909.800,00

A tabela 4.9 fornece uma estimativa dos custos associados aos componentes destacados. É importante observar que esses valores são apenas uma estimativa inicial, e para uma análise mais abrangente, deve-se incluir os custos adicionais relacionados à mão de obra, dispositivos de proteção, condutores e à construção de um espaço destinado à disposição dos dispositivos.

Apesar de apresentar um investimento inicial considerável, existe uma economia gerada a partir do sistema fotovoltaico. Dependendo da região e sua distância das sedes de municípios o valor do litro do diesel pode passar de R\$7,00 (WWF, 2020), dessa forma, para uma instalação que consome uma quantidade tão grande de energia assim como uma escola, o investimento somente com diesel é considerável.

A partir do valor encontrado de demanda total da escola, por meio da equação 3.1, assume-se que seria necessário um gerador de, no mínimo, 17 kVA para suportar o consumo da escola. De acordo com uma matéria publicada um gerador desse porte consome aproximadamente 4 Litros de diesel por hora (LOXAM, 2022). Dessa maneira, considerando que uma instituição de ensino opera por aproximadamente 8 horas diárias e que um ano acadêmico abrange, aproximadamente, 200 dias letivos, estima-se que seriam necessários 6.400 litros de diesel para proporcionar energia elétrica contínua durante todo o ano para a escola.

Considerando um valor médio de R\$7,00 por litro, o gasto total do governo com a escola no

final do ano seria de aproximadamente:

$$\text{Gasto total} = 6400 \text{ litros} \times \text{R\$ } 7,00/\text{litro} = \text{R\$ } 44.800,00 \quad (4.42)$$

Portanto, considerando o custo por litro, ao final do ano, o governo gastaria, aproximadamente, R\$ 44.800,00 com o consumo de diesel na escola.

4.6.1 *Payback* caso 1

Para calcular o tempo de *payback* do investimento basta dividir o valor do investimento inicial descrito na Tabela 4.9 pelo valor de despesa anual calculado por meio da equação 4.42.

Para o primeiro caso é possível definir o tempo aproximado de *payback* por meio da equação 4.43.

$$\text{Tempo de } \textit{payback} \text{ - Caso 1} = \frac{406.500}{44.800} \approx 9 \text{ anos} \quad (4.43)$$

4.6.2 *Payback* caso 2

Já para o segundo caso, é possível definir o tempo aproximado de *payback* por meio da equação 4.44.

$$\text{Tempo de } \textit{payback} \text{ - Caso 2} = \frac{909.800}{44.800} \approx 21 \text{ anos} \quad (4.44)$$

4.7 QUANTIDADE DE GASES DE EFEITO ESTUFA PROVENIENTES DO GERADOR A DIESEL

A utilização do diesel está atrelada a emissão de gases de efeito estufa, estima-se que cada litro de diesel consumido emite por volta de 2,779 kg de CO₂ (WWF, 2020). Foi estimado que em um ano letivo a escola consome, aproximadamente, 6.400 litros de diesel. Dessa forma, é possível estimar a quantidade aproximada de CO₂ emitido por meio da equação 4.46.

De acordo com a relação entre o consumo de diesel e a emissão de CO₂:

$$\text{CO}_2 \text{ emitido} = \text{Litros de diesel} \times \text{Emissão por litro} \quad (4.45)$$

Considerando 6.400 litros de diesel:

$$\text{CO}_2 \text{ emitido} = 6400 \times 2,779 = 17.785,6 \text{ kg de CO}_2 \quad (4.46)$$

Desta forma, estima-se que a comunidade irá deixar de emitir 17.785,6 kg de CO₂ por ano. Então, apesar da instalação de um sistema fotovoltaico *off-grid* representar um investimento financeiro considerável existe um *payback* relacionado a sustentabilidade e um impacto social considerável para as pessoas abarcadas pelo sistema.

4.8 INVESTIDORES DO PROJETO

"Só pela melhora da qualidade de vida e impactos ambientais já se justificaria solarizar as comunidades isoladas" (WWF, 2020), porém entende-se que esse é um investimento considerável, mas é, também, um investimento necessário, capaz de proporcionar uma melhora significativa na qualidade de vida de uma parcela grande da população. Conforme mencionado no Capítulo 2, existem diversos programas governamentais voltados para o fornecimento de energia elétrica a comunidades isoladas, como o "Mais Luz para a Amazônia" e o "Luz para Todos". Esses programas representam possibilidades de financiamento para o projeto para a Escola Alacy Pena Vieira.

Além disso, inúmeras organizações demonstram um compromisso em melhorar a qualidade de vida das pessoas por meio de soluções sustentáveis de iluminação e empoderar agentes de transformação (LUZ, 2022). Como, por exemplo, a *Winrock International Brazil* que tem como um de seus objetivos promover o uso de energia solar e outras fontes de energia limpa, como uma forma de aumentar o acesso à energia elétrica para os 1,6 milhões de pessoas que vivem sem eletricidade no mundo.

Assim, o investimento necessário para executar o projeto proposto para a Escola Alacy Pena Vieira se encaixa em um cenário abrangente de programas governamentais e entidades dedicadas à aprimorar as condições de vida da parcela da população em situação de vulnerabilidade social

por meio de alternativas de iluminação sustentável. Isso realça a relevância e viabilidade do projeto em questão.

4.9 TREINAMENTO DA POPULAÇÃO E MANUTENÇÃO DO SISTEMA

Uma publicação resultante da colaboração entre a World Wildlife Fund (WWF) e a Fundação Mott, que aborda os aprendizados adquiridos a partir de dez projetos de energia fotovoltaica *off-grid* na Amazônia, revela várias conclusões importantes. Entre essas conclusões, é citado que boa parte dos sistemas instalados para a população foram além da instalação em si. Houve uma importante componente social, que envolveu a realização de eventos de capacitação e a prestação de orientações sobre o gerenciamento de energia. Ficou evidente a importância de educar as pessoas que, antes da instalação desses sistemas, tinham acesso limitado à eletricidade. É crucial que essa população seja instruída sobre como otimizar o uso da energia e compreender a necessidade de cuidar do sistema, garantindo sua vida útil (WWF, 2020).

A manutenção dos sistemas fotovoltaicos *off-grid* é imprescindível para o seu bom funcionamento e conservação. Dessa forma, sugere-se que, além da instalação do sistema na Escola Alacy Pena Vieira, seja realizado um programa de treinamento direcionado à comunidade local. Isso permitirá que as pessoas utilizem o sistema de maneira segura e adotem práticas adequadas para preservar sua durabilidade. Além disso, é fundamental conscientizar a comunidade sobre a importância da manutenção periódica, com a destinação de uma parte dos recursos economizados com a substituição do diesel para a realização dessas manutenções.

Essa abordagem visa garantir que o sistema de energia fotovoltaica não seja apenas uma solução energética, mas também um instrumento de empoderamento e desenvolvimento sustentável para a comunidade, contribuindo para um futuro melhor para essa parcela da população.

4.10 DESCARTE ADEQUADO DOS COMPONENTES

Apesar dos sistemas fotovoltaicos representarem uma ótima opção para as comunidades isoladas, entende-se que os componentes do sistema possuem um tempo de vida útil finita, tendo que ser substituídos após um período de tempo. Por exemplo, os módulos fotovoltaicos

têm uma média de vida útil de 25 a 30 anos (BV, 2023). No ano de 2010, foi instituída a Lei nº 12.305/2010, que regulamentou a Política Nacional de Resíduos Sólidos no Brasil. Esta política visa aprimorar a gestão de resíduos sólidos no país, promovendo a reciclagem, eliminando os lixões e estabelecendo responsabilidade às empresas sobre o descarte apropriado dos resíduos.

No entanto, a reciclagem ainda não é amplamente adotada no Brasil, apenas 4% dos quase 82 milhões de toneladas de resíduos geradas em 2022 foi reciclado (NACIONAL, 2023). E isso é preocupante, uma vez que a reciclagem de materiais oferece diversos benefícios, incluindo vantagens sustentáveis, como a redução da exploração de recursos naturais, benefícios econômicos e sociais, através do apoio a cooperativas que proporcionam meios de subsistência dignos para as pessoas.

Dado que um dos principais objetivos deste projeto é fornecer uma solução sustentável com impacto social, é crucial que os componentes do sistema sejam reciclados e reutilizados após o término de sua vida útil. De acordo com a Agência Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (Absolar) painéis solares são extremamente recicláveis. Atualmente, é possível aproveitar mais de 90% dos materiais que compõem os módulos fotovoltaicos (ABSOLAR, 2021).

Quanto às baterias, Marco Togniazolo, gerente de engenharia de baterias da Unicoba, uma das principais empresas de soluções energéticas no Brasil, afirma que é viável reciclar baterias. No caso das baterias de chumbo, 100% dos materiais podem ser reciclados, e no caso das baterias de lítio, as opções de reciclagem variam de acordo com o tipo de célula utilizada (BADRA, 2022a). Portanto, a escolha cuidadosa da bateria para este projeto foi bastante relevante.

4.11 IMPACTOS SOCIAIS E FINANCEIROS

A implementação do sistema fotovoltaico *off-grid* na escola traz inúmeros benefícios, indo muito além do aumento na confiabilidade no fornecimento de energia elétrica. O sistema representa um ganho significativo em segurança.

Além disso, o projeto proporciona um maior conforto no ambiente escolar e abre portas para a inclusão digital na escola. Além de proporcionar melhorias no armazenamento de alimentos, fator que permite que a escola reduza sua dependência de alimentos ultraprocessados, frequen-

temente repletos de conservantes, em prol de uma alimentação mais saudável e equilibrada para os estudantes (ANTUNES, 2021).

A introdução do sistema fotovoltaico também viabiliza a aquisição de equipamentos que possam facilitar o processo de aprendizado, como computadores e projetores, melhorando a qualidade do ensino. Com uma energia elétrica confiável é possível realizar a extensão do horário de funcionamento da escola criando a oportunidade de oferecer aulas noturnas, ampliando o acesso à educação.

Além disso, a escola pode se transformar em um centro comunitário, beneficiando toda a comunidade da cidade. Surge, também, a possibilidade de oferecer cursos técnicos sobre a manutenção do sistema fotovoltaico, contribuindo para o desenvolvimento de habilidades para a população. É importante notar que, de acordo com um trabalho publicado pelo WWF, sobre projetos fotovoltaicos semelhantes, a comunidade assumiu a manutenção e a gestão dos sistemas (WWF, 2020).

Além disso, o projeto realizado pela WWF, cita análises feitas em uma escola. Essas demonstraram que o governo federal deixou de gastar R\$ 35.000,00 por ano em diesel após a implementação do sistema fotovoltaico. Esses fundos foram redirecionados para melhorar a qualidade da merenda escolar (WWF, 2020). Estima-se que os gastos com diesel para a escola Alacy Pena Vieira é de, aproximadamente, R\$ 44.800,00 assim como apresentado na equação 4.42.

Essas conclusões ressaltam a importância da implementação de sistemas fotovoltaicos *off-grid* em escolas e seus benefícios abrangentes para a segurança, para o ensino, para a comunidade local e para a economia de recursos financeiros.

4.12 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No decorrer deste capítulo, foram realizados os cálculos e o dimensionamento dos componentes para o sistema fotovoltaico *off-grid* proposto para a Escola Alacy Pena Vieira, sendo apresentados dois cenários distintos. No primeiro caso, configurou-se um sistema com um banco de baterias proporcionando autonomia de 1 dia. Essa configuração inclui 15 arranjos fotovoltaicos, cada um composto por 8 módulos fotovoltaicos (2 em série e 4 em paralelo), 1

inversor e duas baterias em paralelo, totalizando uma potência de 73.800 Wp. Já no segundo caso, com uma autonomia estendida de 2,36 dias, foram utilizados 26 arranjos, variando apenas na quantidade de baterias (três em paralelo), resultando em uma potência total de 125.460 Wp. Essas análises foram representadas nos diagramas Unifilares apresentados no capítulo, fornecendo uma compreensão clara das disposições e das conexões dos componentes do sistema fotovoltaico proposto.

Em seguida foram apresentados os resultados socioambientais e financeiros esperados a partir da implementação do sistema fotovoltaico na localidade proposta. É previsto uma significativa redução na emissão CO₂, aproximadamente 17.785,6 kg por ano, além de uma economia financeira anual de, aproximadamente, R\$ 44.800,00. Adicionalmente, foram destacados vários benefícios sociais que serão proporcionados à comunidade atendida pelo sistema. Vale ressaltar a relevância do tópico abordado referente ao descarte adequado e à manutenção do sistema fotovoltaico.

No próximo capítulo, será apresentada uma conclusão sobre o trabalho como um todo, consolidando os principais achados e contribuições apresentados ao longo do estudo.

CONCLUSÕES

Os resultados apresentados demonstram o impacto positivo da instalação de sistemas fotovoltaicos *off-grid* em comunidades isoladas, onde a ausência de acesso à energia elétrica é um obstáculo significativo. Com os projetos governamentais em vigor, a inclusão de mais pessoas no desenvolvimento social e no mundo digital torna-se cada vez mais possível. Este investimento, especialmente em instituições de ensino, desempenha um papel crucial na mitigação das disparidades sociais e na promoção de uma educação de qualidade nessas regiões.

Os sistemas fotovoltaicos oferecem vantagens sociais, econômicas e ambientais. Reduzem os gastos governamentais e da população com combustíveis fósseis, limitando as emissões de CO₂ na atmosfera, um passo importante no combate às mudanças climáticas globais.

Ambos os casos apresentados trazem benefícios consideráveis. Porém, o segundo caso se destaca como mais vantajoso, garantindo uma confiabilidade maior no fornecimento de energia. Este arranjo específico é composto por 26 arranjos, cada um com de 8 módulos fotovoltaicos, um inversor de 10 kW e três baterias totalizando 15 kWh de potência. O sistema oferece uma capacidade total de 125.460 Wp, assegurando o abastecimento da escola e de um banco de baterias com 2,36 dias de autonomia.

O investimento inicial para a instalação desses componentes gira em torno de R\$ 909.800,00. Apesar de representar um valor considerável, o sistema fotovoltaico resulta em uma economia anual de R\$ 44.800,00 ao eliminar a necessidade de compra de diesel para sustentar os geradores. Os recursos economizados podem ser redirecionados para melhorias estruturais e de serviços na escola, como alimentação e infraestrutura. Além disso, a eliminação do consumo de diesel pela escola representa uma redução anual de 17.785,6 kg nas emissões de CO₂.

Quanto a possíveis investidores, como citado previamente existem diversos programas governamentais focados em levar fontes de energia elétrica confiáveis para comunidades isoladas. Além disso, diversas organizações não governamentais, em parceria com empresas privadas,

atuam no desenvolvimento de projetos como estes.

Por se tratar de uma região remota, o acesso para a realização de manutenções preventivas e correções em possíveis falhas do sistema se tornam um desafio. Dessa forma, sugere-se que atrelado à instalação do sistema fotovoltaico exista um treinamento e uma capacitação da população para que eles possam corrigir falhas pontuais e manter o sistema em seu pleno funcionamento.

Por fim, espera-se que os resultados deste projeto sejam reconhecidos pelas autoridades responsáveis pela expansão de energia em regiões isoladas e que o projeto desenvolvido possa servir como um manual que possa ser adaptado e replicado para outras instituições de ensino. Dessa forma, é relevante definir tópicos a serem abordados por projetos futuros:

- Desenvolvimento de cursos de capacitação em energia fotovoltaica para as comunidades próximas aos sistemas fotovoltaicos;
- Estudos de viabilidade para a instalação em larga escala de sistemas fotovoltaicos em escolas sem acesso à energia convencional;
- Análise da viabilidade para a implementação de novos projetos governamentais que facilitem o uso de fontes renováveis de energia em comunidades isoladas;
- Exploração de outras fontes de energia, como o uso de biodigestores, para aprimorar a infraestrutura energética existente nessas comunidades;
- Elaboração de estudos econômicos focados em viabilizar ainda mais o investimento em regiões isoladas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

2030, G. D. T. D. S. C. P. A. A. Vi relatório luz da sociedade civil da agenda 2030 de desenvolvimento sustentável Brasil. 2022. Citado 3 vezes nas páginas v, 7, and 8.

ABNT. *NORMA BRASILEIRA 5410*. 2004. Disponível em: <https://docente.ifrn.edu.br/jeangaldino/disciplinas/2015.1/instalacoes-eletricas/nbr-5410>. Acessado em: Junho de 2023. Citado 6 vezes nas páginas vii, 31, 65, 66, 67, and 68.

ABSOLAR. *Painéis solares: mitos e verdades sobre o descarte dos equipamentos*. 2021. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/noticia/paineis-solares-mitos-e-verdades-sobre-o-descarte-dos-equipamentos/>: :text=PainAcessado em: Outubro de 2023. Citado na página 78.

ANTUNES, D. I. *Alimentos ultraprocessados*. 2021. Acessado em: Novembro de 2023. Disponível em: <http://biotecnutri.sites.uff.br/alimentos-ultraprocessados/>. Citado na página 79.

BADRA, M. *Painéis solares: Baterias de lítio: é possível reciclar?* 2022. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/baterias-de-litio-e-possivel-reciclar/>. Acessado em: Outubro de 2023. Citado na página 78.

BADRA, M. *Recorde mundial: célula solar tandem atinge 32,5 eficiência*. 2022. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/recorde-mundial-celula-solar-tandem-atinge-325-de-eficiencia/>. Acessado em: Outubro de 2023. Citado na página 17.

BARRETT, D. H.; HARUNA, A. Artificial intelligence and machine learning for targeted energy storage solutions. *Current Opinion in Electrochemistry*, Elsevier, v. 21, p. 160–166, 2020. Acessado em: Outubro de 2023. Citado na página 18.

BRASIL, A. *Histórico das Células Fotovoltaicas e a Evolução da Utilização de Energia Solar*. s.d. Disponível em: https://ambientes.ambientebrasil.com.br/energia/energia_solar/historico_das_celulas_fotovoltaicas_e_evolucao_da_utilizacao_de_energia_solar. Acessado em: Outubro de 2023. Citado na página 17.

BRASIL, L. M. *Mais de 10 mil escolas sem água e 3,8 mil sem energia elétrica*. 2022. Disponível em: <https://www.otempo.com.br/politica/governo/escolas-sem-energia-eletrica-ainda-sao-obstaculo-para-inclusao-digital-no-brasil-1.2659327>. Acessado em: Junho de 2023. Citado na página 2.

BRASIL, N. U. *O que são as mudanças climáticas?* 2023. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/175180-o-que-s>Acessado em: Outubro de 2023. Citado na página 9.

BRASIL, N. U. *Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 1 Erradicação da pobreza*. s.d. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/1>. Acessado em: Junho de 2023. Citado na página 9.

BRASIL, N. U. *Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 10 Redução das desigualdades*. s.d. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/10>. Acessado em: Junho de 2023. Citado na página 8.

BRASIL, N. U. *Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 11 Cidades e comunidades sustentáveis*. s.d. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/11>. Acessado em: Junho de 2023. Citado na página 9.

BRASIL, N. U. *Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 4 Educação de qualidade*. s.d. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/4>. Acessado em: Junho de 2023. Citado na página 9.

BRASIL, N. U. *Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 7 Energia limpa e acessível*. s.d. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/7>. Acessado em: Junho de 2023. Citado na página 7.

BRASIL, N. U. *Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 8 Trabalho decente e crescimento econômico*. s.d. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/8>. Acessado em: Junho de 2023. Citado na página 9.

BRASIL, N. U. *Sobre o nosso trabalho para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil*. s.d. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acessado em: Junho de 2023. Citado na página 7.

BRASIL, W. *Iniciativa em parceria com o ICMBio visa melhorar a infraestrutura da produção extrativista nas Resex e promover a interação das comunidades com energia limpa*. 2017. Disponível em: <https://www.wwf.org.br/?59382/WWF-leva-energia-solar-fotovoltaica-para-Resex-no-sul-do-Amazonas>. Acessado em: Julho de 2023. Citado na página 14.

BV. *Qual é a durabilidade do painel solar? Veja 5 dicas para cuidar dele!* 2023. Acessado em: Novembro de 2023. Disponível em: <https://www.bv.com.br/bv-inspira/financiamento-para-energia-solar/durabilidade-painel-solar#:~:text=Indo%20direto%20ao%20ponto%2C%20a,pode%20ultrapassar%20os%2040%20anos>. Citado na página 78.

CCST, C. d. C. d. S. T. *Mudança Climática e urbanização arriscada agravaram danos de chuva no Nordeste, diz estudo de atribuição*. 2022. Disponível em: <http://www.ccst.inpe.br/mudanca-climatica-e-urbanizacao-arriscada-agravaram-danos-de-chuva-no-nordeste-diz-estudo-de-atribuicao/>:text=OsAcessado em: Junho de 2023. Citado na página 2.

CHARGETEK. *Charging Basics*. s.d. Disponível em: <https://www.chargetek.com/chargingbasics.html>. Acessado em: Novembro de 2023. Citado 2 vezes nas páginas v and 13.

CRESESB. *Potencial Solar - SunData*. 2018. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>. Acessado em: Março de 2023. Citado 2 vezes nas páginas vi and 30.

EDU. *Alacy Pena Vieira*. 2022. Disponível em: <https://qedu.org.br/escola/15075966-e-m-e-f-alacy-pena-vieira>. Acessado em: Junho de 2023. Citado 3 vezes nas páginas 2, 29, and 30.

ELETROBRAS. *Qual é a durabilidade do painel solar? Veja 5 dicas para cuidar dele!* 2010. Acessado em: Dezembro de 2023. Disponível em: <<https://www.cgti.org.br/publicacoes/wp-content/uploads/2016/03/Energia-Solar-Fotovoltaica-e-Universalizac%CC%A7a%CC%83o-do-Atendimento-de-Energia-Ele%CC%81trica-em-A%CC%81reas-Remotas.pdf>>. Citado na página 21.

ELETROBRAS. *Projetos Experimentais*. 2017. <<https://eletrobras.com/en/Paginas/Projetos-Experimentais.aspx>>. Acessado em: Outubro de 2023. Citado na página 20.

ENERGIA, M. de Minas e. *Especificações Técnicas dos Programas para Atendimento às Regiões Remotas dos Sistemas Isolados no âmbito do Programa Luz para Todos*. 2017. Disponível em: https://www.mme.gov.br/luzparatodos/downloads/especificacoes_tecnicas.pdf. Acessado em: Julho de 2023. Citado 2 vezes nas páginas 15 and 16.

ENERGIA, M. de Minas e. *MANUAL DE OPERACIONALIZAÇÃO DO PROGRAMA MAIS LUZ PARA A AMAZÔNIA*. 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/arquivos/manual-de-operacionalizacao-do-programa-mais-luz-para-a-amazonia-edicao-final.pdf>. Acessado em: Julho de 2023. Citado na página 16.

ENERGIA, M. de Minas e. *Luz para todos - Sobre o Programa*. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/destaques/Programa>. Acessado em: Julho de 2023. Citado na página 15.

ENERGIA, M. de Minas e. *Brasil bate recorde de expansão da energia solar em 2023*. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/brasil-bate-recorde-de-expansao-da-energia-solar-em-2023>: :text=DoAcessado em: Outubro de 2023. Citado na página 17.

ENERGIA, P. *Etapas de carregamento das baterias para energia solar fotovoltaica*. 2018. Disponível em: <https://www.portal-energia.com/etapas-carregamento-baterias-para-energia-solar-fotovoltaica/>. Acessado em: Novembro de 2023. Citado na página 12.

FILHO, W. P. B.; FERREIRA, W. R.; AZEVEDO, A. C. S. de; COSTA, A. L.; PINHEIRO, R. B. Expansão da energia solar fotovoltaica no Brasil: impactos ambientais e políticas públicas. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, v. 4, p. 628–642, 2015. Acessado em: Outubro de 2023. Citado na página 18.

FUTURE, E. *O impacto social que a energia leva às comunidades em locais remotos*. 2023. Disponível em: <https://www.energyfuture.com.br/case-energisa-leva-energia-limpa-e-renovavel-para-a-vila-restauracao-no-acre>: :text=UmAcessado em: Junho de 2023. Citado na página 3.

GOV, A. *Luz Para Todos tem previsão de R\$2,5 bilhões em investimentos para 2024*. 2023. Acessado em: Dezembro de 2023. Disponível em: <>. Citado na página 15.

GROUP, P. *Afumex Solar - 0,6/1 kV A.C. / 0,9/1,8 kV D.C.* 2016. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br>. Acessado em: Novembro de 2023. Citado 2 vezes nas páginas vi and 29.

IEMA. *Um milhão estão sem energia elétrica na Amazônia, mostra IEMA*. 2019. Disponível em: <https://energiaeambiente.org.br/um-milhao-estao-sem-energia-eletrica-na-amazonia-20191125>. Acessado em: Junho de 2023. Citado 2 vezes nas páginas v and 3.

INOVE, S. *Painel solar: o que é, como funciona e tipos*. 2023. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br>. Acessado em: Junho de 2023. Citado na página 11.

INPE. *Atlas Brasileiro de Energia Solar 2ª edição*. 2017. Disponível em: <http://mtc-m21b.sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/08.15.18.20/doc/thisInformationItemHomePage.html>. Acessado em: Outubro de 2023. Citado na página 17.

JUNIOR, J. d. S. L.; PEREIRA, J. I. M.; LIRA, R. de L. Sistema individual de energia elétrica com fonte intermitente fotovoltaico off grid implantada em uma habitação ribeirinha no município de manacapuru-am. *Brazilian Journal of Development*, v. 7, n. 12, p. 118458–118475, 2021. Citado na página 19.

JÚNIOR, P. D. S. R. *Dimensionamento de Condutores Queda de tensão*. s.d. Acessado em: Novembro de 2023. Disponível em: [https://www.eletrica.ufpr.br/sebastiao/wa_files/te344%20aula%2016%20-%20dimensionamento%20de%20condutores%20e%20queda%20de%20tensao_\(1\).pdf](https://www.eletrica.ufpr.br/sebastiao/wa_files/te344%20aula%2016%20-%20dimensionamento%20de%20condutores%20e%20queda%20de%20tensao_(1).pdf). Citado na página 49.

LEITE, M. B. A. *Principais Acidentes com Petróleo e Derivados no Brasil*. s.d. Disponível em: https://ambientes.ambientebrasil.com.br/energia/acidentes_ambientais/principais_acidentes_com_petroleo_julhode2023. Citado na página 14.

LOXAM. *Saiba quantos kW gera o Gerador de Energia 25 kVA (Diesel)*. 2022. Disponível em: <https://degraus.com.br/saiba-quantos-kw-gera-o-gerador-de-energia-25-kva-diesel/>: :text=O Acessado em: Novembro de 2023. Citado na página 74.

LUZ, L. de. *Litro de Luz - Sobre nós*. 2022. Disponível em: <https://www.litrodeluz.com/sobre-nos>. Acessado em: Outubro de 2023. Citado na página 76.

MAPS, G. *Localização Escola Alacy Pena Vieira*. 2023. Disponível em: <https://www.google.com/maps/@-1.831707,-49.6793819,14z/data=!3m1!4b1!4m6!3m5!1s0x92a2cbca63d6fb61:0x7ceb9d7fc5e01447!8m2!3d-1.831707!4d-49.6588251!16s> Acessado em: Março de 2023. Citado 3 vezes nas páginas v, 30, and 31.

MIRANDA, S. *Inversor solar, o que é e para que serve?* 2022. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/solar-o-que-e-e-pra-que-serve/>: :text=OffAcessado em: Junho de 2023. Citado na página 13.

NACIONAL, J. *Dia Mundial da Reciclagem: 96Brasil não são reaproveitados.* 2023. Disponível em: <https://g1.globo.com/jornal-nacional/noticia/2023/05/17/dia-mundial-da-reciclagem-96percent-dos-residuos-produzidos-no-brasil-nao-sao-reaproveitados.ghtml>. Acessado em: Outubro de 2023. Citado na página 78.

NAVARRO, A. de la V.; GARG, A.; HAHMANN, A. N.; KHENNAS, S.; AZEVEDO, I. M.; LÖSCHEL, A.; SINGH, A. K.; STEG, L.; STRBAC, G.; WADA, K. *WG III contribution to the Sixth Assessment Report.* 2021. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/Junhode2023.Citadonapagina2>.

PERUZZO, E. S.; JUNIOR, G. P. *Painel solar: o que é, como funciona e tipos.* s.d. Disponível em: <https://blog.solarinove.com.br/qual-a-diferenca-entre-o-modulo-monocristalino-e-o-policristalino/>. Acessado em: Junho de 2023. Citado na página 11.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos.* [S.l.]: Grupo de Trabalho de Energia Solar - GTES, CEPEL - DTE - CRESESB, 2014. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/ManualdeEngenhariaFV2014.pdf>. Acessado em: Julhode2023. Citado2vezesnaspginas37and 58.

(PITÁGORAS), W. M. L.; ENERGY), M. H. de M. L. C.; (UNILESTE), B. L. de M. L. *Aplicação da gestão energética como ferramenta de redução estratégica de custos nas escolas públicas municipais de Belo Horizonte/MG.* 2012. Disponível em: <file:///D:/teams/cbc,+XXIICongressoartigo0>. Outubrode2023. Citado4vezesnaspginasv, vi, 23, and 24.

PÚBLICA, A. *Retrato das injustiças no acesso à energia elétrica.* 2022. Disponível em: <https://outraspalavras.net/outrasmidias/retrato-das-injusticas-no-acesso-a-energia-eletrica/>: :text=Fal em: Junho de 2023. Citado na página 3.

RAÍZEN, T. D. S. D. *Mudanças Climáticas: Causas e Impactos Globais.* 2022. Disponível em: <https://www.raizen.com.br/blog/mudancas-climaticas>. Acessado em: Outubro de 2023. Citado na página 10.

SCHUTZE, A.; BINES, L.; ASSUNÇÃO, J. *Rios de Diesel na Amazônia Legal: Por que a Região*

com as Maiores Hidrelétricas do País Depende de Combustível Caro e Poluente? 2022. Disponível em: <https://www.climatepolicyinitiative.org/wp-content/uploads/2022/06/Rios-de-Diesel-na-Amazonia-Legal.pdf>. Acessado em: Junho de 2023. Citado 2 vezes nas páginas 3 and 4.

SILVA, A. A. da; SILVA, T. D.; RIBEIRO, E. A. N.; LOPES, R. S. Vantagens e desvantagens de implementação do sistema off-grid em zonas rurais: uma revisão. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 16, p. e405111638316–e405111638316, 2022. Citado na página 20.

SILVA, R. M. da. *ENERGIA SOLAR NO BRASIL: dos incentivos aos desafios*. 2015. Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/publicacoes/estudos-legislativos/tipos-de-estudos/textos-para-discussao/td166>. Acessado em: Outubro de 2023. Citado na página 19.

SOARES, F. K.; LOUREIRO, M. H. C.; MATOS, R. A. D. S. Balanço energético nacional 2020 - relatório síntese/ano base 2019. EPE - Empresa de Pesquisa Energética, 2020. Citado na página 13.

SOLAR, P. *Bateria solar: o que é, tipos e como funciona?* s.d. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/solar.html>. Acessado em: Junho de 2023. Citado na página 12.

SOLAR, P. *Controlador de carga: o que é, qual a função, como funciona, tipos e quanto custa.* s.d. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/controlador-de-carga>. Acessado em: Junho de 2023. Citado na página 11.

SOLAR, P. *Inversor solar: o que é, como funciona e como escolher.* s.d. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/inversor-solar-o-que-e>. Acessado em: Junho de 2023. Citado na página 13.

SUNNOVA. *Tangra L Pro 600 - 615 W*. s.d. Disponível em: https://www.sunova-solar.com/fileadmin/daten/downloads/data_sheets/3_L-Size/Tangra_L_Pro_S-BG600615-78MDH_T.pdf. Acessado em: Novembro de 2023. Citado 2 vezes nas páginas vi and 27.

SYSTEM, M. S. P. *Low Frequency On/Off Grid Hybrid Solar Inverter - PH3000 Series (10-12KW)*. s.d. Disponível em: <https://www.mustsolar.com/wp-content/uploads/2016/05/33-PH3000-10-12K.pdf>. Acessado em: Novembro de 2023. Citado 2 vezes nas páginas vi and 28.

