

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

JÚLIA SOFIA BENGALY ZAMZOOM

GRAZIELA LUCIO PETRONZELLI

**SISTEMA DE MICROGRID COM GERAÇÃO DE ENERGIA
AUTOSSUSTENTÁVEL PARA ESTAÇÕES DO TRANSPORTE PÚBLICO DE
CURITIBA**

CURITIBA

2022

**JÚLIA SOFIA BENGALY ZAMZOOM
GRAZIELA LUCIO PETRONZELLI**

**SISTEMA DE MICROGRID COM GERAÇÃO DE ENERGIA
AUTOSSUSTENTÁVEL PARA ESTAÇÕES DO TRANSPORTE PÚBLICO DE
CURITIBA**

**Microgrid system with self-sustainable energy generation to Curitiba's public
transport stations**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Elétrica do Curso de
Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica
Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Prof. Dr. Eloi Rufato Junior

CURITIBA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

JÚLIA SOFIA BENGALY ZAMZOOM

GRAZIELA LUCIO PETRONZELLI

**SISTEMA DE MICROGRID COM GERAÇÃO DE ENERGIA
AUTOSSUSTENTÁVEL PARA ESTAÇÕES DO TRANSPORTE PÚBLICO DE
CURITIBA**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Elétrica do Curso de
Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica
Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Prof. Dr. Eloi Rufato Junior

Data de aprovação: 22/novembro/2022

Nastasha Salame da Silva
Doutora em Sistemas de Energia
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Ubirajara Zoccoli
Mestrado em Tecnologias Energéticas
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Eloi Rufato Junior
Doutor em Engenharia Elétrica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

CURITIBA

2022

Dedicamos este trabalho à nossas famílias e amigos que estiveram ao nosso lado durante toda a jornada da graduação. Também dedicamos aos nossos professores, essenciais em nossas formações cívicas e profissionais.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos de forma especial e carinhosa aos nossos pais, irmãos e amigos pelos conselhos, paciência e apoio. Agradecemos por serem parte de nossas vidas e por estarem aos nossos lados em cada conquista e desafio.

Agradecemos ao nosso tempo na Universidade, onde cultivamos relações e conhecimentos para a vida toda.

RESUMO

O cenário atual de transição e avanço energético mundial demanda pelo desenvolvimento sustentável, pressionando os mercados a implementarem sistemas baseados em energias renováveis. Apesar da alta representatividade de alternativas sustentáveis na matriz energética brasileira, os princípios de sustentabilidade devem ser difundidos em todos os setores da sociedade, buscando o desenvolvimento socioambiental e a qualidade de vida da população. Diante disto, essa pesquisa propõe uma estação tubo energeticamente autossustentável no município de Curitiba, capital do estado do Paraná. Buscou-se, a parte da leitura criteriosa, conceituar as diferentes fontes de energias renováveis, analisando-as e apontando quais tecnologias, disponíveis no mercado, se adequam melhor ao sistema em estudo. Através da pesquisa, optou-se pelo uso da geração fotovoltaica conectada à rede. Para esta *microgrid*, é dimensionado e calculado uma proposta de projeto para a Estação Tubo Santa Bernadethe. Diante do estudo desenvolvido, é analisado a viabilidade econômica e financeira do projeto. O sistema fotovoltaico conectado à rede é rentável ao longo do tempo, e sua implementação consolida o símbolo de capital ecológica do país, bem como seu desenvolvimento sustentável.

Palavras-chave: *microgrid*; sistema fotovoltaico; estação tubo; energias renováveis.

ABSTRACT

The current scenario of global energy transition and advancement demands sustainable development, putting pressure on global markets to implement systems that are based on renewable energies. Despite the high representation of sustainable alternatives in the Brazilian energy matrix, the principles of sustainability must be disseminated in all sectors of society, seeking socio-environmental development and the population's quality of life. In view of this, this research proposes an energetically self-sustaining bus station in the city of Curitiba, capital of the state of Paraná. In addition to careful reading, we sought to conceptualize the different sources of renewable energy, analyzing them and pointing out which technologies, available on the market, are best suited to the system under study. Through the research, it was decided to use photovoltaic generation connected to the grid. A project proposal for the Santa Bernadethe Bus Station is designed and calculated. In view of the developed project, is analyzed the economic and financial viability of the study. The grid-connected photovoltaic system is profitable over time, and its implementation consolidates the symbol of the country's ecological capital, as well as its sustainable development.

Keywords: microgrid; photovoltaic system; bus station; renewable energy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Oferta Interna de Energia no Brasil em 2016	19
Figura 2 – Oferta Interna de Energia no Brasil em 2022	19
Figura 3 – Exemplo de tecnologia da energia oceânica	20
Figura 4 – Exemplo da energia térmica	21
Figura 5 – Exemplo da biomassa	21
Figura 6 – Exemplo da energia hidráulica	22
Figura 7 – Exemplo da energia eólica	22
Figura 8 – Exemplo da energia solar	23
Figura 9 – Exemplo de piezoeletricidade	24
Figura 10 – Classificação dos sistemas de armazenamento de energia	26
Figura 11 – Sistemas de armazenamento químicos	27
Figura 12 – Panorama das Redes Inteligentes	29
Figura 13 – Conceito <i>Smart Grid</i>	30
Figura 14 – Estrutura das Micro-rede	31
Figura 15 – Linhas de ônibus da estação tubo Santa Bernadethe	36
Figura 16 – Estação tubo Santa Bernadethe, sentido Praça Carlos Gomes	37
Figura 17 – Panorama geral da Estação tubo Santa Bernadethe	37
Figura 18 – Esquema demonstrativo do SFVCR	39
Figura 19 – Fluxo de energia no SFVCR	40
Figura 20 – Inclinação do módulo fotovoltaico na captação de energia	45
Figura 21 – Exemplo de perfis de radiação solar diária	46
Figura 22 – Coordenadas geográficas inseridas no site do CRESESB	46
Figura 23 – Irradiação solar no plano inclinado	47
Figura 24 – Cálculo no Plano Inclinado	47
Figura 25 – Principais marcas de módulos fotovoltaicos	49
Figura 26 – <i>Data-sheet</i> Módulo CS3U-MS	50
Figura 27 – Principais marcas de inversores fotovoltaicos	51
Figura 28 – <i>Data-sheet</i> Inversor SUN-3K-G	52
Figura 29 – Imagem via satélite da estação tubo	55
Figura 30 – Tarifas aplicadas ao Subgrupo B3	58
Fotografia 1 – Estação tubo Eixo Norte-Sul em Curitiba	12
Fotografia 2 – Criação dos ligeirinhos e estações tubo em 1991	34
Fotografia 3 – Catracas eletrônicas da estação tubo Santa Bernadethe	42
Fotografia 4 – Letreiro LED, portas automáticas e lâmpadas tubulares LED	42
Fotografia 5 – Câmeras de segurança, letreiro LED e TUG	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Quadro de Cargas	43
Tabela 2 – Consumo energético da estação tubo	44
Tabela 3 – Dados coletados para o dimensionamento dos módulos fotovoltaicos	48
Tabela 4 – Eficiência do SFVCR dimensionado.....	56
Tabela 5 – Materiais utilizados nos orçamentos	57
Tabela 6 – Orçamentos para o estudo.....	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Ampère
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente elétrica alternada
CC	Corrente elétrica contínua
CODEPAR	Companhia de desenvolvimento do Paraná
CRESESB	Centro de referência para energia solar e eólica
DPS	Dispositivo de Proteção contra Surtos
EPE	Empresa de pesquisa energética
ER	Energias Renováveis
ESS	<i>Energy Storage Systems</i>
GWh	Gigawatt-hora
HSP	Horas de Sol Pico
LED	<i>Light-emitting Diode</i>
m	Metro
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organizações das Nações Unidas
SEB	Sistema Elétrico Brasileiro
SFVCR	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica
TE	Tarifa de Energia
TUE	Tomada de uso específico
TUG	Tomada de uso geral
TUSD	Tarifa de uso do Sistema de Distribuição
URBS	Urbanização de Curitiba S/A
V	Volt
W	Watts
Wp	Watt-pico

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Tema	12
1.2	Problemas e premissas	14
1.3	Objetivos	14
1.3.1	Objetivo Geral.....	14
1.3.2	Objetivos Específicos	14
1.4	Justificativa	15
1.5	Metodologia da pesquisa	15
1.6	Estrutura do trabalho	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	Energias Renováveis	17
2.1.1	Tipos de Energias Renováveis	20
<u>2.1.1.1</u>	<u>Energia Oceânica</u>	<u>20</u>
<u>2.1.1.2</u>	<u>Energia Geotérmica</u>	<u>20</u>
<u>2.1.1.3</u>	<u>Biomassa</u>	<u>21</u>
<u>2.1.1.4</u>	<u>Energia Hidráulica</u>	<u>21</u>
<u>2.1.1.5</u>	<u>Energia Eólica</u>	<u>22</u>
<u>2.1.1.6</u>	<u>Energia Solar</u>	<u>23</u>
<u>2.1.1.7</u>	<u>Piezoelasticidade</u>	<u>23</u>
2.2	Armazenamento de energia	24
2.2.1	Sistemas com baterias de baixa temperatura	27
<u>2.2.1.1</u>	<u>Chumbo-Ácido (Pb-Ac)</u>	<u>27</u>
<u>2.2.1.2</u>	<u>Níquel-Cádmio (Ni-Cd)</u>	<u>27</u>
<u>2.2.1.3</u>	<u>Íon Lítio (Li-ion)</u>	<u>28</u>
2.3	Microgrid	28
2.3.1	Sistemas <i>On</i> e <i>Off-Grid</i>	32
2.4	Contexto histórico	33
3	PROPOSTA DE ESTAÇÃO TUBO AUTOSSUSTENTÁVEL	36
3.1	Objeto Alvo	36
3.2	Geração de energia	38
3.2.1	Energia solar fotovoltaica	38
3.3	Dimensionamento do SFVCR	41
3.3.1	Levantamento de cargas	41

3.3.2	Horas de sol pleno.....	45
3.3.3	Dimensionamentos dos módulos solares	47
3.3.4	Dimensionamento do inversor	50
<u>3.3.4.1</u>	<u>Critério de Potência</u>	<u>52</u>
<u>3.3.4.2</u>	<u>Critério de Corrente</u>	<u>53</u>
<u>3.3.4.3</u>	<u>Critério de Tensão</u>	<u>53</u>
4	VIABILIDADE ECONÔMICA E FINANCEIRA DO PROJETO	55
4.1	Orçamento do projeto	56
4.2	Cálculo do Retorno de Investimento para Pagamento à Vista	57
4.3	Viabilidade do projeto	59
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
	REFERÊNCIAS.....	61
	ANEXO A - Empresa A: especificações técnicas (módulo fotovoltaico e inversor).....	69
	ANEXO B - Empresa B: especificações técnicas (módulo fotovoltaico e inversor).....	74
	ANEXO C - Projeto arquitetônico da Estação Tubo Santa Bernadethe, sentido Praça Carlos Gomes	79

1 INTRODUÇÃO

Nesta seção, apresenta-se o quadro geral e história das estações tubo em Curitiba; também, esclarece-se o objetivo e premissas deste trabalho.

1.1 Tema

Implementadas em 1991, as estações tubo são um dos símbolos da cidade de Curitiba (Fotografia 1), sendo o primeiro produto brasileiro a receber o conceituado prêmio *iF Design Award*, um ano após sua inauguração (iF, 2021). O sistema integrado de transporte público é inovador, pois coloca o ônibus como prioridade de todo o planejamento urbano. As estações tubo servem como pontos de ônibus; antes de entrar nelas o passageiro já paga sua passagem e aguarda o ônibus dentro da estação, o que facilita e agiliza o embarque e desembarque de passageiros (BONDE, 2009).

Fotografia 1 – Estação tubo Eixo Norte-Sul em Curitiba



Fonte: URBS (2021)

Apesar de Curitiba ser considerada uma capital ecológica e ter um dos sistemas de transporte mais inovadores do Brasil, esses dois pilares da cidade não se comunicam por completo. É nesse cenário que se aborda o tema de desenvolvimento sustentável. Sendo um dos focos da Organização das Nações Unidas (ONU) para Agenda 2030, os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) compreendem aspectos de direitos ambientais, políticos e econômicos (PRADHAN *et al.*, 2017). Nessa pesquisa, discorre-se sobre as diretrizes do combate às alterações climáticas, inovação, infraestrutura e energia limpa acessível.

A matriz energética mundial é dependente de recursos fósseis, esses são os maiores representantes da emissão de poluentes e impactos ao meio ambiente. É nesse cenário que surgiu a pesquisa de geração sustentável, a qual se refere a toda energia que vem de fontes que se renovam no ciclo de vida humano. Recursos renováveis, como a energia solar ou eólica, são alternativas energéticas limpas e inesgotáveis, sendo as fontes mais promissoras e implementadas na atualidade.

Ao falar de energia limpa e acessível, como descrito nos ODS, também se fala de confiança no sistema. Apagões vem se tornando cada vez mais comuns, e a geração centralizada de energia pode resolver tantos problemas, quanto trazer novos. É nesse sentido que as *microgrids* tentam resolver essa dificuldade, ao analisar as cargas e a geração como uma “micro-rede” (LASSETER; PAIGI, 2004).

As *microgrids* são redes isoladas de energia-elétrica, nelas são combinadas a geração e transmissão para espaços próximos à necessidade de abastecimento elétrico. Elas são encontradas em uso de baixa e média tensão, podendo ter um ponto de conexão ou ponto de acoplamento comum com o sistema de rede elétrica (FARROKHABADI *et al.*, 2019); no caso de apagões ou distúrbios na rede, a *microgrid* desconecta a área do sistema e fornece energia proporcionalmente à demanda na região.

A inovação da *microgrid* vem ao encontro do tema de sustentabilidade. Quando um consumidor com uma alta demanda de energia transfere sua dependência elétrica para fontes menos prejudiciais, isso traz benefícios em toda a cadeia quanto a emissão de poluentes – dependência de recursos fósseis (SHAHIDEHPOUR; CLAIR, 2012). Apesar de as *microgrids* serem indicadas para sistemas isolados, como comunidades longe dos centros urbanos, seu modo de operação conversa com as ideias de estações tubo autossustentáveis.

Em grandes cidades deve-se buscar formas de aumentar o uso de energias renováveis. Os painéis solares fotovoltaicos, dispositivos que convertem a energia solar em elétrica, são uma das ferramentas mais estudadas e aplicadas atualmente; no mesmo caminho, os microgeradores eólicos funcionam para transformar a energia do vento em energia útil. Um meio promissor, no caso particular das estações tubo, é o piso elétrico; utilizando-se do efeito piezoelétrico para gerar energia elétrica através de energia mecânica (EVANILDO, 2010).

1.2 Problemas e premissas

A sustentabilidade ganha cada vez mais visibilidade em todos os âmbitos da sociedade, prova disso é a tendência mundial de retirada de recursos não renováveis do nosso dia a dia. A perspectiva de sustentabilidade contempla a qualidade de vida como um todo; nesse sentido, conforto e segurança caminham juntos ao desenvolvimento sustentável. A problemática deste trabalho, tem o intuito de tornar as estações tubo em autossustentáveis, atendendo a qualidade de vida da população.

A teoria da aplicabilidade da *microgrid*, por ser uma área inovadora, possui referencial teórico pouco integrado na graduação. Isso tem a possibilidade de trazer, especialmente na investigação bibliográfica e no desenvolvimento matemático, dificuldades na modelagem do protótipo. Para isso, o problema será considerado ao nível de estudo ao qual ele está inserido. O protótipo será desenvolvido a partir de premissas que atendam os principais critérios da estação tubo.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Propor uma estação tubo autossustentável no município de Curitiba através de fontes de geração de energia renovável, analisando a viabilidade da implementação desse projeto.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Definir o que é o sistema *microgrid*, aprofundando como esse conceito se relaciona à autossustentabilidade;
- Levantar tipos de geração de energias renováveis, analisando quais atendem os requisitos para uma estação tubo autossustentável de modo efetivo;
- Buscar tipos de armazenamento de energia, avaliando se esse sistema é aplicável ao tipo de configuração de acesso de energia;
- Propor um projeto de estação autossustentável, com base nos tipos de geração pesquisados;

- Realizar análise de viabilidade econômico-financeira para implantação das propostas apresentadas de geração de energia sustentável para uma estação tubo de ônibus.

1.4 Justificativa

O desenvolvimento sustentável, tema da pesquisa, ganha cada vez mais abrangência à medida que há um aumento na preocupação da manutenção e existência de recursos naturais, e de um ambiente propício para continuidade das gerações futuras. Este tema desmembra-se em vários setores da sociedade, sendo percebido desde o deslocamento urbano dos passageiros de transporte coletivo até o funcionamento de uma grande indústria.

Um dos objetivos do avanço energético é a geração de energia limpa e democrática, e é dentro dessa perspectiva que surge o conceito de *microgrid*. Tem-se que, uma *microgrid* ou micro-rede compreende um sistema de geração de energia local e distribuição de baixa ou média tensão que garante, por sua vez, uma maior confiança no sistema e menor impacto do consumo. Nesse modelo, quando ocorre a variação da demanda, o consumo transita pelas diferentes formas de energia disponíveis. São elas: a) a rede de distribuição; b) a geração própria; c) o armazenamento de energia.

O avanço da sustentabilidade deve estar diretamente relacionado ao desenvolvimento socioambiental brasileiro. De certa maneira, o estado necessita gerar energia acessível e inovadora à toda a sociedade, preservando a natureza e garantindo a qualidade da vida. Acima de tudo, a cultura de sustentabilidade, a adoção de práticas de produção e consumo mais sustentáveis e a ambientação com o meio sustentável são elementos que devem estar presentes como direito da sociedade.

Essa pesquisa, pretende conciliar o desenvolvimento socioambiental do município de Curitiba com o conceito das *microgrids*. Um meio de alcançar isso, em pequena escala, é através de um símbolo da cidade: a otimização das estações tubo.

1.5 Metodologia da pesquisa

Primeiramente, inicia-se um processo de revisão bibliográfica para aprofundar o tema de geração autossustentável, dado que essa é a temática principal da

pesquisa. Essa ambientação teórica trará conhecimento para se ter diferentes soluções para o objeto de pesquisa, a estação tubo autossustentável.

Com os dados levantados, entra-se no desenvolvimento do modelo. Aqui, analisa-se as diferentes formas de geração renovável e armazenamento de energia para propor uma solução tecnicamente viável. No final do projeto, parte-se para a análise econômica do protótipo.

1.6 Estrutura do trabalho

O trabalho de conclusão de curso segue a seguinte estrutura:

Capítulo 1: Introdução: Apresentação do tema; Objetivos; Problemática e premissas previamente estabelecidas; Justificativa da escolha do tema; Metodologia de pesquisa a ser utilizada.

Capítulo 2: Fundamentação teórica sobre formas de geração sustentável; Pesquisa bibliográfica sobre armazenamento de energia.

Capítulo 3: Modelagem da estação tubo autossustentável.

Capítulo 4: Viabilidade econômico-financeira.

Capítulo 5: Conclusões finais sobre a pesquisa; Recomendações para trabalhos futuros.

Referências Bibliográficas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nessa parte da pesquisa desenvolve-se as definições das principais tecnologias e conceitos para a futura modelagem da estação tubo autossustentável.

2.1 Energias Renováveis

Em seu conceito científico, energia define-se como a capacidade de realizar trabalho ou uma ação; um objeto que esteja se movimentando ou se aquecendo está realizando trabalho, consumindo energia. Existem diferentes fontes de energia (calor, luz, elétrica etc.), estas podem ser convertidas de uma forma para outra; por exemplo, a comida que uma pessoa consome possui energia química, o organismo dessa pessoa armazena essa energia até que ela a use em forma de energia cinética durante um exercício físico (EIA, 2020).

A transformação da civilização moderna ocorreu à medida que a sociedade descobriu a possibilidade de transformar e armazenar os tipos energia, para então enviar e utilizá-la conforme fosse desejado (SMIL, 2018). A melhora da qualidade de vida e o aumento da demanda de energia são diretamente proporcionais; economias em fases de industrialização mais avançadas, as quais contêm 25% da população mundial, são responsáveis por 75% da demanda de energia do planeta. Destarte, tornou-se indispensável o atendimento da crescente demanda de energia para que essa possa ser acessada nas funções essenciais da sociedade (DINCER, 2000; PRAKASH, 2010).

A primeira revolução industrial iniciou em 1760 com a invenção da máquina a vapor, neste momento, a sociedade transitava de uma economia agrária e artesanal para uma dominada pelas indústrias e produções manufaturadas. O uso do petróleo e eletricidade facilitaram produções em larga escala durante a segunda revolução industrial, nesse momento os centros urbanos experimentaram uma explosão na densidade demográfica, e conseqüentemente um aumento em seu volume energético utilizado (MOHAJAN, 2019).

Durante a terceira revolução industrial, a tecnologia foi usada para modernizar e automatizar as formas de produção. Apesar de cada revolução ser considerada como um evento separado na história recente, juntas, podem ser compreendidas como uma série de eventos baseados nas inovações da revolução anterior levando a formas mais avançadas de produção (XU *et al.*, 2018). Essas transições não só foram

responsáveis pela tecnificação e esquemas de produção atuais, mas também por moldar o ponto de vista e parâmetros de consumo da sociedade (SMIL, 2018).

Até a Revolução Verde, na década de 1970, não havia discussões sobre os impactos das indústrias e a importância sobre a conservação do meio ambiente para as gerações futuras. Todavia, a partir desse momento, a sociedade passou a analisar seu comportamento de consumo e produção, observando também a demanda e uso de energia (LE PAGE, 2017). Entre as principais causas dessa reflexão ecológica, estão os impactos negativos da utilização de combustíveis fósseis, como por exemplo, petróleo e carvão mineral, que são as principais fontes de energia utilizadas até o presente momento. Entretanto, tais recursos energéticos possuem um tempo determinado de vida no planeta, sendo classificados como não renováveis (EPE, 2022), e que, portanto, deixarão de existir no futuro.

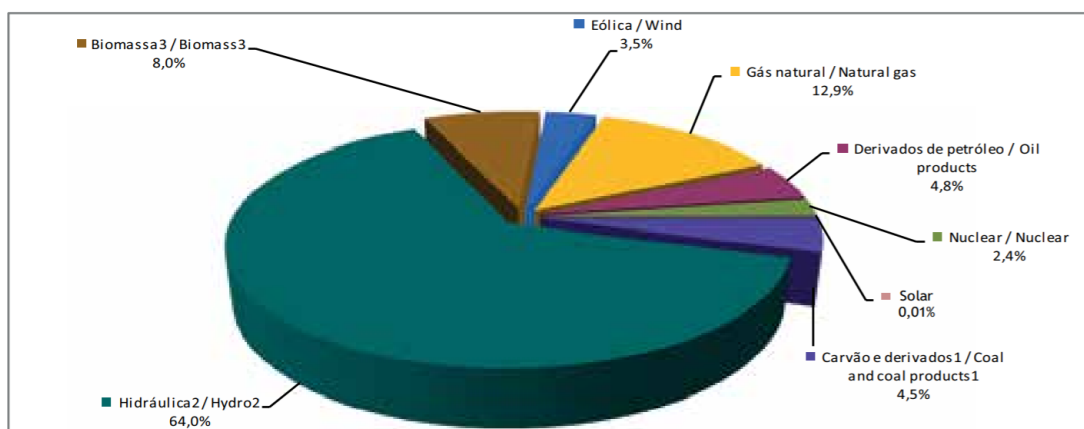
Nesse contexto, em razão da pressão de ambientalistas, houve uma busca por alternativas energéticas que promovam o desenvolvimento das energias renováveis, tanto para uma substituição de uma eventual falta de combustíveis fósseis, quanto para evitar a dependência desse tipo de recurso. Nessa época, apareceram as primeiras turbinas eólicas, e iniciou-se a discussão sobre o potencial de uso das energias renováveis (ACKERMANN, 2002).

Nos anos seguintes, observou-se um aumento do uso de energias renováveis e, no caso do Brasil, uma representatividade maior dessas na matriz energética do país. Em 2016, as energias renováveis representavam 75,51% da matriz energética brasileira, sendo elas: hidráulica, biomassa, eólica e solar (Figura 1); no ano de 2022, as alternativas energéticas representavam 78,07% do mix energético (Figura 2). O aumento de 2,56 pontos percentuais entre os dois anos é consequência, em grande parte, da expansão das energias eólica e solar no país (EPE, 2016, 2022).

Figura 1 – Oferta Interna de Energia no Brasil em 2016

Gráfico 1.1 – Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte

Chart 1.1 – Domestic Electricity Supply by Source

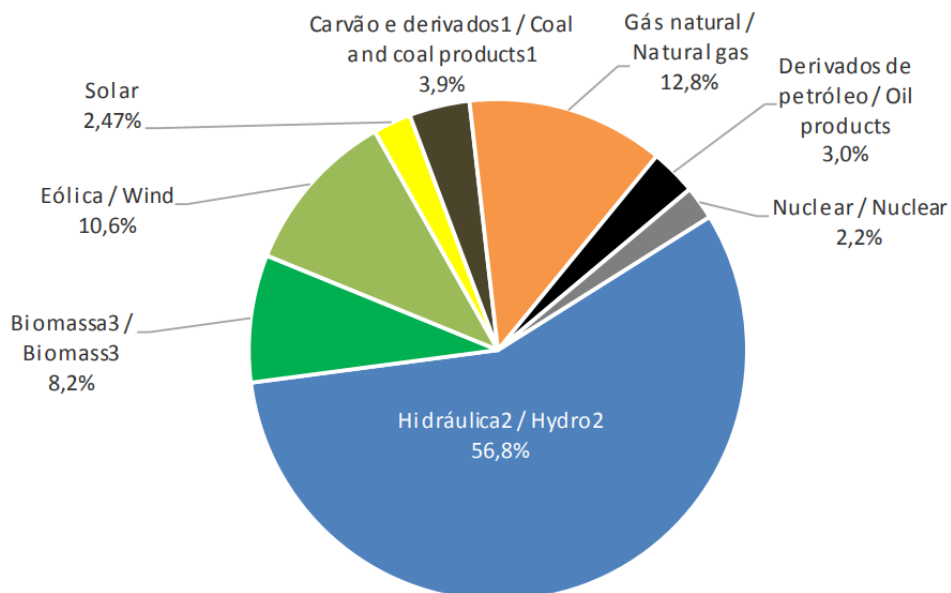


Notas/ Notes:

¹ Inclui gás de coqueria/ Includes coke oven gas² Inclui importação de eletricidade/ Includes electricity imports³ Inclui lenha, bagaço de cana, lixívia e outras recuperações/ Includes firewood, sugarcane bagasse, black-liquor and other primary sources**Fonte: EPE (2016)****Figura 2 – Oferta Interna de Energia no Brasil em 2022**

Gráfico 1.1.b – Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte

Chart 1.1.b – Total Electricity Supply by Source

**Fonte: EPE (2022)**

Em um senso comunitário, as energias renováveis são reconhecidas como recursos inesgotáveis, de origem natural e que possuem a capacidade de se renovar em um curto espaço de tempo. No entanto, no conceito técnico, podem ser definidas como energias indiretas produzidas pela entrada da energia solar no planeta, exemplos desse fenômeno são a energia eólica, a hídrica e a biomassa; ou energias

primariamente renováveis, fruto das forças gravitacionais, sendo elas: a geotérmica e a das marés (HARTLEY, 1990; MILLER; SPOOLMAN, 2010).

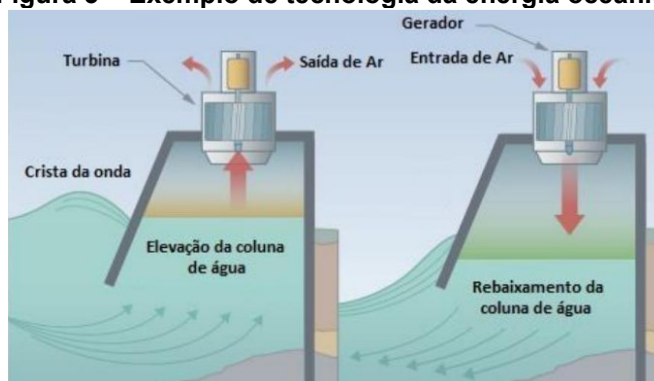
2.1.1 Tipos de Energias Renováveis

Nesse tópico aborda-se a definição e características de cada ER (energia renovável), sua importância e aplicação no Brasil.

2.1.1.1 Energia Oceânica

Energia oceânica é uma fonte limpa com alta densidade energética, podendo ser dividida em cinco formas: Energia de ondas, Energia de maré, Energia de correntes, Energia do gradiente de temperatura e Energia do gradiente de salinidade. Essas fontes podem ser usadas para geração de eletricidade e para necessidades térmicas (resfriamento). No Brasil essa fonte de energia ainda está em fase de estudos e pesquisas (LOBO *et al.*, 2021).

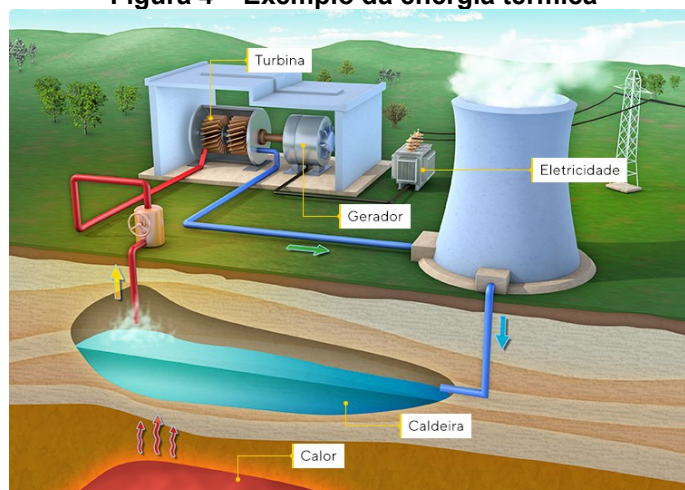
Figura 3 – Exemplo de tecnologia da energia oceânica



Fonte: Lobo *et al.* (2021)

2.1.1.2 Energia Geotérmica

Energia Geotérmica é a energia armazenada na forma de calor abaixo da superfície da terra, que tem origem na radiação solar, no fluxo geotérmico profundo e em fluxo de águas subterrâneas. Para a conversão da energia térmica em elétrica são necessárias temperaturas acima de 150°C (OMIDO; BARBOZA; JÚNIOR, 2017). No Brasil a viabilidade do uso dessa fonte energética ainda está em pesquisa (ARBOIT *et al.*, 2013).

Figura 4 – Exemplo da energia térmica

Fonte: Omido, Barboza e Junior (2021)

2.1.1.3 Biomassa

Biomassa é toda matéria orgânica de origem vegetal ou animal, como restos de madeira, lenha, dejetos de animais, entre outras (GOLDEMBERG, 2009). A energia da Biomassa é obtida através do processamento desses resíduos, por três técnicas: combustão, gaseificação e fermentação. A produção de biomassa brasileira é uma das maiores do mundo com condições favoráveis para expandi-la de forma sustentável (BONDARIK; PILATTI; HORST, 2018).

Figura 5 – Exemplo da biomassa

Fonte: EPE (2022)

2.1.1.4 Energia Hidráulica

A energia hidráulica é produzida através da força do movimento das águas, que transformam a energia cinética em elétrica. Esse tipo de energia é obtida a partir dos rios ou quedas d'água, por meio das usinas hidrelétricas (DE QUEIROZ *et al.*,

2013). No Brasil, a geração hídrica é a principal fonte renovável de produção de energia elétrica, representando 56,8% da matriz energética do país (EPE, 2022).

Figura 6 – Exemplo da energia hidráulica

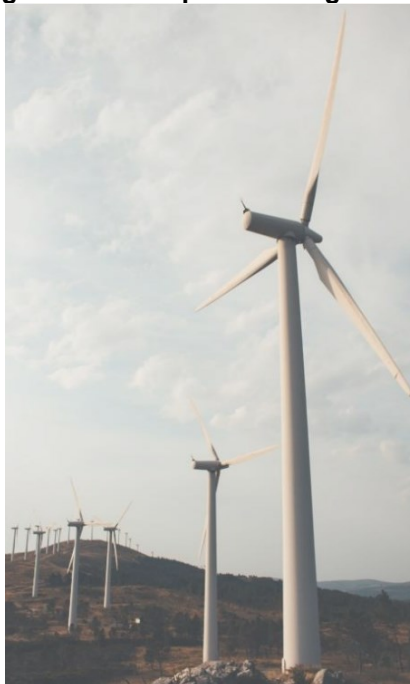


Fonte: EPE (2022)

2.1.1.5 Energia Eólica

Energia Eólica é a conversão da energia cinética dos ventos (rotação das hélices) em eletricidade através dos aerogeradores (CUNHA *et al.*, 2019). A produção de energia elétrica no Brasil a partir da fonte eólica alcançou 72,3 TWh em 2021, um aumento de 26,7% em relação a 2020, sendo 10,6% da matriz energética (EPE, 2022).

Figura 7 – Exemplo da energia eólica



Fonte: EPE (2022)

2.1.1.6 Energia Solar

A energia solar fotovoltaica é definida como a energia gerada através da conversão direta da radiação solar em eletricidade, tal fenômeno ocorre, por meio de um dispositivo conhecido como célula fotovoltaica que atua utilizando o princípio do efeito fotoelétrico ou fotovoltaico (LANA *et al.*, 2015). Descoberto por Alexandre Edmund Becquerel (1820 - 1891), em 1839, o efeito fotovoltaico foi constatado quando duas placas de latão imersas em um eletrólito líquido, expostas à luz solar, produziram eletricidade (MACHADO; MIRANDA, 2015).

A explicação desse efeito se dá através da absorção da luz solar, que ocasiona uma diferença de potencial na estrutura do material semicondutor. Uma célula fotovoltaica não armazena energia elétrica, apenas mantém um fluxo de elétrons num circuito elétrico enquanto houver incidência de luz sobre ela (NASCIMENTO, 2004). Dessa forma, é possível planejar formas de armazenamento dessa energia, como é o caso de banco de baterias. No Brasil as fontes renováveis representam 78,1% da oferta interna de eletricidade, sendo a energia solar 2,47% dessa demanda (EPE, 2022).

Figura 8 – Exemplo da energia solar



Fonte: Intelbras (2020)

2.1.1.7 Piezoelétricidade

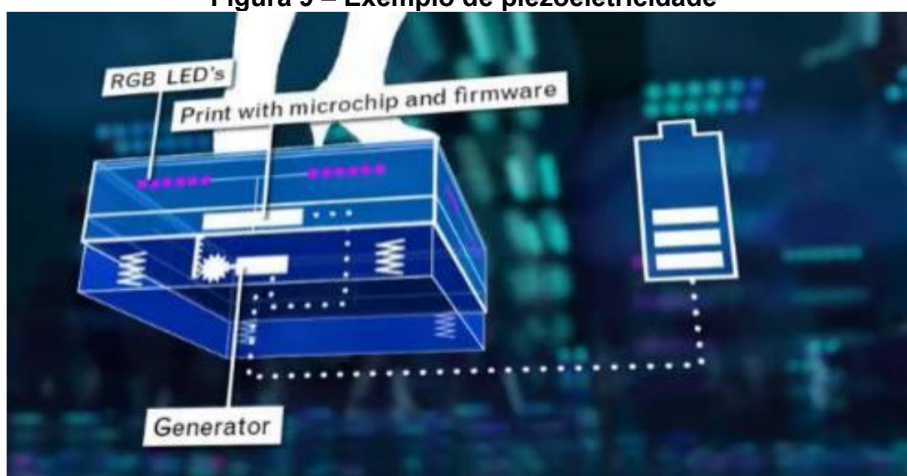
Piezoelétricidade é a propriedade de alguns materiais, chamados de piezoelétricos, de gerarem uma tensão elétrica quando deformados por uma pressão mecânica, obtendo uma carga elétrica que pode ser armazenada e posteriormente

utilizada. Essa propriedade foi descoberta pelos irmãos Pierre e Jacques Currie, em 1880. O fenômeno da Piezoelectricidade é uma alternativa de energia limpa que tem como significado eletricidade por pressão (ARMENDANI *et al.*, 2016).

No Brasil, há relatos de projetos de pesquisa sobre o material piezoelétrico, mas nenhum diretamente ligado a geração de energia elétrica. No entanto, em outros países já existe essa tecnologia, por exemplo: um grupo formado por engenheiros e investidores holandeses estão pesquisando e desenvolvendo um projeto para gerar energia através do movimento das pessoas em uma pista de dança. Foi analisado que uma pessoa dançando sozinha pode gerar até 20W (SILVA, 2018).

As energias renováveis são um dos pilares da transição energética emergente. O objetivo essencial é a não-dependência de recursos fósseis e a garantia de um futuro sustentável. No âmbito do sistema elétrico, geração, transmissão e distribuição devem buscar o desenvolvimento sustentável com respaldo nas novas tecnologias.

Figura 9 – Exemplo de piezoelectricidade



Fonte: Silva (2018)

2.2 Armazenamento de energia

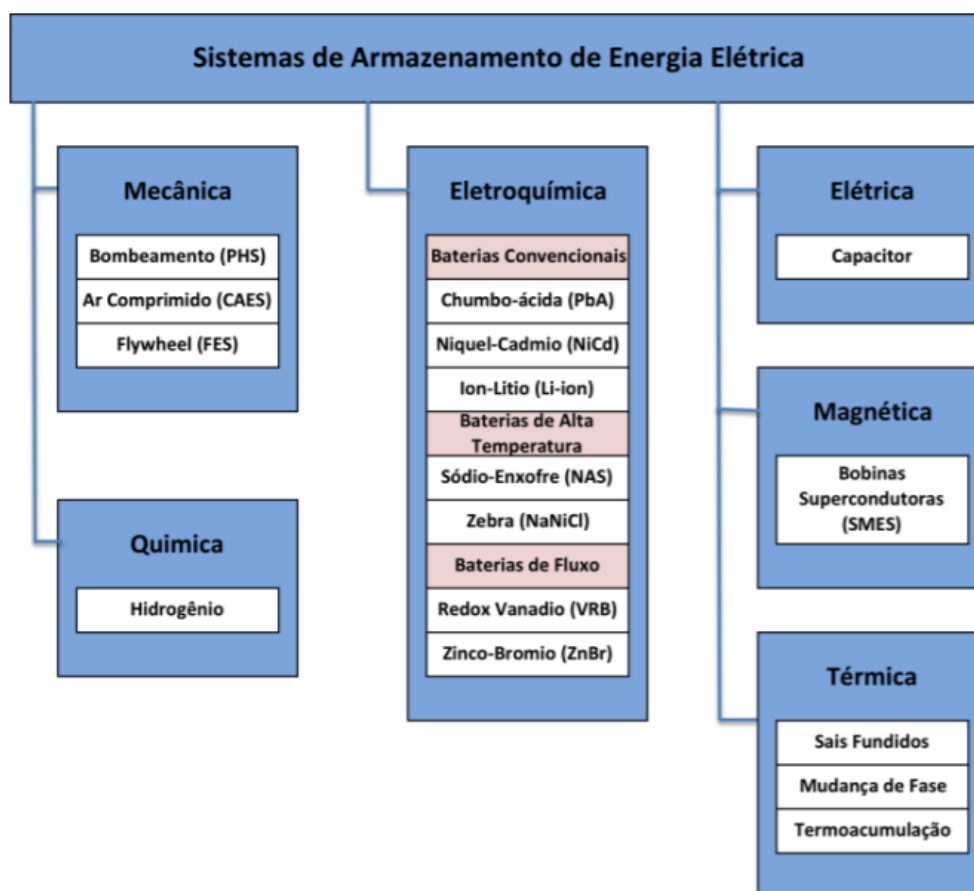
A crescente demanda de eletricidade é um reflexo da importância desse recurso para a sociedade. Tanto para indústrias quanto para centros urbanos, existe uma constante necessidade de energia disponível, confiável e segura (LASSETER; PAIGI, 2004). As fontes de energia renováveis caracterizam-se por uma natureza estocástica, sendo dependentes de condições climáticas, época do ano ou horário do dia; assim dificultando sua aplicabilidade e aproveitamento 24h por dia, todos os dias do ano. (FERREIRA, J. H.; TAVARES, 2015).

No setor elétrico é importante manter estável a produção e o consumo de energia. Dentro desse contexto, os sistemas de armazenamento de energia (em inglês, ESS – *Energy Storage Systems*) são uma alternativa promissora, pois auxiliam na manutenção do equilíbrio entre a oferta e a demanda energética da respectiva fonte energética (PEREIRA, 2013).

No Brasil, fatores positivos e importantes o definem como um país com alto potencial para o armazenamento de energia, tais como: mercado promissor para qualquer tipo de tecnologia de armazenamento; a agência reguladora nacional (ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica) com operações consolidadas; políticas de universalização do serviço de energia elétrica para suprir locais ainda não conectados à rede; uma das maiores reservas de lítio conhecidas do mundo; etc. (BUENO; BRANDÃO, 2016).

Existem diversos tipos de sistemas de armazenamento de energia elétrica (Figura 10), sendo eles: mecânico (bombeamento de água entre reservatórios, sistemas de ar comprimido, volantes de inércia); elétrico (capacitores); químico (armazenamento em hidrogênio, baterias convencionais, baterias de alta temperatura, baterias de fluxo); térmico (sais fundidos, mudança de fase, termoacumulação); magnético (bobinas supercondutoras) (SERRA *et al.*, 2016).

Figura 10 – Classificação dos sistemas de armazenamento de energia

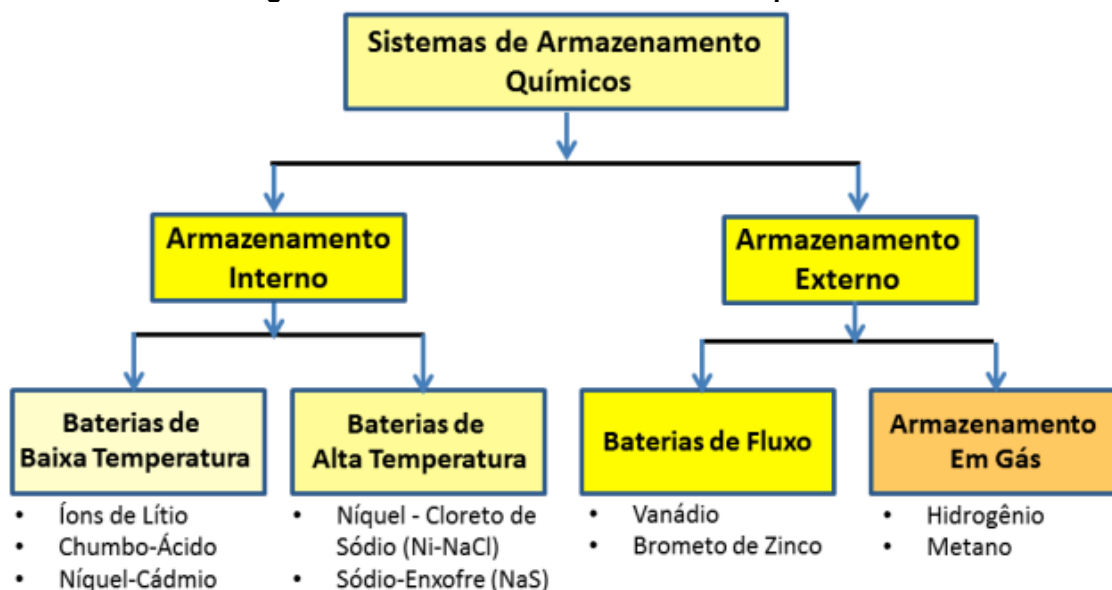


Fonte: Serra et al. (2016)

O sistema elétrico brasileiro (SEB) por ser essencialmente hidroelétrico, usufruiu majoritariamente do armazenamento de energia através da utilização de reservatórios de acumulação, com a participação da geração termoelétrica como back-up no sistema interligado e na base nos sistemas isolados. No território brasileiro, tem-se uma crescente participação de fontes renováveis na produção de energia elétrica, com isso há a necessidade de outras formas de armazenamento de energia (SERRA et al., 2016).

Uma dessas novas formas de armazenamento é por meio de sistemas químicos que utilizam principalmente baterias de baixa temperatura, pois oferecem soluções de armazenamento confiáveis, seguras e operacionalmente simples (Figura 11).

Figura 11 – Sistemas de armazenamento químicos



Fonte: Bueno e Brandão (2016)

2.2.1 Sistemas com baterias de baixa temperatura

Nesse tópico aborda-se as características e aplicações de diferentes tipos de baterias de baixa temperatura.

2.2.1.1 Chumbo-Ácido (Pb-Ac)

As baterias Pb-Ac apresentam baixo custo de instalação, operação e manutenção, facilidade de fabricação, cinética rápida da reação eletroquímica e vida útil boa quando operadas corretamente. Contudo, utilizam-se materiais tóxicos e perigosos ao meio ambiente, em grande escala, durante sua produção. Outros elementos importantes a serem considerados são: a baixa densidade de energia (potência) e os problemas de manutenção (FERREIRA; TAVARES, 2015).

No setor elétrico são utilizadas em equipamentos de controle e chaveamento, nas subestações e plantas de geração.

2.2.1.2 Níquel-Cádmio (Ni-Cd)

As baterias Ni-Cd apresentam baixo custo, alta densidade de energia, elevada capacidade de descarga, confiabilidade e vida útil boa. A sua desvantagem é devido a presença de cádmio, um metal tóxico e bioacumulativo (FERREIRA; TAVARES, 2015).

No setor elétrico são utilizadas em iluminação de emergência, sistemas de back-up, fornecimento ininterrupto de energia e equipamentos eletrônicos.

2.2.1.3 Íon Lítio (Li-ion)

As baterias de Li-ion apresentam alta densidade energética, suportam altas taxas de carga e descarga, possuem vida útil elevada e são seguras e baratas.

São consideradas a tecnologia mais viável para veículos elétricos, são as mais utilizadas nas aplicações eletrônicas e nos últimos anos teve um alto crescimento nas aplicações estacionárias para armazenamento de energia, com destaque para o armazenamento de energia em sistemas fotovoltaicos isolados da rede (FERREIRA; TAVARES, 2015).

Atualmente, as tecnologias disponíveis para a geração e armazenamento de energia demonstram não somente ter capacidade de atender a demanda energética, mas de fazê-lo buscando a preservação e conservação do meio ambiente. Portanto, torna-se imprescindível estudos que consigam fazer a associação do uso dessas ferramentas tecnológicas às energias renováveis disponíveis visando o desenvolvimento sustentável.

2.3 Microgrid

Em 1980, na Comissão de Brundtland¹ foi definido o conceito de desenvolvimento sustentável como o uso racional dos recursos naturais pelas gerações presentes visando a preservação desses para a geração futura, levando em conta o equilíbrio entre a questão financeira e a ambiental (ESTENDER; PITTA, 2008). A Conferência das Nações Unidas em 2012 no Rio de Janeiro (Rio+20), lançou o processo que culminou com o desenvolvimento dos dezessete objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS). Dentre esses objetivos estão: “Energia acessível e limpa” e “Indústria, inovação e infraestrutura” (THE 17 GOALS).

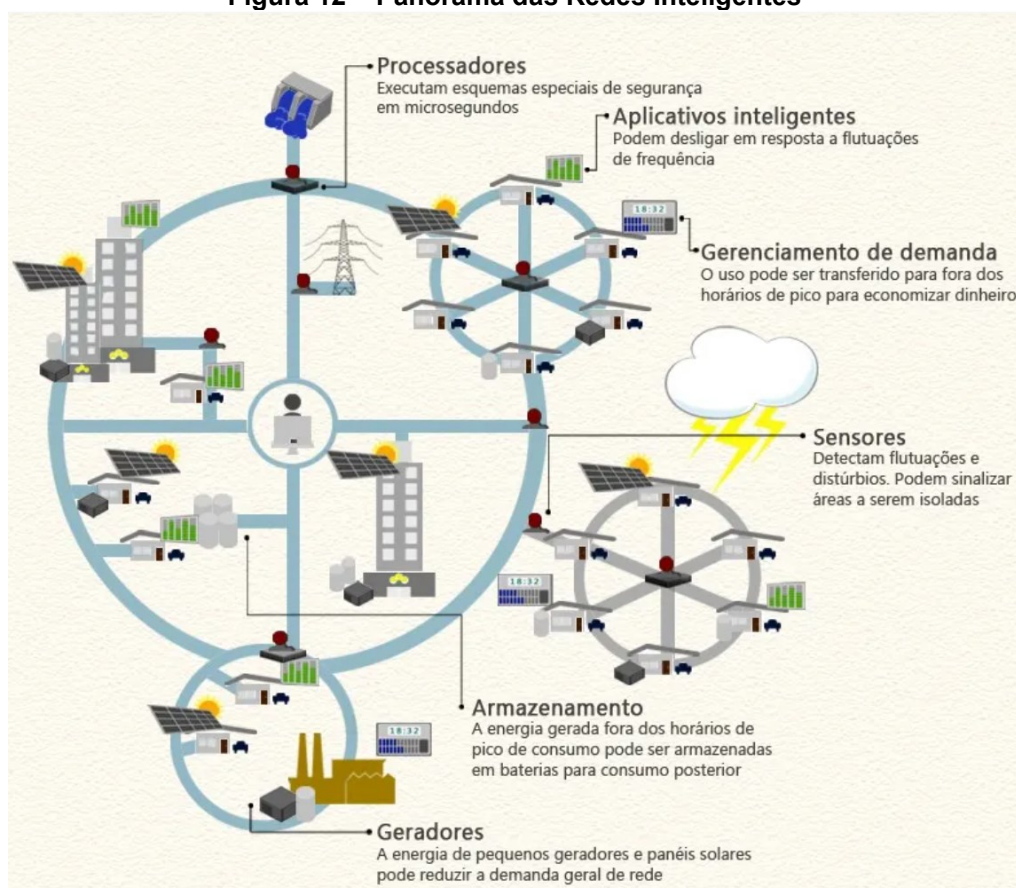
Assim, observa-se que o desenvolvimento científico está alinhado ao conceito de sustentabilidade. A utilização de ferramentas tecnológicas pode ser uma solução

¹ Comissão de Brundtland (ou Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento) leva esse nome por ter sido presidida por Gro Harlem Brundtland. Esta Comissão criada pela ONU tinha como objetivo reanalisar as questões críticas relacionadas a sustentabilidade (JAPIASSÚ; GUERRA, 2017).

na busca e avanço de modelos energéticos renováveis, sendo um deles a tecnologia *Smart Grid* (ESPOSITO; RIVERA; TEIXEIRA, 2013).

Smart Grids, ou Redes Inteligentes (Figura 12), originaram-se como uma resposta a necessidade de modernização da rede elétrica, visando torná-la mais sustentável enquanto otimizava-se a entrega de potência (ESPOSITO; RIVERA; TEIXEIRA, 2013). O conceito, cunhado em Amin e Wollenberg (2005), apresenta uma mudança no modelo do setor elétrico, centralizando a necessidade de tornar a transmissão de energia mais automatizada, levando em conta as demandas de cada país ou região.

Figura 12 – Panorama das Redes Inteligentes



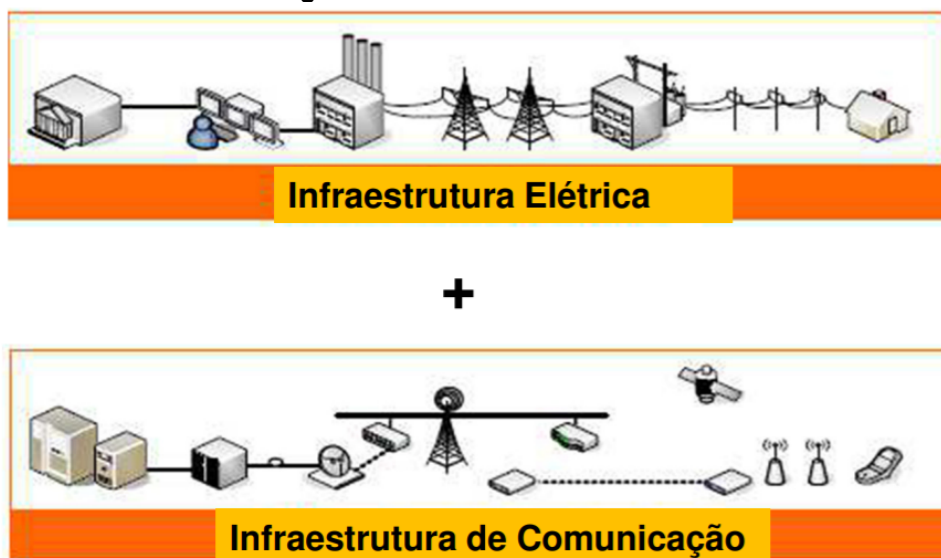
Fonte: Gizmodo Brasil (2012)

Smart significa inteligente, simples; *grid*, uma rede de condutores com a capacidade de entregar energia até um certo ponto (TUBALLA; ABUNDO, 2016). Em um sistema tradicional, a rede elétrica somente distribui potência elétrica, mas somente a rede inteligente é capaz de armazenar, comunicar e tomar decisões com os dados que obtém do próprio sistema (PAUL *et al.*, 2014).

O fluxo bidirecional de energia permite tornar a rede em comunicante, habilitando fontes geradoras descentralizadas, renováveis e intermitentes a convergirem tecnologias para atender diferentes cenários de demanda (U.S. *Department of Energy*, 2008; ESPOSITO; RIVERA; TEIXEIRA, 2013). Este cenário, permite a melhoria da eficiência e o dimensionamento da rede, minimizando custos e impactos ambientais enquanto aumenta a confiança, segurança e estabilidade do sistema elétrico (IEA, 2011).

Nesse caminho, instalações de geração centralizadas dão lugar a unidades geradoras de pequena e média tensão diretamente conectadas as unidades consumidoras (BANERJI, 2013), combinando a infraestrutura elétrica a de comunicação (Figura 13). Desse modo, o modelo de rede se redefine de grandes produções longe das cidades, para várias produções em menor escala localizadas em um território menor. O conceito de *Smart Grids* fala de grandes centros urbanos, ou então de áreas já conectadas a rede; lugares isolados do sistema são pouco abordados, dando espaço para o aparecimento do conceito de *Smart Microgrids* (TSUI, 2020).

Figura 13 – Conceito *Smart Grid*

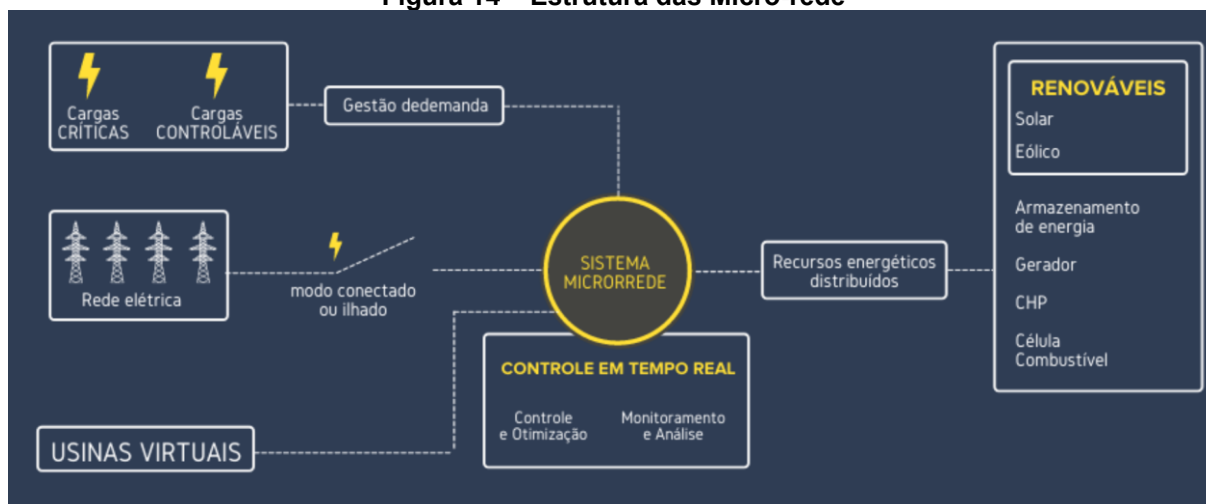


Fonte: Rede Urbanere (2015)

Uma *Microgrid*, ou micro-rede, é uma pequena rede de energia que se conecta à rede tradicional. O diferencial desse conceito é a possibilidade da micro-rede se desacoplar da rede principal e operar por conta própria (Figura 14), onde em casos de queda de energia, a *microgrid* pode continuar a fornecer eletricidade para as cargas que dependem dela (LASSETER; PAIGI, 2004).

A Figura 14 ilustra que em uma *microgrid* ou sistema micro-rede, há um controle em tempo real da demanda e fornecimento de energia. O sistema automatizado monitora a necessidade elétrica, podendo se desconectar da rede e operar de modo ilhado; independente da configuração, o sistema gerencia o uso dos recursos energéticos distribuídos e disponíveis conforme a necessidade das cargas.

Figura 14 – Estrutura das Micro-rede



Fonte: GRID Energia (2021)

Apesar de parecer um conceito recente, as *microgrids* já se apresentaram em diferentes formas, ainda que não recebessem essa nomenclatura. Historicamente, a primeira micro-rede foi introduzida por Thomas Edison, em 1882, na *Edison Electric Lighting Station - Pearl Street Station*, a sala de bateria e controle combinava calor e energia produzindo eletricidade e energia térmica (COHN, 2019). O termo e sua definição, entretanto, nasceram em 2002 com o artigo de Robert Lasseter: *MicroGrid*.

Segundo Hayden (2013), têm-se os seguintes tipos de *microgrids*:

- *Microgrids* locais: busca agregar gerações de energia que estão próximas as cargas que se deseja conectar em um determinado campus ou parque institucional. De acordo com o autor, esse é o tipo de *microgrid* mais facilmente gerenciado, operando em escalas de 4 MW até 40MW;
- *Microgrids* isoladas: como o próprio nome diz, essas nunca se conectam a rede principal, operando de modo ilhado. São tipicamente instaladas em áreas de difícil acesso, longe de infraestruturas de transmissão, o que torna a conexão impossível ou de difícil manutenção;

- *Microgrids* militares: essas são construídas com foco principal em segurança física e cibernética para instalações militares, com o objetivo de garantir energia confiável sem depender da rede elétrica;
- *Microgrids* comerciais ou industriais: essas não têm características claras definidas pelo autor. Não existem padrões únicos para suas implementações;
- *Microgrids* comunitárias: esse segmento é liderado com instalações na Europa; entretanto, não são compatíveis com a definição de *microgrid* já que não ficam ilhados.

No Brasil, as *microgrids* propõem uma solução inteligente para as regiões ainda não ligadas ao sistema elétrico nacional. Diversos estudos de caso foram realizados, em especial na região amazônica (SOUZA, 2015; USTUN, 2016). Dentre eles, uma pesquisa realizada junto ao Ministério de Minas e Energia buscou documentar “a universalização da eletricidade na Amazônia rural brasileira” através das chamadas “micro e mini-centrais” elétricas (DI LASCIO; FAGUNDES BARRETO, 2009).

Conforme a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, esses sistemas podem ser classificados como:

- Microgeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras;
- Minigeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW para fontes hídricas ou menor ou igual a 5 MW para cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou para as demais fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.

2.3.1 Sistemas *On* e *Off-Grid*

Em um sistema com acesso a eletricidade, é possível ter duas configurações:

- *Grid* ou *On-grid*: sistema conectado à rede, podendo utilizar tanto a energia gerada no local como a energia da rede em paralelo.
- *Off grid*: Sistema desconectado da rede, utiliza-se apenas a geração de energia local que é armazenada em baterias.

Na análise feita por Ortega-Arriara *et al.* (2021), ambas modalidades têm suas aplicabilidades e vantagens, tanto econômicas, quanto ambientais. Em geral, sistemas *on-grid* são ideais para áreas urbanas, já conectadas a rede e com alta densidade populacional; sistemas *off-grid*, por outro lado, são mais adequadas a áreas rurais e distantes da rede.

O conceito de *microgrid* adequa-se a locais remotos, mas também àqueles locais que se beneficiariam de uma certa independência da rede elétrica. Um exemplo disso, são sistemas de transporte, os quais devem atender a demanda inconstante de passageiros com o objetivo de otimizar seu fluxo (HRVOJE NOVAK *et al.*, 2015).

2.4 Contexto histórico

Ao longo da segunda metade do século XX e das primeiras décadas do século XXI, a cidade de Curitiba implementou diversas soluções urbanas as quais lhe trouxeram destaque nacional e internacional. Esse processo de mudanças se iniciou com o desenho urbano proposto por Alfred Agache em 1943, o qual organizava o crescimento urbano através de anéis que se expandiam a partir do centro em direção à periferia. Contudo, o Plano Agache foi implantado apenas na década de 1960 e de modo parcial. Em 1964, a Companhia de Desenvolvimento do Paraná (CODEPAR) decidiu revisar o Plano Agache e foi aberta uma concorrência nacional entre empresas de arquitetura e urbanismo para a elaboração de um plano urbano para a cidade. Em 1966, a Câmara Municipal de Curitiba aprovou o denominado Plano Diretor. (MASCARELLO *et al.*, 2013; SOUSA, 2012).

A fase de implementação do Plano Diretor se deu na primeira gestão Lerner, de 1971 a 1975. Nesse momento foram executadas as obras do sistema viário trinário (composto por duas vias exclusivas para ônibus expresso e duas vias para tráfego lento), as quais foram complementadas com a implementação da tarifa única durante a gestão Raiz (1975 a 1979). Durante a terceira gestão Lerner (1989 a 1992), a prefeitura investiu em questões ambientais, promovendo o estabelecimento de

parques verdes e do Jardim Botânico, bem como implementou as Linhas Diretas, ou ligeirinhos, e as estações tubo (Fotografia 2).

Fotografia 2 – Criação dos ligeirinhos e estações tubo em 1991



Fonte: URBS (2021)

Havia, nos esforços urbanísticos executados e em seu marketing, uma intenção de difundir a ideia de Curitiba como Capital Ecológica. Tais esforços foram efetivos, levando a cidade à uma posição de exemplo. Durante a década de 1990, Curitiba passou por uma etapa de intenso reconhecimento nacional e internacional. Neste período a cidade foi vista como capital brasileira com melhor qualidade de vida, e chegou mesmo a ser indicada por urbanistas da ONU como uma das três melhores cidades do mundo para se viver, ao lado de Roma e de São Francisco (MASCARELLO *et al.*, 2013; SOUSA, 2012).

Já em 2009 foi implantado um novo eixo estrutural de transporte coletivo, a Linha Verde, seguindo o mesmo sistema trinário. Ainda que semelhante aos eixos anteriormente implementados, a Linha Verde se diferencia em alguns aspectos, dentre os quais a busca por maior sustentabilidade. Esse objetivo se apresentava na otimização do tempo de viagem dos ônibus expressos, na criação de zonas verdes por toda a extensão da avenida, na inclusão de uma ciclovia na mesma extensão e na captação de água pluvial para limpeza das estações tubo e para a rega das zonas verdes (FERNANDES, 2012).

O sistema de transporte coletivo de Curitiba é parte essencial do planejamento urbano da cidade e está diretamente relacionado com o *status* de modelo de desenvolvimento sustentável recebido pelo mesmo. O transporte público foi um indutor e organizador de crescimento da cidade e atualmente (2020) atende 710.589 cidadãos a cada dia útil. Já a associação entre sustentabilidade e o transporte público em Curitiba pode ser vista na inserção de modelos como o BRT-2011, movido a biocombustível, e de veículos movidos a eletricidade e biodiesel, os chamados Hibribus – respectivamente inseridos em 2011 e 2012 (FERNANDES, 2012).

Nesse cenário, as estações tubo estão tanto ligadas a projetos de cunho sustentável, quanto a iniciativas voltadas à acessibilidade. Criadas em 1991, pelo então prefeito Jaime Lerner em conjunto com os arquitetos Abraão Assad e Carlos Eduardo Ceneviva, as estações tubo visavam proteger passageiros do ambiente externo e facilitar a integração do sistema de transporte. Em 2012, a cidade possuía um total de 362 estações tubo e 312 delas dispunham de elevadores ou rampas de acesso, de modo que 86% das estações eram acessíveis a portadores de necessidades especiais. As estações tubo mais fortemente conectadas com iniciativas sustentáveis são aquelas distribuídas ao longo da Linha Verde, contudo, o arquiteto Willyan Osti Fernandes não viu nelas grandes avanços em termos de suprimento energético, a estratégia sustentável de maior avanço para Fernandes foi a captação de água pluvial, usada para limpeza dos tubos e rega de jardins. Assim sendo, o projeto atual se alinha a uma intensificação do aspecto sustentável das estações tubo.

3 PROPOSTA DE ESTAÇÃO TUBO AUTOSSUSTENTÁVEL

Nesse tópico determina-se e dimensiona-se as tecnologias necessárias para propor uma estação tubo energeticamente autossustentável.

3.1 Objeto Alvo

O objeto alvo deste trabalho é a Estação Tubo Santa Bernadethe - Sentido Praça Carlos Gomes, base para o protótipo de estação tubo energeticamente autossustentável. A escolha foi motivada pela localização privilegiada da estação, a qual fica na Linha Verde. A estação tubo tem grande circulação de passageiros decorrente das três linhas que passam no ponto de parada, sendo elas:



- Em vermelho: Linha 350 – FAGUNDES VARELA / PINHEIRINHO
- Em verde: Linha 550 – LIGEIRÃO PINHEIRINHO / CARLOS GOMES
- Em laranja: Linha 616 – PORTÃO / SANTA BERNADETHE

Figura 16 – Estação tubo Santa Bernadethe, sentido Praça Carlos Gomes



Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 17 – Panorama geral da Estação tubo Santa Bernadethe



Fonte: Autoria própria (2022)

A atual média de 16.500 passageiros por mês desta estação tubo forneceria visibilidade da instalação inovadora, corroborando aos símbolos de cidade sustentável que Curitiba perpetua (URBS, 2022). Nesta mesma perspectiva, o trabalho não busca modificar o projeto arquitetônico da estação tubo pelo apelo simbólico que o sistema representa.

Atualmente, não há construções no entorno dos pontos de parada da Linha Verde, garantindo um amplo espaço para novas instalações de geração com energias renováveis. Por exemplo, no caso de uma instalação de painéis fotovoltaicos, a presença de construções altas poderia diminuir a incidência solar nos painéis devido ao sombreamento na região.

Na parte final deste trabalho, Anexo C, apresenta-se projeto arquitetônico da Estação Tubo Santa Bernadethe 1, fornecido pelo órgão público Urbanização de Curitiba S/A (URBS).

3.2 Geração de energia

Para tornar a estação tubo energeticamente autossustentável, faz-se necessário a implementação de geração de energia local. Das atuais alternativas energéticas no mercado, dispostas no tópico 2.1, deve-se determinar a viabilidade de suas aplicações no sistema proposto:

- Quanto à impraticabilidade física: gerações de energia como oceânica, geotérmica, biomassa e hidráulica não podem ser consideradas já que não são aplicáveis a esse sistema.
- Quanto à baixa geração de energia: a energia eólica foi desconsiderada já que essa geração é útil em sistemas altos, nas regiões urbanas é utilizada em prédios ou altas construções (FERREIRA, I., 2021). Para a piezoelectricidade, a geração de energia é insuficiente para o sistema em estudo; isto se soma ao custo elevado dos materiais e a tecnologia ainda estar em fase de pesquisa pelas fabricantes, ainda não sendo comercializado no Brasil (SILVA, 2018).

Neste sentido, a alternativa energética escolhida é o Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica (SFVCR). Essa geração já é consolidada no mercado brasileiro; das energias renováveis disponíveis, a solar fotovoltaica é a mais instalada para consumidores residenciais (EPE, 2022).

Outros motivos corroboram para a escolha, o SFVCR tem baixa manutenção, longa vida útil, oferece a possibilidade de ser instalado em diferentes locais, baixo custo se comparado a outras fontes de energia, e resoluções normativas para geração de créditos de energia (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

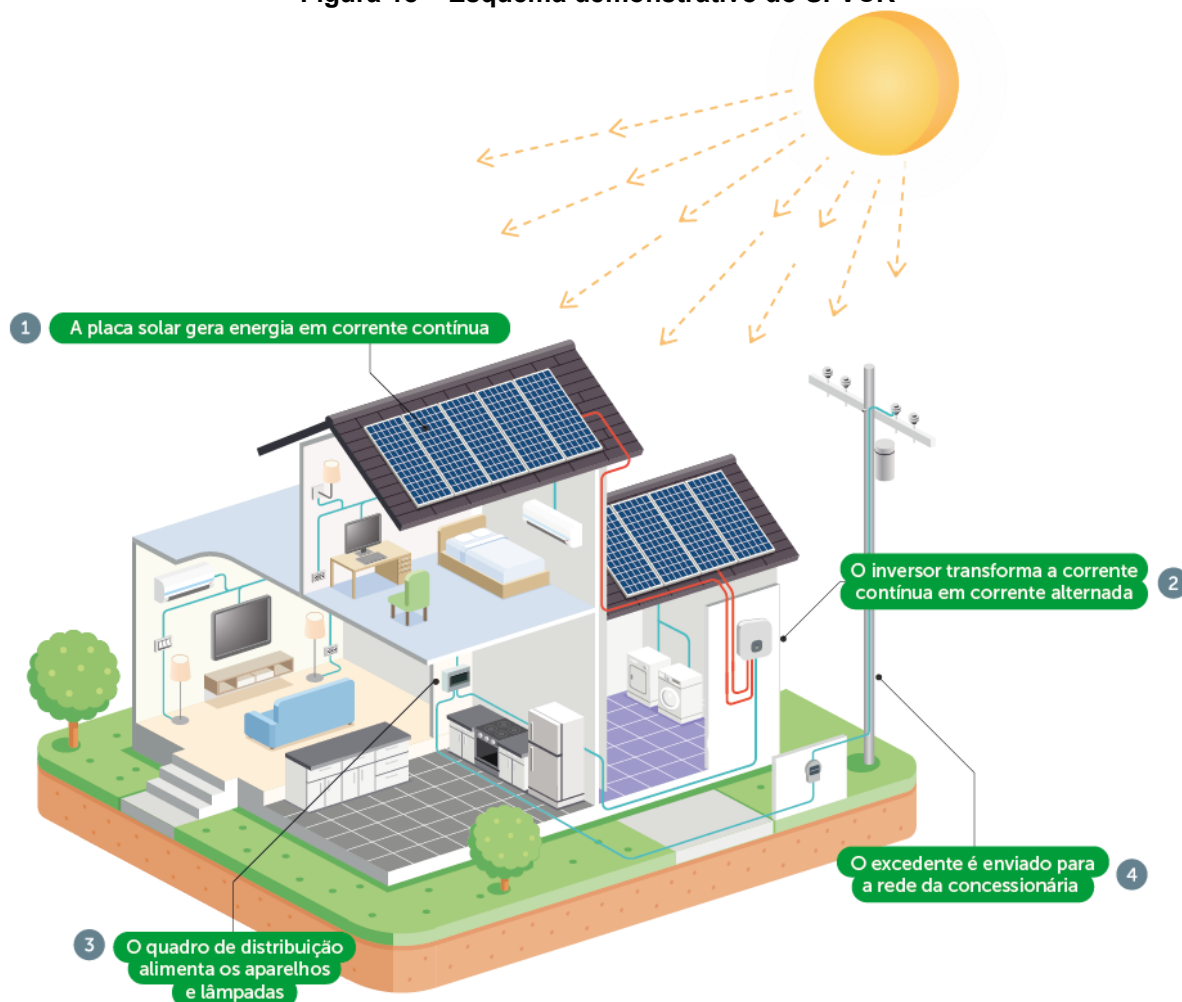
3.2.1 Energia solar fotovoltaica

A energia solar fotovoltaica consiste na conversão direta da energia solar em energia elétrica, através de painéis solares fotovoltaicos. Os sistemas fotovoltaicos são capazes de captar a luz solar e produzir corrente elétrica, esta é processada por diferentes dispositivos para que então seja armazenada em bancos de baterias ou utilizada conectada à rede elétrica (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Como discorrido no tópico 2.3, existem duas classificações dos sistemas fotovoltaicos: *on-grid* e *off-grid*. Para a estação tubo, o modelo ideal é o conectado à

rede: ou seja, sistema *on-grid*, sendo classificado como microgeração distribuída, conforme Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012 (ANEEL, 2012).

Figura 18 – Esquema demonstrativo do SFVCR



Fonte: Intelbras (2020)

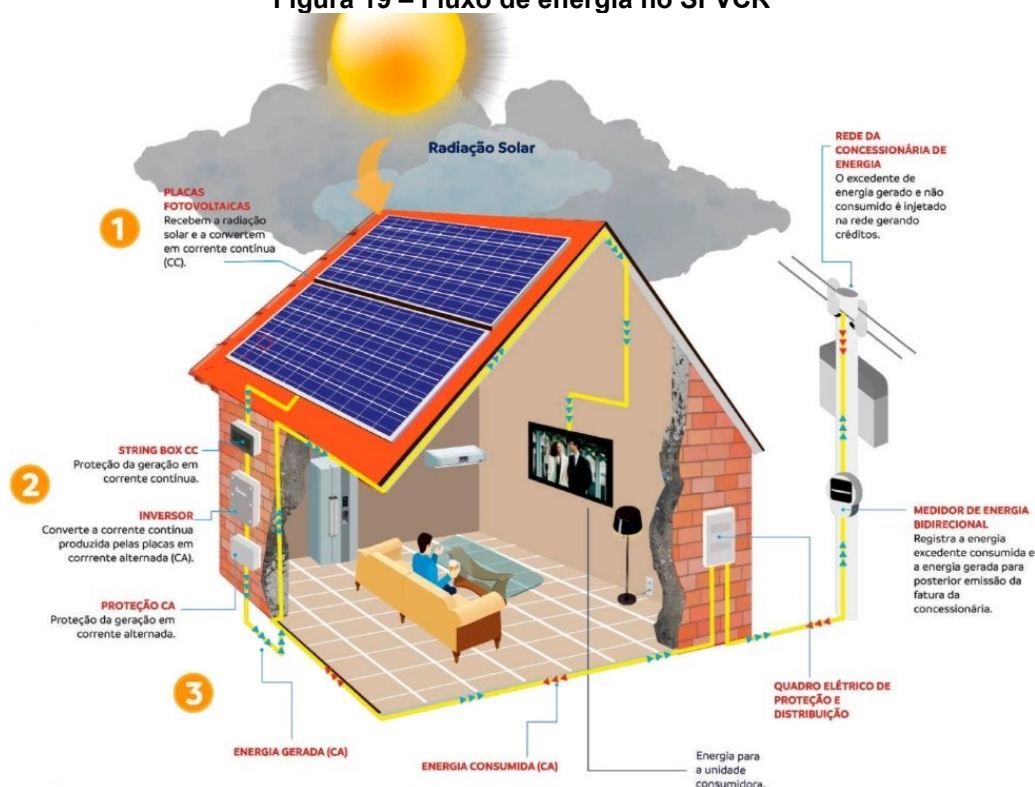
No sistema conectado à rede, são imprescindíveis os componentes (VILLALVA; GAZOLI, 2012):

- Módulo fotovoltaico: também conhecido como painel ou placa solar, é o local onde ocorre o efeito fotovoltaico. É composto de um conjunto de células fotovoltaicas interligadas eletricamente e encapsuladas em uma estrutura rígida, com o objetivo de produzir tensão;
- Inversor de tensão: dispositivo eletrônico que converte a tensão e corrente contínuas (CC) em tensão e corrente alternadas (CA);

- Estrutura de fixação: material de instalação, a estrutura, feita na maioria dos casos no telhado do imóvel, deve ser resistente aos agentes atmosféricos.
- *String Box*: quadro de proteção e isolamento ligado aos módulos fotovoltaicos e ao inversor, contém uma chave seccionadora, fusíveis e DPS (dispositivo de proteção contra surtos). A função principal é proteger o sistema no caso de descargas atmosféricas e surtos de tensão.

Neste sentido, a alternativa energética escolhida é o Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica (SFVCR). Essa geração já é consolidada no mercado brasileiro; das energias renováveis disponíveis, a solar fotovoltaica é a mais instalada para consumidores residenciais (EPE, 2022).

Figura 19 – Fluxo de energia no SFVCR



Fonte: PremiumSolar (2022)

Um dos principais elementos do SFVCR é módulo fotovoltaico, composto de uma série de células fotovoltaicas. Essas células eram inicialmente compostas de silício (Si) em suas diferentes formas: cristalino, policristalino e amorfo. Atualmente, as células fotovoltaicas podem ser divididas em três gerações de acordo com seu material e suas características (LANA *et al.*, 2015).

A primeira geração, chamada de células de lâminas cristalinas, é composta de silício cristalino (c-Si), que se subdivide em silício monocristalino (m-Si) e silício policristalino (p-Si). As células de silício monocristalino apresentam maior confiabilidade e eficiência de conversão fotovoltaica, sendo possível encontrar células com até 22,7% de eficiência no mercado (MACHADO; MIRANDA, 2015).

A segunda geração, intitulada de célula de filmes finos, tem como as mais comuns as células de silício amorfo (a-Si), as células de telureto de cádmio (CdTe), e as células de disselto de cobre-índio-gálio (CIGS) (LANA *et al.*, 2015). São atrativas por contarem com uma série de vantagens em relação às cristalinas, dentre elas a menor quantidade de matéria prima para a sua fabricação, um menor custo em sua produção e menor complexidade de produção. Por outro lado, performam mal no mercado, devido a sua baixa eficiência de conversão fotovoltaica, toxicidade de alguns elementos que a compõe e alto custo de comercialização dos módulos (MACHADO; MIRANDA, 2015).

A terceira geração, ainda em fase de pesquisa e desenvolvimento, compreenderá entre outras tecnologias, as células orgânicas ou poliméricas. Há uma expectativa que estas devam ser altamente eficientes, possuir materiais de baixa toxicidade e baixo custo (LANA *et al.*, 2015).

3.3 Dimensionamento do SFVCR

Em um sistema fotovoltaico é imprescindível a realização de pesquisas para um dimensionamento assertivo e eficiente. Esta seção aborda a escolha dos equipamentos e dispositivos para o sistema em estudo. Os próximos tópicos apresentam o dimensionamento, a tipologia das células e o ângulo de inclinação dos módulos fotovoltaicos.

3.3.1 Levantamento de cargas

Para o projeto da estação tubo Santa Bernadethe, foi necessário realizar o levantamento das cargas e demanda energética da estação, buscando determinar o consumo energético médio mensal (kWh/mês) para o dimensionamento dos painéis fotovoltaicos.

As cargas da estação tubo foram determinadas em maio de 2022, Curitiba – PR (-25.4850°, -49.2669°). As medições foram feitas visualmente, de forma direta, em

uma única ida ao local, no dia 15 de maio de 2022. Nesta visita, constatou-se que a estação tubo possui: lâmpadas LED (do inglês, *light-emitting diode*), catracas eletrônicas, portas automáticas, letreiros de LED 100x20cm, câmeras de segurança e tomadas de uso geral.

Foi verificada a potência unitária e o tempo de funcionamento de cada equipamento. No caso das portas automáticas, avaliou-se o número de vezes por dia que cada linha passa na estação, conforme os dados informados no site da URBS.

Fotografia 3 – Catracas eletrônicas da estação tubo Santa Bernadethe



Fonte: Autoria própria (2022)

Fotografia 4 – Letreiro LED, portas automáticas e lâmpadas tubulares LED



Fonte: Autoria própria (2022)

Fotografia 5 – Câmeras de segurança, letreiro LED e TUG



Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 1 – Quadro de Cargas

ID Carga	Qntd.	Carga	Potência unitária [W]	Tempo de funcionamento
A	20	Lâmpada Tubular LED	18	ON/OFF (Cobrador) 18h - 07h
B	1	Catraca eletrônica	66	24h / 7d
C	1	Motor portas automáticas Lado direito - Linha 616	400	Dias úteis: 25x/dia Sáb, dom e feriado: 13x/dia
D	1	Motor portas automáticas Lado esquerdo - Linha 550	400	Dias úteis: 142x/dia Sáb, dom e feriado: 83x/dia
E	1	Motor portas automáticas Lado esquerdo - Linha 350	400	Dias úteis: 49x/dia Sáb, dom e feriado: 31x/dia
F	4	Letreiros de LED	50	24h / 7d
G	4	Câmeras de segurança	4,5	24h / 7d
H	4	TUG's	Entre 5 e 20	Estimado 1h / dia

Fonte: Autoria própria (2022)

Após determinadas as cargas e suas potências unitárias, calcula-se a energia das cargas em kWh, conforme a Equação (1).

$$Energia [kWh] = \frac{Qntd * P_{unitária}}{1000} \quad (1)$$

Posteriormente, para determinar o consumo energético da estação tubo, é necessário calcular o consumo mensal médio das cargas em kWh/mês, conforme Equação (2). Na qual, o mês médio é uma média de quantos dias teríamos em um mês considerando anos bissextos, conforme Equação (3).

$$Consumo [kWh/mês] = \frac{Energia}{Mês\ médio} \quad (2)$$

$$Mês\ médio = \frac{(365 * 3) + 366}{4 * 12} = 30,4375\ dias \quad (3)$$

Tabela 2 – Consumo energético da estação tubo

ID Carga	Qntd.	Carga	Energia [kWh]	Consumo [kWh/mês]
A	20	Lâmpada Tubular LED	4,680	142,448
B	1	Catraca eletrônica	1,584	48,213
C	1	Motor portas automáticas	0,012	0,376
		Lado direito - Linha 616	0,006	0,195
D	1	Motor portas automáticas	0,070	2,134
		Lado esquerdo - Linha 550	0,041	1,248
E	1	Motor portas automáticas	0,024	0,737
		Lado esquerdo - Linha 350	0,015	0,466
F	4	Letreiros de LED	4,800	146,100
G	4	Câmeras de segurança	0,432	13,149
H	4	TUG's	0,005	0,152
Total			11,670	355,217

Fonte: Autoria própria (2022)

Em reunião com a URBS, nos foi informado que estações tubo de grande porte, como a Santa Bernadethe, possuem entrada trifásica. Além disso, para essa unidade consumidora a média de consumo de energia elétrica mensal é de 354 kWh/mês.

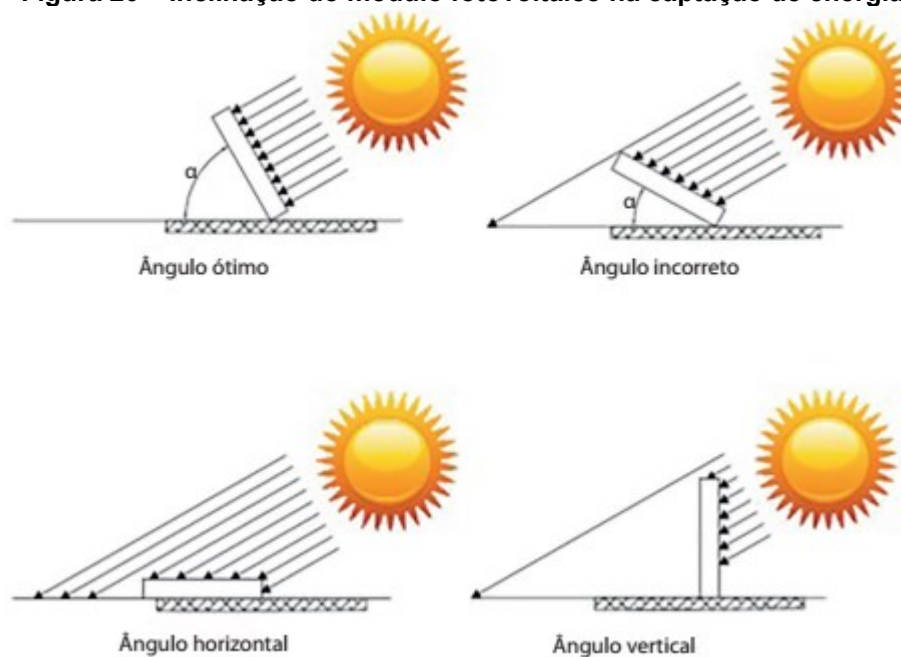
Desta forma, as informações obtidas com a URBS são coerentes aos dados coletados neste levantamento. Determinou-se como premissa para os próximos cálculos, o consumo médio mensal calculado na Tabela 2.

3.3.2 Horas de sol pleno

Segundo Villalva e Gazoli (2012), a produção de energia elétrica pelos módulos fotovoltaicos depende do ângulo de inclinação dos mesmos. O ângulo de inclinação α depende da faixa de latitude geográfica que a instalação acontecerá; não sendo recomendado a instalação com ângulo menor que 10° afim de evitar o acúmulo de poeira sobre as placas.

A recomendação para determinar o α é inclinar os módulos com o mesmo ângulo de latitude do local. Dessa forma, garante-se um melhor desempenho do sistema fotovoltaico, com a produção de energia aproximadamente constante ao longo do ano (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

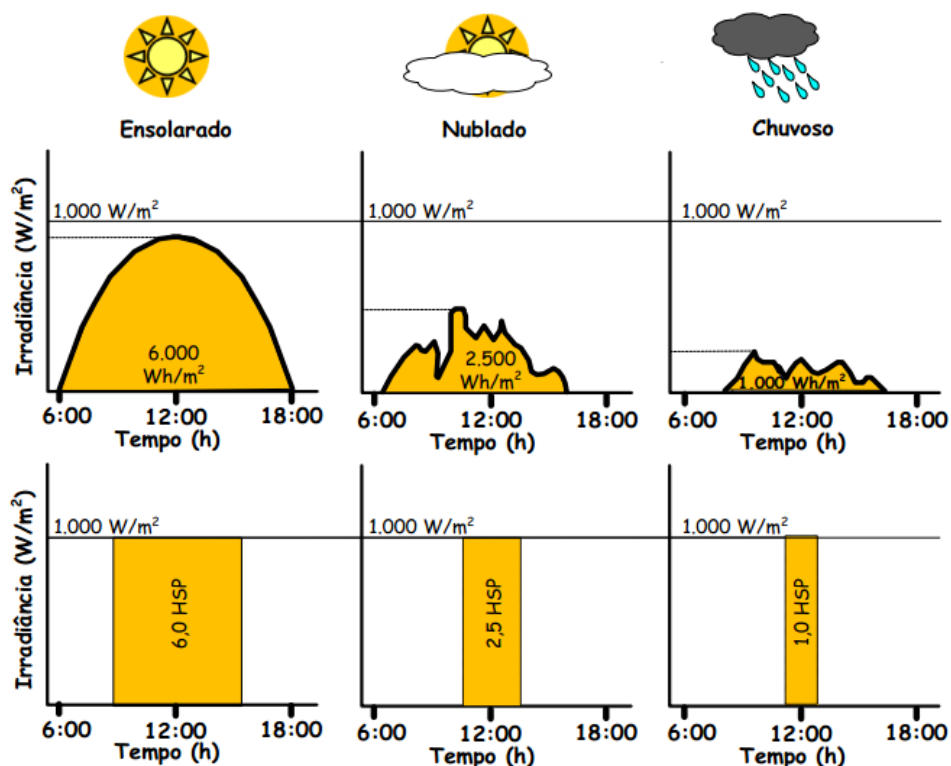
Figura 20 – Inclinação do módulo fotovoltaico na captação de energia



Fonte: Villalva e Gazoli (2012)

Além disso, cada localidade apresenta uma irradiação solar diária média, quantificada pela variável HSP (horas de sol pico). O HSP é uma média de quantidade de horas de irradiação solar disponível em um local ao término de um dia. A irradiação de um determinado local varia ao longo do tempo, sendo dependente do ambiente atmosférico e os movimentos da Terra, conforme Figura 21.

Figura 21 – Exemplo de perfis de radiação solar diária



Fonte: CRESESB (2014)

A estação tubo Santa Bernadethe fica localizada no município de Curitiba – PR (-25.4850°, -49.2669°). Para obter os dados de HSP, consulta-se o site do CRESESB (Centro referência para energia solar e eólica), conforme a Figura 22. Desta forma, obtém-se os dados referentes à irradiação solar diária média (Figura 23):

Figura 22 – Coordenadas geográficas inseridas no site do CRESESB

Coordenada Geográfica

Latitude	Longitude
<input type="text" value="25.48503795248"/> <input type="text" value="Sul"/>	<input type="text" value="49.26696656090"/> <input type="text" value="Oeste"/>
Norte:	
<input checked="" type="radio"/> graus decimais (00.00°) <input type="radio"/> graus, minutos e segundos (00°00'00")	
<input type="button" value="Buscar"/>	<input type="button" value="Limpar"/>

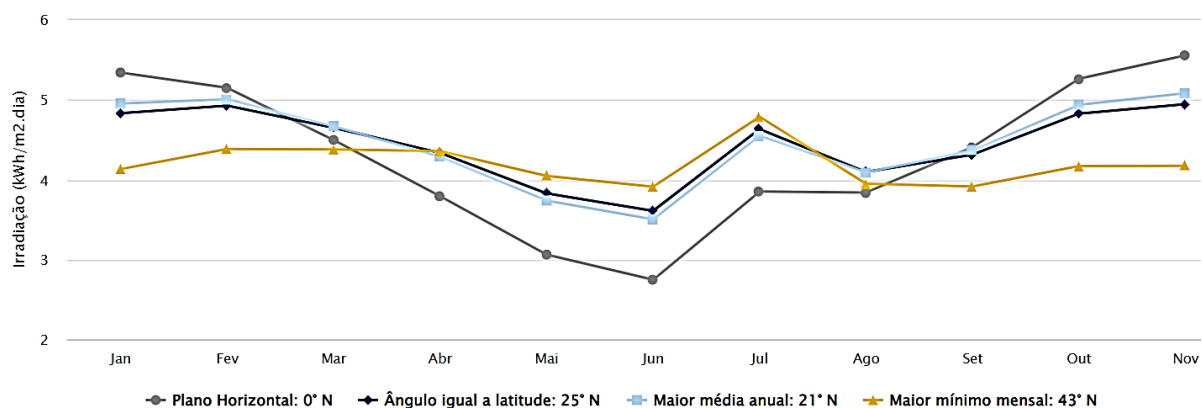
I. Os valores válidos de latitude devem estar na faixa de 12° Norte e 40° Sul e de longitude na faixa de 30° Oeste e 80° Oeste. Em caso de dúvida entre em contato conosco.

Fonte: CRESESB (2022)

Figura 23 – Irradiação solar no plano inclinado

Irradiação Solar no Plano Inclinado –Curitiba–Curitiba, PR–BRASIL

25,5° S; 49,249° O



Fonte: CRESESB (2022)

A Figura 23 indica os índices de radiação solar próximos da estação tubo Santa Bernadethe. Na imagem, é possível identificar os meses com maior e menor índices de radiação no local. Em dezembro, a irradiação alcança os maiores picos, com valores próximos de 5,0 kWh/m².dia; enquanto que, em junho, o índice cai consideravelmente para 3,5 kWh/m².dia.

Para este estudo, considerou-se para a instalação dos painéis fotovoltaicos as premissas: ângulo de inclinação igual a latitude e orientação dos painéis para o norte. Estes dados fornecem o HSP_{médio} = 4,39 kWh/m².dia., conforme a Figura 24.

Figura 24 – Cálculo no Plano Inclinado

Estação: Curitiba

Município: Curitiba, PR - BRASIL

Latitude: 25,5° S

Longitude: 49,249° O

Distância do ponto de ref. (25,485038° S; 49,266967° O):2,5 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		
Plano Horizontal	0° N	5,34	5,15	4,50	3,79	3,06	2,75	2,90	3,85	3,84	4,41	5,26	5,56	4,20	2,81
Ângulo igual a latitude	25° N	4,83	4,93	4,65	4,34	3,83	3,61	3,72	4,63	4,10	4,31	4,83	4,95	4,39	1,34
Maior média anual	21° N	4,95	5,01	4,67	4,29	3,74	3,50	3,62	4,55	4,09	4,37	4,94	5,08	4,40	1,58
Maior mínimo mensal	43° N	4,13	4,38	4,38	4,36	4,05	3,91	3,99	4,79	3,95	3,92	4,17	4,17	4,18	,87

Fonte: CRESESB (2022)

3.3.3 Dimensionamentos dos módulos solares

Os SFVCR são dependentes das variáveis: consumo energético, localização e tipo de fornecimento de energia da instalação. Conforme descrito nos tópicos anteriores, o sistema em estudo tem entrada trifásica com consumo médio mensal de 355,22 kWh/mês.

Atualmente, as concessionárias de energia cobram uma tarifa pela disponibilidade de eletricidade ao consumidor. Essa taxa é responsável pela

manutenção da infraestrutura que possibilita o fornecimento de energia; dessa forma, mesmo que não haja consumo, a unidade consumidora deve pagar pela disponibilidade.

O Art. 291 da Resolução Normativa ANEEL nº 1.000/2021, define o custo de disponibilidade como o valor de consumo para diferentes tipos de fornecimento de energia, se:

- Monofásico ou bifásico a dois condutores: a unidade consumidora paga uma taxa mínima equivalente a 30kWh;
- Bifásico a três condutores: a unidade consumidora paga uma taxa mínima equivalente a 50kWh;
- Trifásico: a unidade consumidora paga uma taxa mínima equivalente a 100kWh.

Conhecendo o consumo elétrico mensal médio de uma instalação, subtrai-se 100kWh para o dimensionamento do SFVCR, dado que independente do quanto seja produzido pelo sistema fotovoltaico, a unidade consumidora sempre terá que arcar com o custo de disponibilidade. Neste cenário, o SFVCR terá que produzir 255 kWh/mês de energia.

Tabela 3 – Dados coletados para o dimensionamento dos módulos fotovoltaicos

Dado	Valor	Unidade
Consumo elétrico mensal médio	355,22	kWh/mês
Consumo elétrico mensal médio ajustado <i>Considerando tipo de fornecimento trifásico</i>	255,22	kWh/mês
Ângulo de inclinação α	25,5°N	Graus (°)
HSP _{médio} - <i>Hora de sol pico</i>	4,39	kWh/m ² .dias
Mês médio	30,44	dias
Consumo elétrico diário médio <i>Consumo elétrico mensal médio ajustado / mês médio</i>	8,38	kWh/dia
Eficiência, <i>considerando perdas</i>	80%	(%)

Fonte: Autoria própria (2022)

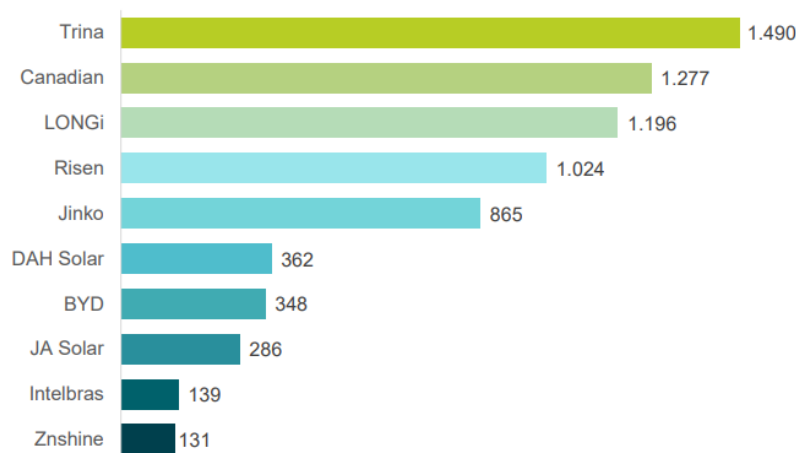
Com os dados obtidos, é necessário determinar a potência mínima do sistema, ou seja, a soma da potência de todos os módulos fotovoltaicos.

$$Potência_{total} [kWp] = \frac{Consumo\ elét.\ diário\ médio}{HSP * Eficiência} \quad (4)$$

Com base na Equação (4), calcula-se que a potência mínima do sistema deverá ser igual 2,4 kWp. Com isso, é possível definir o módulo fotovoltaico mais adequado para o sistema.

De acordo com os módulos solares disponíveis hoje no mercado, as 10 marcas mais vendidas são responsáveis por 81% de participação de mercado do setor (GREENER, 2022).

Figura 25 – Principais marcas de módulos fotovoltaicos
TOP 10 – Módulos Fotovoltaicos
 Volumes importados [MWp] - 2021



Fonte: Greener (2022)

Nesta etapa do dimensionamento, deve-se escolher o módulo fotovoltaico a ser instalado e fica a critério do projetista qual utilizar. Neste estudo, optou-se pelo módulo monocristalino CS3U-380MS da CanadianSolar, com certificação registrada no INMETRO.

Figura 26 – Data-sheet Módulo CS3U-MS

ELECTRICAL DATA STC*						MECHANICAL DATA	
CS3U	380MS	385MS	390MS	395MS	400MS	Specification	Data
Nominal Max. Power (Pmax)	380 W	385 W	390 W	395 W	400 W	Cell Type	Mono-crystalline
Opt. Operating Voltage (Vmp)	40.0 V	40.2 V	40.4 V	40.6 V	40.8 V	Cell Arrangement	144 [2 X (12 X 6)]
Opt. Operating Current (Imp)	9.50 A	9.58 A	9.66 A	9.73 A	9.81 A	Dimensions	2000 X992 X35 mm (78.7 X39.1 X1.38 in)
Open Circuit Voltage (Voc)	47.8 V	48.0 V	48.2 V	48.4 V	48.6 V	Weight	22.5 kg (49.6 lbs)
Short Circuit Current (Isc)	10.01 A	10.09 A	10.17 A	10.25 A	10.33 A	Front Cover	3.2 mm tempered glass
Module Efficiency	19.2%	19.4%	19.7%	19.9%	20.2%	Frame	Anodized aluminium alloy, crossbar enhanced
Operating Temperature	-40°C ~ +85°C					J-Box	IP68, 3 bypass diodes
Max. System Voltage	1500V (IEC/UL) or 1000V (IEC/UL)					Cable	4 mm ² (IEC), 12 AWG (UL)
Module Fire Performance	TYPE 1 (UL 1703) or Class C (IEC 61730)					Cable Length (Including Connector)	Portrait: 400 mm (15.7 in) (+) / 280 mm (11.0 in) (-); landscape: 1250 mm (49.2 in); leap-frog connection: 1670 mm (65.7 in)*
Max. Series Fuse Rating	30 A					Connector	T4 series or H4 UTX or MC4-EVO2
Application Classification	Class A					Per Pallet	30 pieces
Power Tolerance	0 ~ + 10 W					Per Container (40' HQ)	660 pieces
* Under Standard Test Conditions (STC) of Irradiance of 1000 W/m ² , spectrum AM 1.5 and cell temperature of 25°C.						* For detailed information, please contact your local Canadian Solar sales and technical representatives.	
ELECTRICAL DATA NMOT*						TEMPERATURE CHARACTERISTICS	
CS3U	380MS	385MS	390MS	395MS	400MS	Specification	Data
Nominal Max. Power (Pmax)	283 W	287 W	290 W	294 W	298 W	Temperature Coefficient (Pmax)	-0.36 % / °C
Opt. Operating Voltage (Vmp)	37.2 V	37.4 V	37.6 V	37.8 V	38.0 V	Temperature Coefficient (Voc)	-0.29 % / °C
Opt. Operating Current (Imp)	7.60 A	7.66 A	7.72 A	7.78 A	7.84 A	Temperature Coefficient (Isc)	0.05 % / °C
Open Circuit Voltage (Voc)	44.8 V	45.0 V	45.2 V	45.4 V	45.6 V	Nominal Module Operating Temperature	42 ± 3°C
Short Circuit Current (Isc)	8.08 A	8.14 A	8.20 A	8.27 A	8.33 A		
* Under Nominal Module Operating Temperature (NMOT), irradiance of 800 W/m ² , spectrum AM 1.5, ambient temperature 20°C, wind speed 1 m/s.							

Fonte: Canadian Solar (2022)

Com base nos dados do painel fotovoltaico escolhido, calcula-se a quantidade de módulos necessários (adimensional) para suprir a demanda energética da instalação.

$$n_{\text{módulos}} = \frac{\text{Potência}_{\text{total}} * 1000}{\text{Potência}_{\text{módulo}}} \quad (5)$$

Sendo a potência de cada módulo igual 380Wp (Figura 26), de acordo com a Equação (5), calcula-se que são necessários no mínimo 7 módulos fotovoltaicos. Neste sistema, determinou-se o uso de 8 módulos solares, totalizando 3,04 kWp de potência instalada.

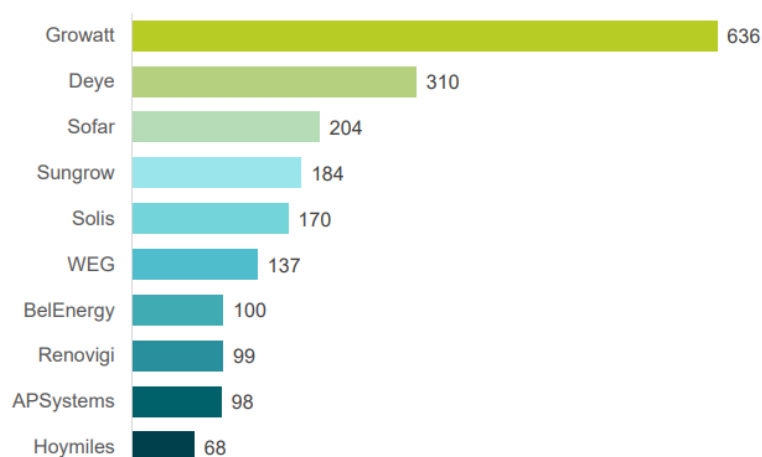
3.3.4 Dimensionamento do inversor

No SFVCR, o inversor é um elemento essencial, sendo um dispositivo responsável pela conversão de tensão e corrente elétrica contínua (CC) fornecida pelos geradores fotovoltaicos para tensão e corrente elétrica alternada (CA). Além disso, em sistemas *on-grid*, o inversor também é responsável pela sincronização e injeção da energia elétrica gerada nos módulos na rede de distribuição de energia elétrica (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

A escolha do inversor depende da potência total gerada do conjunto de módulos fotovoltaicos instalados; além disso, deve-se considerar fatores ambientais, econômicos e de desempenho (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

De acordo com os inversores fotovoltaicos disponíveis hoje no mercado, as 10 marcas mais vendidas são responsáveis por 76% de participação de mercado do setor (GREENER, 2022).

Figura 27 – Principais marcas de inversores fotovoltaicos
TOP 10 – Inversores Fotovoltaicos
Até 9,9 kW - 2021 (MW)



Fonte: Greener (2022)

Para este estudo, optou-se pelo inversor da marca Deye, modelo SUN-3K-G. A Figura 28 mostra as especificações técnicas do equipamento, o qual apresenta eficiência igual a 97,5%. O inversor possui potência máxima de entrada igual a 3,9kW, atendendo a potência total gerada de 3.04 kWp.

Figura 28 – Data-sheet Inversor SUN-3K-G

Technical Data

www.deyeinverter.com

Model	SUN-1K-G	SUN-1.5K-G	SUN-2K-G	SUN-2.5K-G	SUN-3K-G
Input Side					
Max. DC Input Power (kW)	1.3	2	2.6	3.3	3.9
Max. DC Input Voltage (V)	550				
Start-up DC Input Voltage (V)	80				
MPPT Operating Range (V)	70~500				
Max. DC Input Current (A)	13				
Max. Short Circuit Current (A)	19.5				
Number of MPPT / Strings per MPPT	1/1				
Output Side					
Rated Output Power (kW)	1	1.5	2	2.5	3
Max. Active Power (kW)	1.1	1.7	2.2	2.75	3.3
Nominal Output Voltage / Range (V)	L/N/PE 220V/0.85Un-1.1Un, 230V/0.85Un-1.1Un (Optional)				
Rated Grid Frequency (Hz)	50 / 60 (Optional)				
Operating Phase	Single phase				
Rated AC Grid Output Current (A)	4.3	6.5	8.7	10.9	13
Max. AC Output Current (A)	4.8	7.2	9.6	12	14.3
Output Power Factor	0.8 leading to 0.8 lagging				
Grid Current THD	<3%				
DC Injection Current (mA)	<0.5%				
Grid Frequency Range	47~52 or 57~62 (Optional)				
Efficiency					
Max. Efficiency	97.3%	97.3%	97.3%	97.3%	97.5%
Euro Efficiency	97.1%	97.1%	97.1%	97.1%	97.3%
MPPT Efficiency	>99%				

Fonte: Deye Inverter (2022)

O dispositivo possui uma *string*² por MPPT³; ou seja, o inversor é capaz de otimizar o conjunto de painéis conectados em série nesta entrada.

Definido o inversor, faz-se necessário verificar se o dispositivo previne sobrecargas, atendendo os critérios de potência, corrente e tensão do sistema.

3.3.4.1 Critério de Potência

O inversor instalado deve trabalhar com no máximo 20% de sobrecarga de energia gerada nos inversores. Para isso, analisa-se quantos módulos podem ser instalados no sistema de tal forma que não ocorra sobrecarga ($n_{m\acute{a}x_inversor}$), este valor é definido pela Equação (6) (ZILLES, 2012).

$$n_{m\acute{a}x_inversor} = \frac{Pot\acute{e}ncia_{m\acute{a}x_inversor}}{Pot\acute{e}ncia_{m\acute{o}dulo}} \quad (6)$$

Sendo a potência de cada módulo igual a 380Wp, e a potência máxima do inversor igual a 3,9kW, calcula-se que este dispositivo é capaz de suportar até 10 módulos fotovoltaicos Canadian Solar CS3U-MS.

² *String*, é o nome utilizado para a fileira de módulos conectados em série (ZILLES, 2012).

³ MPPT (*Maximum Power Point Tracking*), é a tecnologia dos inversores fotovoltaicos de rastreamento do ponto máximo de potência. Esta inovação permite buscar o melhor ponto de aproveitamento de potência do arranjo dos módulos (ZILLES, 2012).

Conforme exposto na seção anterior, o sistema em estudo considera 8 módulos fotovoltaicos na instalação; conclui-se que para o critério de potência o inversor atende aos requisitos do SFVCR.

3.3.4.2 Critério de Corrente

O inversor deve ser capaz de suportar a corrente máxima gerada nos módulos; para determinar este valor, calcula-se a corrente conforme a Equação (7), considerando a temperatura máxima que o sistema pode operar (ZILLES, 2012). Para o cálculo, utiliza-se os dados coletados dos *data-sheets* (Figura 26 e Figura 28).

$$I_{CC_m\acute{a}x_m\acute{o}dulo} = I_{SC} + I_{SC} * [(T_{m\acute{a}x} - T_{CNTP}) * (TC_{I_{SC}}/100)] \quad (7)$$

$$I_{CC_m\acute{a}x_m\acute{o}dulo} = 10,01 + 10,01 * \left[(85 - 25) * \left(\frac{0,05}{100} \right) \right] = 10,31 \text{ A} \quad (7.1)$$

A corrente máxima nesse cenário é igual a 10,31 A. Conforme apresentado no *data-sheet* do inversor, a corrente máxima que o controlador MPPT do inversor suporta é igual a 19,5 A. Conclui-se que, para o critério de corrente, o inversor atende aos requisitos do SFVCR.

3.3.4.3 Critério de Tensão

Para o critério de tensão, a análise é próxima ao critério de corrente. Entretanto, para este critério, a Equação (8) considera a temperatura mínima que o sistema pode operar (ZILLES, 2012). Da mesma forma, utiliza-se os dados coletados dos *data-sheets* (Figura 26 e Figura 28).

$$V_{OC_m\acute{a}x_m\acute{o}dulo} = V_{OC} + V_{OC} * [(T_{m\acute{i}n} - T_{CNTP}) * (TC_{V_{OC}}/100)] \quad (8)$$

$$V_{OC_m\acute{a}x_m\acute{o}dulo} = 47,8 + 47,8 * \left[(0 - 25) * \left(\frac{-0,29}{100} \right) \right] = 51,27 \text{ V} \quad (8.1)$$

Para o critério da tensão, deve-se considerar o número de módulos conectados a esta *string* (conexão em série):

$$V_{OC_m\acute{a}x_sistema} = V_{OC_m\acute{a}x_m\acute{o}dulo} * n_{m\acute{o}dulos} \quad (9)$$

$$V_{OC_m\acute{a}x_sistema} = 51,27 * 8 = 410,12 \text{ V} \quad (9.1)$$

O inversor deve ser capaz de suportar a tensão máxima gerada pelo conjunto de 410,12 V. De acordo com o data-sheet do inversor, a tensão máxima para o dispositivo é igual a 500V. Conclui-se que, para o critério de tensão, o inversor atende aos requisitos do SFVCR.

4 VIABILIDADE ECONÔMICA E FINANCEIRA DO PROJETO

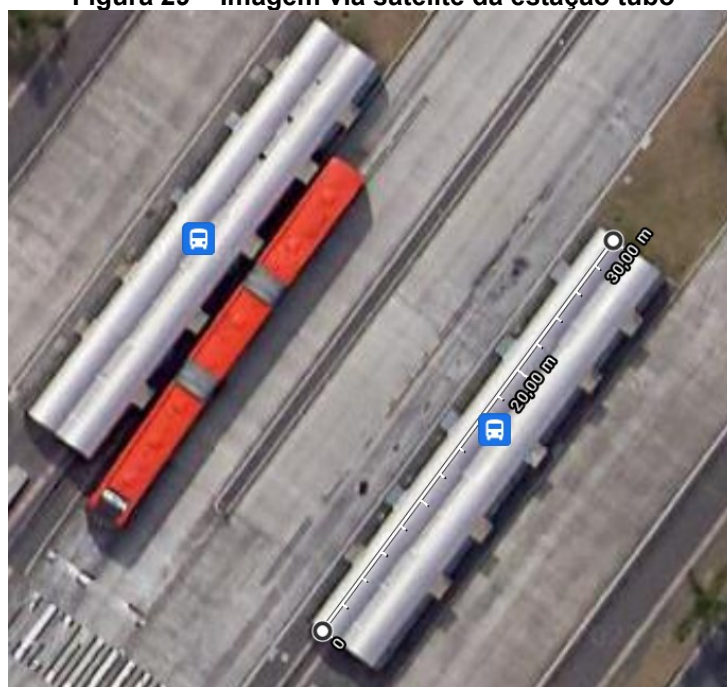
Com o SFVCR dimensionado, determinou-se que o projeto deve ter potência total de 3,04 kWp, sendo assim capaz de atender a demanda de energia da estação tubo Santa Bernadethe. Para isso, são necessários 8 módulos fotovoltaicos dispostos em série.

Além disso, a área necessária para disposição dos painéis é igual a 15,87 m², conforme a Equação (10). Os painéis serão sobrepostos às chapas de alumínio que cobrem o topo da estação tubo, como ilustra a Figura 29.

$$A_{Total_cobertura} = A_{módulo} * n_{módulos} = (l_{mód} * c_{mód}) * n_{módulos} \quad (10)$$

$$A_{Total_cobertura} = (2 * 0,992) * 8 = 15,872 \text{ m}^2 \quad (10.1)$$

Figura 29 – Imagem via satélite da estação tubo



Fonte: Google Maps (2022)

A energia produzida por cada módulo é dependente de diferentes fatores, tais quais a incidência solar média do local, a área e eficiência de cada módulo. Para o cálculo da capacidade de geração de energia, considera-se a Equação (11) (ZILLES, 2012).

$$E_{\text{módulo}} = A_{\text{módulo}} * \eta * HSP \quad (11)$$

Onde: $A_{\text{módulo}}$ representa a área e η a eficiência de cada módulo fotovoltaico, valor obtido do *data sheet* (CS3U 380MS – *Dimensions e Module Efficiency*).

$$E_{\text{módulo}} = (2 * 0,992) * \left(\frac{19,2}{100}\right) * 4,39 \cong 1,672 \text{ kWh/dia} \quad (11.1)$$

Com base nos dados disponibilizados nas especificações do módulo, determina-se que a energia diária produzida por cada módulo é aproximadamente de 1,67 kWh/dia.

Com o resultado obtido e o valor da potência nominal de cada módulo, é possível estimar a geração média mensal e anual do SFVCR. Para a geração mensal, multiplica-se o valor obtido E_M pelo mês médio e pela quantidade de módulos. Para a geração anual, multiplica-se o valor obtido por 12 meses.

Para a capacidade instalada do sistema, multiplica-se a potência de cada módulo pelo número de módulos instalados. Destaca-se o impacto das perdas em todo o processo de geração e conversão CC/CA de energia; dado isto, considera-se uma queda de 20% na produção de energia.

Tabela 4 – Eficiência do SFVCR dimensionado

	Sem perdas	Considerando perdas	Unidade
Energia produzida por cada módulo	1,67	1,34	kWh/dia
Potência instalada	3,04	2,43	kWp
Geração mensal	407,20	325,76	kWh/mês
Geração anual	4.886,38	3.909,11	kWh/ano

Fonte: Autoria própria (2022)

Conforme a Tabela 4, a capacidade de geração anual de energia do SFVCR dimensionado é aproximadamente igual a 3.909,11 kWh, considerando as possíveis perdas do sistema.

4.1 Orçamento do projeto

O orçamento total previsto do projeto foi realizado em consulta a três empresas especializadas em sistemas fotovoltaicos. As empresas serão identificadas pelos nomes fantasia Empresa A, B e C, além disso os orçamentos recebidos contemplam apenas os materiais a serem utilizados, conforme mostra a Tabela 5.

Com as informações obtidas, estimou-se o valor total do projeto considerando as percentagens para o valor final: 60% representando os materiais utilizados, 30% representando a instalação do sistema, e 10% representando o valor de projeto., conforme mostra a Tabela 6.

Tabela 5 – Materiais utilizados nos orçamentos

	Módulo fotovoltaico	Inversor fotovoltaico	Valor orçado
Empresa A	BelEnergy MFVHO-MO-144-550W	BelEnergy BEL-3K-G	R\$ 7.850,72
Empresa B	Vertex S TSM-DE09	SOFAR 1.1K~3.3KTL-G3	R\$ 8.109,07
Empresa C	Não informado	Não informado	R\$ 10.533,60

Fonte: Autoria própria (2022)

As especificações dos materiais escolhidos estão descritas nos Anexos A e B.

Tabela 6 – Orçamentos para o estudo

	Materiais	Instalação	Projeto	Total
Empresa A	R\$ 7.850,72	R\$ 3.925,36	R\$ 1.308,45	R\$ 13.084,53
Empresa B	R\$ 8.109,07	R\$ 4.054,54	R\$ 1.351,51	R\$ 13.515,12
Empresa C	R\$ 10.533,60	R\$ 5.266,80	R\$ 1.755,60	R\$ 17.556,00
	Orçamento médio			R\$ 14.718,55

Fonte: Autoria própria (2022)

Considerando os dados obtidos, é possível estimar que o custo médio de instalação desse projeto, considerando materiais e mão de obra, seria de aproximadamente R\$ 14.718,55⁴.

4.2 Cálculo do Retorno de Investimento para Pagamento à Vista

Como visto na seção anterior, o custo da aquisição de um sistema fotovoltaico é um investimento inicial que contempla toda a instalação do projeto; entretanto, o sistema terá custos variáveis de operação, manutenção e reposição de materiais ao longo do tempo. Nesta seção, busca-se estimar o cálculo do retorno de investimento, considerando que o investimento inicial seja pago à vista.

Para estimar o valor que seria economizado em um ano de sistema instalado, é necessário multiplicar a energia gerada no período pelo valor do kWh. As tarifas

⁴ Cálculos com base em novembro de 2022.

aplicáveis às estações tubo são contempladas no Subgrupo B3 - Comercial, Classe Serviços do poder público estadual.

Figura 30 – Tarifas aplicadas ao Subgrupo B3

B3 - Comercial
Poder Público Estadual

		TE	TUSD	
Convencional (R\$/kWh)	Sem imposto	R\$ 0.25894	R\$ 0.31080	
	Com imposto	R\$ 0.33090	R\$ 0.39718	
		Fora de Ponta		
Branca	Sem imposto	R\$ 0.24720	R\$ 0.25304	
	Com imposto	R\$ 0.31590	R\$ 0.32336	
			Intermediário	
	Sem imposto	R\$ 0.24720	R\$ 0.47729	
	Com imposto	R\$ 0.31590	R\$ 0.60994	
		Ponta		
	Sem imposto	R\$ 0.38808	R\$ 0.70155	
	Com imposto	R\$ 0.49593	R\$ 0.89652	

Fonte: COPEL (2022)

Para este projeto, considerou-se a tarifa convencional, com imposto, em bandeira verde. A tarifa⁵ considerada foi de R\$ 0,3309/kWh para a TE (Tarifa de Energia) e R\$ 0,39718/kWh para a TUSD (Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição).

No contexto dos sistemas fotovoltaicos, o tempo de retorno de investimento, ou *payback*, indica o tempo necessário para que as economias geradas cubram os gastos iniciais da instalação; ou seja, o tempo necessário para que o sistema se pague e comece a fornecer lucro para o investidor. Uma das formas de determinar o *payback* simples é através da Equação (12) (SOLAR, 2017).

$$Payback = \frac{Investimento}{E_{Ger_mês} * Tarifa} \quad (12)$$

⁵ Tarifas consultadas em novembro de 2022.

$$Payback = \frac{R\$ 14.718,55}{325,76 * (0,3309 + 0,39717)} \cong 62 \text{ meses} \quad (12.1)$$

Conforme o exposto, o *payback* se dará em 62 meses aproximadamente. Ou seja, o equivalente a 5 anos e 2 meses.

4.3 Viabilidade do projeto

Em uma análise financeira, vários fatores devem ser considerados. De modo geral, para sistemas fotovoltaicos o *payback* é o conceito mais utilizado, em especial pela sua tangibilidade com as contas de energia. Entretanto, um bom comparativo de viabilidade de projetos é a rentabilidade de um investimento.

A rentabilidade é a taxa de quanto uma aplicação paga sobre o valor investido; ou seja, é uma porcentagem que indica o quanto o investidor lucra. Para este estudo, considera-se a rentabilidade nominal no período de um ano, desconsiderando as variações de inflação e taxas (XP INVESTIMENTOS, 2021).

Neste estudo, o cálculo da rentabilidade do projeto é a proporção entre a economia no primeiro ano de geração e o investimento inicial (SOLAR, 2017).

$$Rentabilidade = \frac{E_{Ger_ano} * Tarifa}{Investimento} \quad (13)$$

$$Rentabilidade = \frac{3909,11 * (0,3309 + 0,39717)}{R\$ 14.718,55} = 19,34\% \quad (13.1)$$

O indicador de rentabilidade de um investimento pode orientar a viabilidade de um projeto, sendo possível compará-lo com outros indicadores de referência (XP INVESTIMENTOS, 2021). Ao comparar a rentabilidade de 19,34% do SFVCR em estudo com outros indicadores de 2022 como o Ibovespa (10,69%) ou Tesouro Selic (6,84%), conclui-se que o projeto há viabilidade de execução.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O cenário energético mundial passa por diversas transições ao longo do tempo de forma ininterrupta. Atualmente, a transição energética busca a geração de energia limpa, com sistemas de transmissão e distribuição automatizados e confiáveis. Neste sentido, o desenvolvimento sustentável é o protagonista das mudanças nas matrizes energéticas, sendo que no Brasil, observou-se o aumento da implementação das energias renováveis. Das fontes disponíveis no mercado, verificou-se a popularização da geração fotovoltaica, em especial pela queda dos custos de implementação e o pelo potencial fotovoltaico brasileiro.

O município de Curitiba é nomeado como capital ecológica do país, sendo a responsável por implementar processos inovadores que colocam a sustentabilidade em pauta. Neste sentido, um dos principais símbolos da cidade, o sistema de transporte integrado, também faz parte da transição energética do município.

Este estudo teve o objetivo inicial de propor uma estação tubo autossustentável no município de Curitiba, buscando fontes de geração de energia renovável viáveis tecnicamente, analisando também o aspecto financeiro da implementação de um sistema fotovoltaico. Diante dos cálculos de dimensionamento e retorno de investimento, o projeto mostrou-se viável pela taxa de rentabilidade de 19,34% no primeiro ano de operação.

Para a estação tubo Santa Bernadethe ser energeticamente autossustentável, faz-se necessário o investimento inicial de R\$ 14.718,55 para a instalação do sistema fotovoltaico, considerando os materiais, mão de obra de instalação e projeto. Com isso, o sistema instalado teria 8 painéis fotovoltaicos, com uma potência total instalada de 3,04kWp. Considerando um sistema com perdas, o SFVCR geraria 3.909,11 kWh no primeiro ano, o que se traduz em uma economia de R\$ 2.846,10.

Como recomendação para trabalhos futuros desta pesquisa, sugere-se considerar as alterações térmicas ao longo do tempo. Além disso, recomenda-se uma análise do conforto térmico da estação tubo, em que é possível utilizar a geração no local para alimentar possíveis cargas de aquecimento ou resfriamento do espaço. Ademais, com o avanço da regulamentação das gerações renováveis, é possível abordar uma possível compensação de energia para o excedente produzido, em especial pela capacidade de expansão no SFVCR instalado.

REFERÊNCIAS

- ACKERMANN, T.; SÖDER, L. An overview of wind energy-status 2002. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 6, n. 1-2, p. 67-127, 2002. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(02\)00008-4](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(02)00008-4). Acesso em: 20 nov. 2021.
- AMIN, S. M.; WOLLENBERG, B. F. Toward a smart grid: power delivery for the 21st century. **IEEE Power and Energy Magazine**, v. 3, n. 5, p. 34–41, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/MPAE.2005.1507024>. Acesso em: 1 nov. 2021.
- BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução normativa nº 482, de 17 de abril de 2012**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em: 01 nov. 2022.
- _____. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução normativa nº 1.000, de 7 de dezembro de 2021**. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.pdf>. Acesso em: 03 nov. 2022.
- ARBOIT, N. K. S. *et al.* Potencialidade de utilização da energia geotérmica no Brasil—uma revisão de literatura. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 26, p. 155-168, 2013. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/75194/78742>. Acesso em: 19 nov. 2021.
- ARMENDANI, W. A. *et al.* Conhecendo a Piezoeletricidade: Uma Nova Forma de Geração de Energia Elétrica. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, v. 9, p. 314-320, 2016. Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-eletrica/geracao-de-energia-eletrica>. Acesso em: 20 nov. 2021.
- ASHWIN, M. *et al.* Secure Design for Smart Bus Shelter Using Renewable Energy. **Journal of critical reviews**. v. 7, n. 01, 2020. Disponível em: <http://www.jcreview.com/fulltext/jcr070178.pdf?1580812797>. Acesso em: 15 ago. 2021.
- BAJAY, S. *et al.* **Impactos da inserção de Geração Distribuída Fotovoltaica e de Eficiência Energética no Setor Elétrico Brasileiro**: metodologia, cenários e resultados. ResearchGate, 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/325023310_Impactos_da_insercao_de_Geracao_Distribuida_Fotovoltaica_e_de_Eficiencia_Energetica_no_Setor_Eletrico_Brasileiro_metodologia_cenarios_e_resultados. Acesso em: 25 ago. 2021.
- BANERJI, A. *et al.* Microgrid: A review. **2013 IEEE Global Humanitarian Technology Conference: South Asia Satellite (GHTC-SAS)**, 2013. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6629883>. Acesso em: 18 nov. 2021.
- BONDARIK, R.; PILATTI, L. A.; HORST, D. J. Uma visão geral sobre o potencial de geração de energias renováveis no Brasil. **Interciência**, v. 43, n. 10, p. 680-688, 2018. Disponível em: <https://www.redalyc.org/jatsRepo/339/33957861002/33957861002.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2021.

BUENO, A. F. M.; BRANDÃO, C. A. L. Visão geral de tecnologia e mercado para os sistemas de armazenamento de energia elétrica no Brasil. **Associação Brasileira de Armazenamento e Qualidade de Energia**, 2016. Disponível em: http://abaque.com.br/wp-content/uploads/2017/07/Estudo_Mercado_Armazenamento_Brasil.pdf. Acesso em: 01 dez. 2021.

CANADIAN SOLAR. Data-sheet: High efficiency mono perc module CS3U. **Canadiansolar.com**. 2022. Disponível em: https://www.canadiansolar.com/wp-content/uploads/2020/05/Canadian_Solar-Datasheet-KuMax_CS3U-MS_EN.pdf. Acesso em: 09 nov. 2022.

COHN, Lisa. History of microgrids in the US: From Pearl Street to plug-and-play. **Microgridknowledge.com**. 2019. Disponível em: <https://www.microgridknowledge.com/about-microgrids/article/11429549/history-of-microgrids-in-the-us-from-pearl-street-to-plug-and-play>. Acesso em: 21 mai. 2022.

COPEL. Taxas e Tarifas - Copel | Companhia Paranaense de Energia. **Copel**. Disponível em: https://www.copel.com/site/copel-distribuicao/tarifas-de-energia-eletrica/#grupoB?utm_source=taxas-tarifas&utm_medium=grupoB&utm_campaign=menu-lateral. Acesso em: 13 nov. 2022.

CRESESB. CRESESB Centro de Referência para Energia Solar e Eólica. **Cepel.br**, 2022. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata&>. Acesso em: 11 nov. 2022.

CUNHA, E. A. A. *et al.* Aspectos históricos da energia eólica no Brasil e no mundo. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 8, n. 4, 2019. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/rber/article/view/65759/38008>. Acesso em: 19 nov. 2021.

DE QUEIROZ, R. *et al.* Geração de energia elétrica através da energia hidráulica e seus impactos ambientais. *In: Revista eletrônica em gestão, educação e tecnologia ambiental*. Universidade federal de santa maria, 2013. p. 2774-2784. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5902/223611709124>. Acesso em: 20 nov. 2021.

DEYE. Data-sheet: Single Phase String Inverter SUN- 1 / 1.5 / 2 / 2.5 / 3 K-G. **Deyeinverter.com**. 2022. Disponível em: <https://pt.deyeinverter.com/product/single-phase-string-inverter/SUN1-1-5-2-2-5-3KG-1-53KW-Single-Phase-1-MPPT.html>. Acesso em: 09 nov. 2022.

DI LASCIO, M. A.; FAGUNDES BARRETO, E. J. **Energia e desenvolvimento sustentável para a Amazônia rural brasileira**: eletrificação de comunidades isoladas. Ministério de Minas e Energia, 2009. Disponível em: https://agritrop.cirad.fr/567794/1/solucoes_energeticas_para_a_amazonia.pdf. Acesso em: 20 nov. 2021.

DINCER, I. Renewable energy and sustainable development: a crucial review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 4, n. 2, p. 157–175, 2000. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032199000118>. Acesso em: 04 nov. 2021.

EIA. **What is energy?**. U.S. Energy Information Administration (EIA). Eia.gov, 2020. Disponível em: <https://www.eia.gov/energyexplained/what-is-energy/>. Acesso em: 18 nov. 2021.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL BRAZILIAN ENERGY BALANCE**. 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-638/BEN2022.pdf>. Acesso em: 16 nov. 2022.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL BRAZILIAN ENERGY BALANCE**. 2016. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-126/topico-94/Relat%C3%B3rio%20Final%202016.pdf>. Acesso em: 03 dez. 2021.

ESPOSITO, A. S.; RIVERA, R.; TEIXEIRA, I. Redes elétricas inteligentes (smart grid): oportunidade para adensamento produtivo e tecnológico local. **Revista do BNDES 40**, 2013. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/2927/1/RB%2040%20Redes%20el%C3%A9tricas%20inteligentes_P.pdf. Acesso em: 19 nov. 2021.

ESTENDER, A. C.; PITTA, T. T. M. O conceito do desenvolvimento sustentável. **Revista Terceiro Setor & Gestão-UNG-Ser**, v. 2, n. 1, p. 22-28, 2008. Disponível em: <http://revistas.ung.br/index.php/3setor/article/viewFile/399/484>. Acesso em: 11 nov. 2021.

EVANILDO. Eletricidade do aperto. **Fapesp.br**. 2010. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/eletricidade-do-aperto/>. Acesso em: 21 maio. 2022.

FARROKHABADI, M. *et al.* Microgrid Stability Definitions, Analysis, and Examples. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 35, n. 1, p. 13–29, 2019. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8750828?casa_token=MvbYu7grtiwAAA:RJPkd32kEP9W498SctIANW-DFenqASP-C5bS5Jolu115m4rqi0D7ssBqald28LGM9RSQFK8vTc4. Acesso em: 17 ago. 2021.

FERREIRA, J. H.; TAVARES, C. **Desenvolvimento, Implementação e Simulação de um Controlador para Sistemas de Armazenamento de Energia com Baterias**. 2015. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/80451/2/36466.pdf>. Acesso em: 1 dez. 2021.

FERREIRA, I. Centros urbanos têm potencial para gerar energia eólica com turbinas no alto dos edifícios. **Jornal da USP**. 2021. Disponível em: <https://jornal.usp.br/ciencias/centros-urbanos-tem-potencial-para-gerar-energia-eolica-com-turbinas-no-alto-dos-edificios/>. Acesso em: 14 maio 2022.

FERNANDES, W. O. **Propostas para aplicação de estratégias sustentáveis na estação tubo padrão em Curitiba**. 2012. Disponível em: http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/797/1/CT_CECONS_II_2012_12.pdf. Acesso em: 18 nov. 2021.

GIZMODO BRASIL. **[Infográfico] O que é, como funciona e quais os benefícios do Smart Grid**. Gizmodo.uol.com.br. 2012. Disponível em: <https://gizmodo.uol.com.br/infografico-o-que-e-como-funciona-e-quais-os-beneficios-do-smart-grid/>. Acesso em: 08 dez. 2021.

GOLDEMBERG, J. Biomassa e energia. **Química nova**, v. 32, p. 582-587, 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/L6Pd3ZKdPqc4pZ4TQn5RyQy/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 19 nov. 2021.

GOOGLE MAPS. **Google Maps**. 2022. Disponível em: <https://www.google.com/maps/@-25.4850523,-49.2670368,18.81z>. Acesso em: 5 out. 2022.

GREENER. Estudo Estratégico Geração Distribuída: Mercado fotovoltaico. **Greener**. 2022. Disponível em: <https://www.greener.com.br/wp-content/uploads/2022/02/Estudo-Estrategico-de-Geracao-Distribuida-2021-Mercado-Fotovoltaico-2o-semester-v1.pdf>. Acesso em: 24 out. 2022.

GRID Energia. **O que são microrredes?**. Grid Energia - Consultoria em Energia. Disponível em: <https://gridenergia.com.br/blog/o-que-sao-microrredes-2/>. Acesso em: 8 dez. 2021.

GRUPO VOLVO AMÉRICA LATINA. **Volvo Bus lança guia de mobilidade urbana**. Sala de Imprensa Volvo. 2014. Disponível em: <https://saladeimprensavolvo.com.br/releases/218>. Acesso em: 25 ago. 2021.

HARTLEY, D. L.; SCHUELER, D. G. **Perspectives on solar energy and the environment**. Sandia National Lab. (SNL-NM), Albuquerque, NM (United States), 1990. Disponível em: <https://www.osti.gov/biblio/7172653>. Acesso em: 11 ago. 2021.

HAYDEN, E. **Introduction to microgrids**. Securicon Report, p. 1-13, 2013. Disponível em: <https://fdocuments.in/document/introduction-to-microgrids-to-microgridsintroduction-to-microgrids-ernie-hayden.html>. Acesso em: 10 nov. 2021.

HRVOJE NOVAK *et al.* **Railway transport system energy flow optimization with integrated microgrid**. ResearchGate. 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/305445294_Railway_transport_system_energy_flow_optimization_with_integrated_microgrid. Acesso em: 1 dez. 2021.

IEA. **Technology Roadmap - Smart Grids – Analysis - IEA**. 2011. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-smart-grids>. Acesso em: 20 nov. 2021.

IF WORLD DESIGN GUIDE. **IF WORLD DESIGN GUIDE: Integration system for urban transport**. Disponível em: <https://ifworlddesignguide.com/entry/16410-integriertes-system-fur-stadtischen-transport>. 2021. Acesso em: 24 ago. 2021.

INTELBRAS. **O que é energia solar?** Tudo sobre o sistema fotovoltaico. Blog Intelbras, 2020. Disponível em: <https://blog.intelbras.com.br/o-que-e-energia-solar-tudo-sobre-o-sistema-fotovoltaico/>. Acesso em: 6 nov. 2022.

JAPIASSÚ, C. E.; GUERRA, I. F. **30 anos do relatório Brundtland: nosso futuro comum e o desenvolvimento sustentável como diretriz constitucional brasileira**. Revista de Direito da Cidade, v. 9, n. 4, p. 1884-1901, 2017.

LANA, L. T. C. et al. Energia solar fotovoltaica: revisão bibliográfica. **Engenharias On-line**, v. 1, n. 2, p. 21-33, 2015. Disponível em: <http://revista.fumec.br/index.php/eol/article/view/3574>. Acesso em: 20 nov. 2021

LASSETER, R. H. MicroGrids. **2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.02CH37309)**, 2021. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/985003>. Acesso em: 1 nov. 2021.

LASSETER, R. H.; PAIGI, P. Microgrid: a conceptual solution. **2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No.04CH37551)**, 2021. IEEE, 2004. p. 4285-4290. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/PESC.2004.1354758>. Acesso em: 20 ago. 2021.

LE PAGE, M. L. **The green revolution is stalling**. *New Scientist*, v. 235, n. 3137, p. 22–23, 2017. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0262-4079\(17\)31513-0](https://doi.org/10.1016/S0262-4079(17)31513-0). Acesso em: 29 nov. 2021.

LOBO, R. V. *et al.* Energia Oceânica das Ondas: Uma alternativa de energia renovável. **PARAMÉTRICA**, v. 13, n. 14, 2021. Disponível em: <https://parametrica.emnuvens.com.br/parametrica/article/view/251>. Acesso em: 20 nov. 2021.

MACHADO, C. T.; MIRANDA, F. S. Energia Solar Fotovoltaica: uma breve revisão. **Revista virtual de química**, v. 7, n. 1, p. 126-143, 2015. Disponível em: <https://rvq-sub.sbq.org.br/index.php/rvq/article/view/664/508>. Acesso em: 19 nov. 2021.

MASCARELLO, M. *et al.* Planejamento urbano de Curitiba: entre o poder público e o capital imobiliário industrial. **Revista Três Pontos**, 2013. Disponível em: <https://periodicos.ufmg.br/index.php/revistatrespontos/article/view/3348>. Acesso em: 18 nov. 2021.

MILLER, G.; SPOOLMAN, S. **Environmental science: problems, connections and solutions**. Cengage Learning, 2010.

MUTANI, G.; VODANO, A.; PASTORELLI, M. Photovoltaic solar systems for smart bus shelters in the urban environment of Turin (Italy). **2017 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)**, 2017. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8211671>. Acesso em: 25 ago. 2021.

MOHAJAN, H. The Second Industrial Revolution has Brought Modern Social and Economic Developments - Munich Personal RePEc Archive. **Journal of Social Sciences and Humanities**, v. 6, n. 1, p. 1-14, 2019. Disponível em: <https://mpa.ub.uni-muenchen.de/98209/>. Acesso em: 28 nov. 2021.

NASCIMENTO, C. A. Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica. **Diss. Universidade Federal de Lavras**, 2004. Disponível em: https://www.solenerg.com.br/files/monografia_cassio.pdf. Acesso em: 20 nov. 2021.

OMIDO, A. R.; BARBOZA, C. S.; JÚNIOR, O. M. Energia Geotérmica: Uma Aliada Na Busca Da Eficiência Energética. *In: VIII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental – CONGEA*. 2017. Disponível em: <http://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2017/X-005.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2021.

ORTEGA-ARRIAGA, P. *et al.* Grid versus off-grid electricity access options: A review on the economic and environmental impacts. **Renewable and Sustainable Energy**

Reviews, v. 143, p. 110864, 2021. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110864>. Acesso em: 17 mai. 2022.

PREMIUM SOLAR. Sistema fotovoltaico. **Premiumenergiasolar.com**. Disponível em: <https://www.premiumenergiasolar.com/>. Acesso em: 07 nov. 2022.

PAUL, S. *et al.* A review of smart technology (Smart Grid) and its features. **2014 1st International Conference on Non Conventional Energy (ICONCE 2014)**, 2014.

Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6808719>. Acesso em: 20 nov. 2021.

PEREIRA, Fábio. Energy storage systems (sistemas de armazenamento de energia). **Neutro à Terra**, n. 12, p. 17-28, 2013. Disponível em:

<https://recipp.ipp.pt/handle/10400.22/3568>. Acesso em: 1 dez. 2021.

PRADHAN, P. *et al.* A Systematic Study of Sustainable Development Goal (SDG) Interactions. **Earth's Future**, v. 5, n. 11, p. 1169–1179, 2017. Disponível em:

<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2017EF000632>. Acesso em: 19 ago. 2021.

PRAKASH, S. V. Renewable Energy and Sustainable Development: an Overview. **Curie Journal**, v. 3, n. 2, 2010. Disponível em:

<http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&profile=ehost&scope=site&authType=crawler&jrnl=09741305&AN=55769942&h=iQYYmOo3LGEgyumgxZ41UWjZTS5hLrJI8tSt9DG4CaJvh8Zhb65%2FXnSDj7rLsfFirS11H%2FZh1oCVtJ4gUV1u4g%3D%3D&crl=c>. Acesso em: 04 nov. 2021.

PRATIBHA ARUN, V.; DIVYESH MEHTA. Eco-Friendly Electricity Generator Using Scintillating Piezo. **IJERA Int. Journal of Engineering Research and Application**, v. 3, n. 5, p. 478-482, 2013. Disponível em:

<https://www.academia.edu/4607732/Ci35478482>. Acesso em: 25 ago. 2021.

PRESTES, O.; DUARTE, F. Curitiba sobre trilhos: A história não contada do BRT.

Revista dos Transportes Públicos - ANTP, v. 32, p. 65–83, 2009. Disponível em: <http://files.antp.org.br/2016/4/7/revista-completa-123.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2021.

REDE URBENERE. **SMART GRID**. 1ª Jornada Científica URBENERE Brasil. 2015.

Disponível em: http://civil.uminho.pt/urbanere/wp-content/uploads/2015/12/4_Smart_Grid.pdf. Acesso em: 06 dez. 2021.

SERRA, E. T. *et al.* **Armazenamento de energia: situação atual, perspectivas e recomendações**. Comitê de energia da academia nacional de engenharia, 2016.

Disponível em: https://energiasroraima.com.br/wp-content/uploads/2020/01/ACUMULACAO-DE-ENERGIA-_Armazenamento-de-Energia-Fev-2017.pdf. Acesso em: 01 dez. 2021.

SHAHIDEHPOUR, M.; CLAIR, J. F. A Functional Microgrid for Enhancing Reliability, Sustainability, and Energy Efficiency. **The Electricity Journal**, v. 25, n. 8, p. 21–28, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tej.2012.09.015>. Acesso em: 16 ago. 2021.

SILVA, R. P. Piezoelectricidade como fonte de energia alternativa. **Revista Científica Semana Acadêmica**, n. 121, 2018. Disponível em:

<https://semanaacademica.org.br/artigo/piezoelasticidade-como-fonte-de-energia-alternativa>. Acesso em: 20 nov. 2021.

SILVEIRA, E. **Eletricidade do aperto**. Fapesp.br. Ed. 171, 2010. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/eletricidade-do-aperto/>. Acesso em: 25 ago. 2021.

SMIL, V. **Energy and civilization: a history**. MIT Press, 2018.

SOLAR, Wa. **Tempo de retorno do investimento em energia solar**. 2017. Disponível em: <http://www.wasolar.com.br/tempo-de-retorno-do-investimento-emenergia-solar>. Acesso em: 10 nov. 2022.

SOUSA, T. F. **Curitiba e o mito da "Cidade Modelo"**. 2012. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/48812/R%20-%20E%20-%20THAIS%20FIGUEIREDO%20DE%20SOUSA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 18 nov. 2021.

SOUZA, M. F. Z. On rural microgrids design - a case study in Brazil. **2015 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LATAM)**, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ISGT-LA.2015.7381146>. Acesso em: 1 dez. 2021.

THE 17 GOALS | Sustainable Development. **Un.org**. [s.l.: s.n., s.d.]. Disponível em: <https://sdgs.un.org/goals>. Acesso em: 2 nov. 2021.

TSUI, J. **How Smart Microgrids Will Change the Way We Consume Energy** | AltEnergyMag. Altenergymag.com, 2020. Disponível em: <https://www.altenergymag.com/article/2020/06/how-smart-microgrids-will-change-the-way-we-consume-energy/33212>. Acesso em: 13 nov. 2021.

TUBALLA, M. L.; ABUNDO, M. L. A review of the development of Smart Grid technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 59, p. 710–725, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.011>. Acesso em: 20 nov. 2021.

URBS. **URBS**: História do transporte. Urbs.curitiba.pr.gov. 2021. Disponível em: <https://www.urbs.curitiba.pr.gov.br/transporte/historia-transporte>. Acesso em: 8 dez. 2021.

_____. **URBS**: Urbanização de Curitiba. Urbs.curitiba.pr.gov. 2022. Disponível em: <https://www.urbs.curitiba.pr.gov.br/>. Outras informações coletadas via reuniões com o órgão. Acesso em: 10 set. 2022.

_____. **URBS Itibus**: Urbanização de Curitiba. Urbs.curitiba.pr.gov. 2022. Disponível em: <https://www.urbs.curitiba.pr.gov.br/mobile/itibus#>. Acesso em: 16 nov. 2022.

U.S. Department of Energy. **The Smart Grid**: An Introduction. SmartGrid.gov, 2008. Disponível em: https://www.smartgrid.gov/document/smart_grid_introduction. Acesso em: 19 nov. 2021.

USTUN, T. S. The importance of microgrids & renewable energy in meeting energy needs of the Brazilian Amazon. **2016 IEEE International Conference on Power and**

Energy (PECon), 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/PECON.2016.7951462>. Acesso em: 1 dez. 2021.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. São Paulo: Érica, v. 2, 2012.

XP INVESTIMENTOS. O que é rentabilidade nos investimentos e como calcular. **XP Investimentos**. 2021. Disponível em: <https://conteudos.xpi.com.br/aprenda-a-investir/relatorios/rentabilidade-nos-investimentos/>. Acesso em: 10 nov. 2022.

XU, M.; DAVID, J. M.; KIM, S. H. The Fourth Industrial Revolution: Opportunities and Challenges. **International Journal of Financial Research**, v. 9, n. 2, p. 90–95, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.5430/ijfr.v9n2p90>. Acesso em: 19 nov. 2021.

ZILLES, Roberto *et al.* **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica**. São Paulo: Oficina de textos, 2012.

ANEXO A - Empresa A: especificações técnicas (módulo fotovoltaico e inversor)

BelEnergy

A SUA MELHOR ENERGIA



Ficha Técnica

Elaborado em: 11/11/2021 Revisão Nº 01 em: 11/11/2021

Módulo Fotovoltaico Monocristalino Half Cell

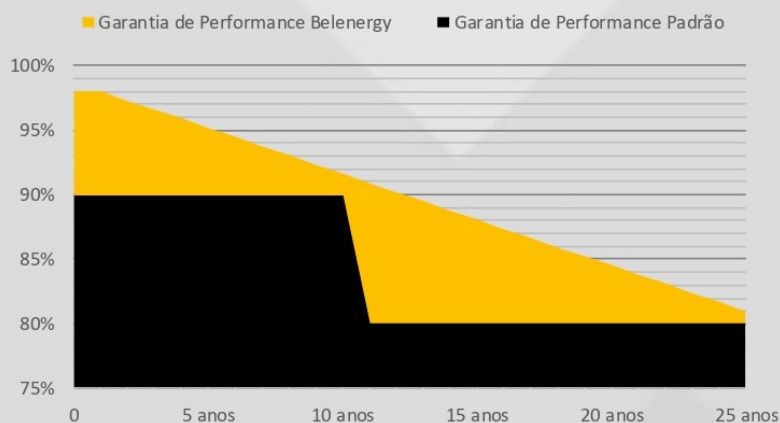
MFVHO-MO-144-550W

Potência Nominal**550Wp****Eficiência****21,3%****Peso****29,40kg****Dimensões****2279 x 1134 x 35mm****12
Anos**

Garantia contra defeitos de fabricação

**25
Anos**

Garantia de potência linear de até 80%



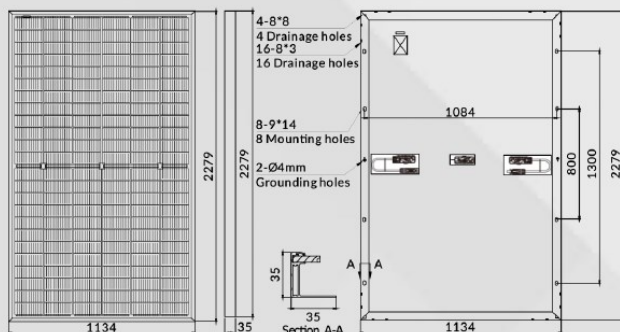
Todas as especificações e dados aqui apresentados, assim como as recomendações de uso, estão validados pelo fabricante do produto e de acordo com a nossa experiência. Contudo, devido a grande variedade de materiais existentes no mercado, assim como as técnicas de aplicação do produto, que não podem ser controladas por nós, recomendamos sempre a realização de consultas pelos nossos canais de atendimento e testes prévios com os materiais a serem utilizados. Por estas razões, qualquer aplicação do produto é de responsabilidade exclusiva do utilizador, não podendo a Belenus LTDA ser responsabilizada por quaisquer perdas ou prejuízos, direta ou indiretamente resultantes da aplicação. Imagens meramente ilustrativas.

Belenus LTDA - CNPJ: 05.151.518/0001-40

Rua Comendador João Lucas, 300, Distrito Industrial, Vinhedo - SP, CEP: 13288-184

Fone: (19) 3517-7300 - www.belenus.com.br - www.belenergy.com.br - belenergy@belenus.com.br

Desenho Técnico



Características Mecânicas

Tipo de Célula:	Monocristalina
Célula:	182 mm
Nº de Células:	144 (6X24)
Dimensões:	2279 x 1134 x 35 mm
Peso:	29,40 kg
Vidro Frontal:	3,2 mm
Moldura:	Alumínio Anodizado
Junction Box:	IP68 C/ 3 diodos
Cabos:	4mm ² /300mm incluso MC4
carga máx. vento/neve	2400Pa / 5400Pa

Características Elétricas

Potência Nominal (P _{max}):	550Wp	Potência Nominal (P _{max}):	410Wp
Tensão de Operação (V _{mp}):	41,28V	Tensão de Operação (V _{mp}):	38,46V
Corrente de Operação (I _{mp}):	13,32A	Corrente de Operação (I _{mp}):	10,64A
Tensão de Circuito Aberto (V _{oc}):	49,80V	Tensão de Circuito Aberto (V _{oc}):	47,00V
Corrente de Curto Circuito (I _{SC}):	14,01A	Corrente de Curto Circuito (I _{SC}):	11,32A
Eficiência do Módulo:	21,3%		

* Valores em condições padrões de teste (STC)

* Valores em condições padrões de teste (NOCT)

Condições de Operação

Tensão Máxima do Sistema:	1500V
Corrente Máxima do Fusível:	25A
Tolerância de Potência:	0~+5W
Temperatura de Operação do Módulo:	-40°C~+85°C

Certificações

Performance:	IEC 61215
Segurança:	IEC 61730
Registro INMETRO:	007423/2021

Coeficientes de Temperatura

Coeficiente de Temperatura de P _{max} :	-0,350% (W/°C)
Coeficiente de Temperatura de V _{oc} :	-0,27% (V/°C)
Coeficiente de Temperatura de I _{sc} :	+0,048% (A/°C)
Temperatura Nominal de Operação da Célula (NOCT):	44±2°C



Todas as especificações e dados aqui apresentados, assim como as recomendações de uso, estão validados pelo fabricante do produto e de acordo com a nossa experiência. Contudo, devido a grande variedade de materiais existentes no mercado, assim como as técnicas de aplicação do produto, que não podem ser controladas por nós, recomendamos sempre a realização de consultas pelos nossos canais de atendimento e testes prévios com os materiais a serem utilizados. Por estas razões, qualquer aplicação do produto é de responsabilidade exclusiva do utilizador, não podendo a Belenus LTDA ser responsabilizada por quaisquer perdas ou prejuízos, direta ou indiretamente resultantes da aplicação. Imagens meramente ilustrativas.

Belenus LTDA - CNPJ: 05.151.518/0001-40
 Rua Comendador João Lucas, 300, Distrito Industrial, Vinhedo - SP, CEP: 13288-184
 Fone: (19) 3517-7300 - www.belenus.com.br - www.belenergy.com.br - belenergy@belenus.com.br



Ficha Técnica

Elaborado em: 16/09/2021 Revisão Nº 03 em: 22/10/2021

Inversor String Fotovoltaico Interligado à rede

BEL-3K-G



Potência Nominal

3 kW

Número de MPPT's

1

Peso

6 kg

Potência Máxima CC

3,6 kW

Número de entradas

1

Dimensões

330x310x115mm

10
Anos

Garantia contra defeitos de fabricação

- Eficiência máxima de 97,5%
- Tecnologia de comutação de alta frequência
- Ampla faixa de tensão e baixa tensão de inicialização
- Algoritmo MPPT preciso
- Compacto e leve
- Conexão amigável e adaptável à rede elétrica
- Grau de proteção IP65

Todas as especificações e dados aqui apresentados, assim como as recomendações de uso, estão validados pelo fabricante do produto e de acordo com a nossa experiência. Contudo, devido a grande variedade de materiais existentes no mercado, assim como as técnicas de aplicação do produto, que não podem ser controladas por nós, recomendamos sempre a realização de consultas pelos nossos canais de atendimento antes prévios com os materiais a serem utilizados. Por estas razões, qualquer aplicação do produto é de responsabilidade exclusiva do usuário, não podendo a Belenus LTDA ser responsabilizada por quaisquer perdas ou prejuízos, direta ou indiretamente resultantes da aplicação. Imagens meramente ilustrativas.

Belenus LTDA - CNPJ: 05.151.518/0001-40

Rua Comendador João Lucas, 300, Distrito Industrial, Vinhedo - SP, CEP: 13288-184

Fone: (19) 3517-7300 - www.belenus.com.br - www.belenergy.com.br - belenergy@belenus.com.br

Entrada CC

Potência máxima de entrada recomendada:	3,6 kW
Tensão máx. de entrada:	550V
Tensão de partida:	80 V
Intervalo de tensão MPPT:	70-550 V
Corrente máx. de entrada:	13 A
Corrente máx. do conector de entrada:	13 A
Corrente máx. de curto-circuito:	19,5 A
MPPTs / Número de Entradas:	1/1

Saída CA

Potência nominal de saída:	3 kW
Potência máx. de saída aparente:	3,3 kVA
Potência máx. de saída:	3,3 kW
Tensão nominal da rede:	F/N/PE, 220 V
Frequência nominal da rede:	50 Hz / 60 Hz
Corrente nominal de saída da rede:	13,6 A
Corrente máx. de saída:	15 A
Harmônicas (THDI)	< 3%
Fator de potência:	0,8 inicial ~ 0,8 atrasado

Eficiência

Eficiência máxima:	97,5%
Eficiência EU:	97,3%
Eficiência MPPT:	>99%

Características

Conexão CC:	Compatível MC4
Conexão CA:	Plugue padrão IP65
Tela:	LCD 1602
Comunicação	RS485/ RS232/ Wifi

Proteção

Proteção contra inversão de polaridade CC:	Sim
Proteção contra curto-circuito:	Sim
Proteção de sobrecorrente de saída:	Sim
Proteção contra sobretensão:	Sim
Monitoramento de rede:	Sim
Proteção de ilhamento:	Sim
Proteção de temperatura:	Sim

Dados gerais

Topologia:	Sem Transformador
Consumo próprio (noite):	<1 W
Faixa de temperatura ambiente de operação:	-25 ~ +65°C
Umidade relativa:	0-100%
Conceito de refrigeração:	Convecção natural
Altitude máx. de operação	2000m
Certificados de padrão de conexão da rede:	ABNT NBR 16149, ABNT NBR 16150, ABNT NBR IEC 62116
Padrão de segurança / EMC:	IEC62109-1/-2, IEC61000-6-1, IEC61000-6-3, IEC61000-3-11, IEC61000-3-12,

ANEXO B - Empresa B: especificações técnicas (módulo fotovoltaico e inversor)

Mono Multi Solutions

Vertex S

BACKSHEET MONOCRYSTALLINE MODULE

PRODUCT: TSM-DE09
PRODUCT RANGE: 390-410W

410W

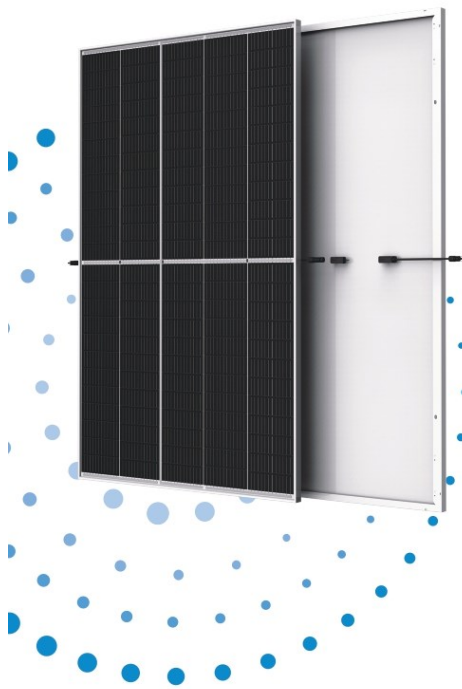
MAXIMUM POWER OUTPUT

0~+5W

POSITIVE POWER TOLERANCE

21.3%

MAXIMUM EFFICIENCY



Small in size, big on power

- Small form factor. Generate a huge amount of energy even in limited space. Up to 410W, 21.3% module efficiency with high density interconnect technology
- Multi-busbar technology for better light trapping effect, lower series resistance and improved current collection
- Reduce installation cost with higher power bin and efficiency
- Boost performance in warm weather with lower temperature coefficient (-0.34%) and operating temperature



Universal solution for residential and C&I rooftops

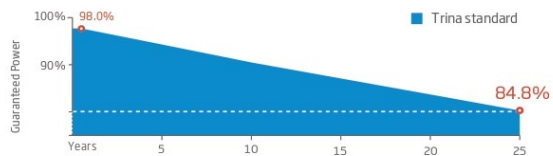
- Designed for compatibility with existing mainstream optimizers, inverters and mounting systems
- Perfect size and low weight. Easy for handling. Economy for transporting
- Diverse installation solutions. Flexible for system deployment



High Reliability

- 25 year performance warranty with lowest degradation;
- Ensured PID resistance through cell process and module material control
- Mechanical performance up to 6000 Pa positive load and 4000 Pa negative load

Trina Solar's Backsheet Performance Warranty



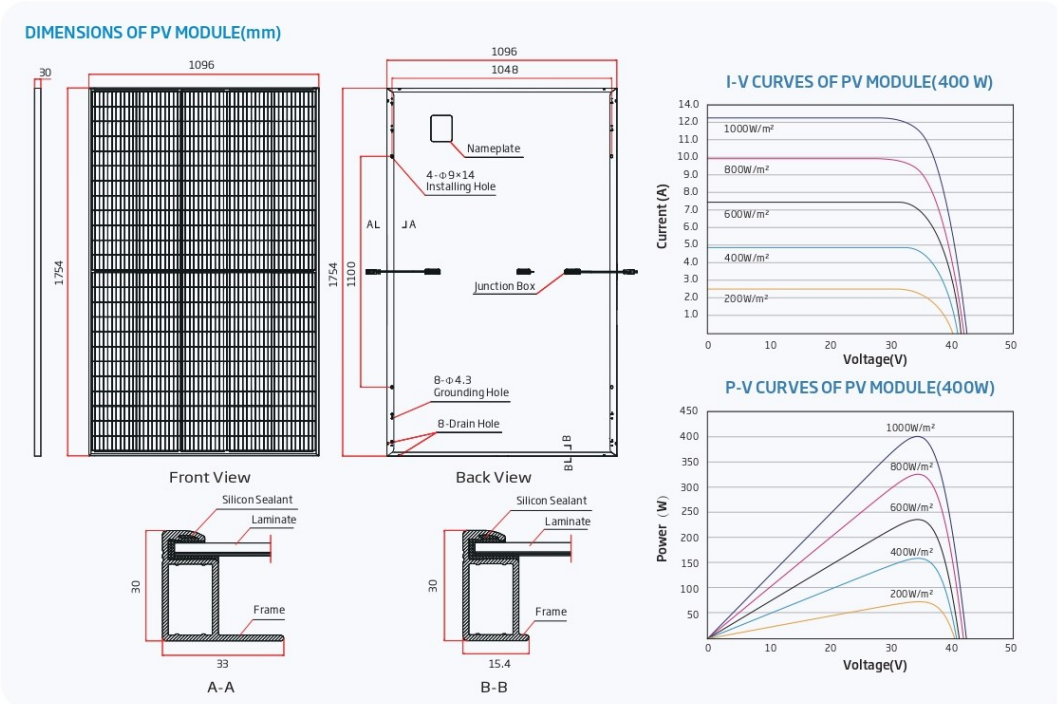
Comprehensive Products and System Certificates



IEC61215/IEC61730/IEC61701/IEC62716/UL61730
ISO 9001: Quality Management System
ISO 14001: Environmental Management System
ISO14064: Greenhouse Gases Emissions Verification
ISO45001: Occupational Health and Safety Management System



Vertex S BACKSHEET MONOCRYSTALLINE MODULE



ELECTRICAL DATA (STC)

Peak Power Watts- P_{MAX} (Wp)*	390	395	400	405	410
Power Tolerance- P_{MAX} (W)	0 ~ +5				
Maximum Power Voltage- V_{MPP} (V)	33.8	34.0	34.2	34.4	34.6
Maximum Power Current- I_{MPP} (A)	11.54	11.62	11.70	11.77	11.85
Open Circuit Voltage- V_{OC} (V)	40.8	41.0	41.2	41.4	41.6
Short Circuit Current- I_{SC} (A)	12.14	12.21	12.28	12.34	12.40
Module Efficiency η_m (%)	20.3	20.5	20.8	21.1	21.3

STC: Irradiance 1000W/m², Cell Temperature 25°C, Air Mass AM1.5. *Measuring tolerance: ±3%.

ELECTRICAL DATA (NOCT)

Maximum Power- P_{MAX} (Wp)	295	298	302	306	310
Maximum Power Voltage- V_{MPP} (V)	31.8	32.0	32.2	32.5	32.8
Maximum Power Current- I_{MPP} (A)	9.26	9.32	9.38	9.41	9.46
Open Circuit Voltage- V_{OC} (V)	38.4	38.6	38.8	38.9	39.1
Short Circuit Current- I_{SC} (A)	9.78	9.84	9.90	9.95	9.99

NOCT: irradiance at 800W/m², Ambient Temperature 20°C, Wind Speed 3m/s.

MECHANICAL DATA

Solar Cells	Monocrystalline
No. of cells	120 cells
Module Dimensions	1754 × 1096 × 30 mm (69.06 × 43.15 × 1.18 inches)
Weight	21.0 kg (46.3 lb)
Glass	3.2 mm (0.13 inches), High Transmission, AR Coated Heat Strengthened Glass
Encapsulant material	EVA/POE
Backsheet	White
Frame	30mm (1.18 inches) Anodized Aluminium Alloy
J-Box	IP 68 rated
Cables	Photovoltaic Technology Cable 4.0mm ² (0.006 inches ²), Portrait: 280/280 mm (11.02/11.02 inches) Length can be customized
Connector	MC4 EVO2 / TS4*

*Please refer to regional datasheet for specified connector.

TEMPERATURE RATINGS

NOCT (Nominal Operating Cell Temperature)	43°C (±2°C)
Temperature Coefficient of P_{MAX}	-0.34%/°C
Temperature Coefficient of V_{OC}	-0.25%/°C
Temperature Coefficient of I_{SC}	0.04%/°C

MAXIMUM RATINGS

Operational Temperature	-40 ~ +85°C
Maximum System Voltage	1500VDC (IEC)
	1500VDC (UL)
Max Series Fuse Rating	20A

WARRANTY

12 year Product Workmanship Warranty
25 year Power Warranty
2% first year degradation
0.55% Annual Power Attenuation

(Please refer to product warranty for details)

PACKAGING CONFIGURATION

Modules per box: 36 pieces
Modules per 40' container: 936 pieces



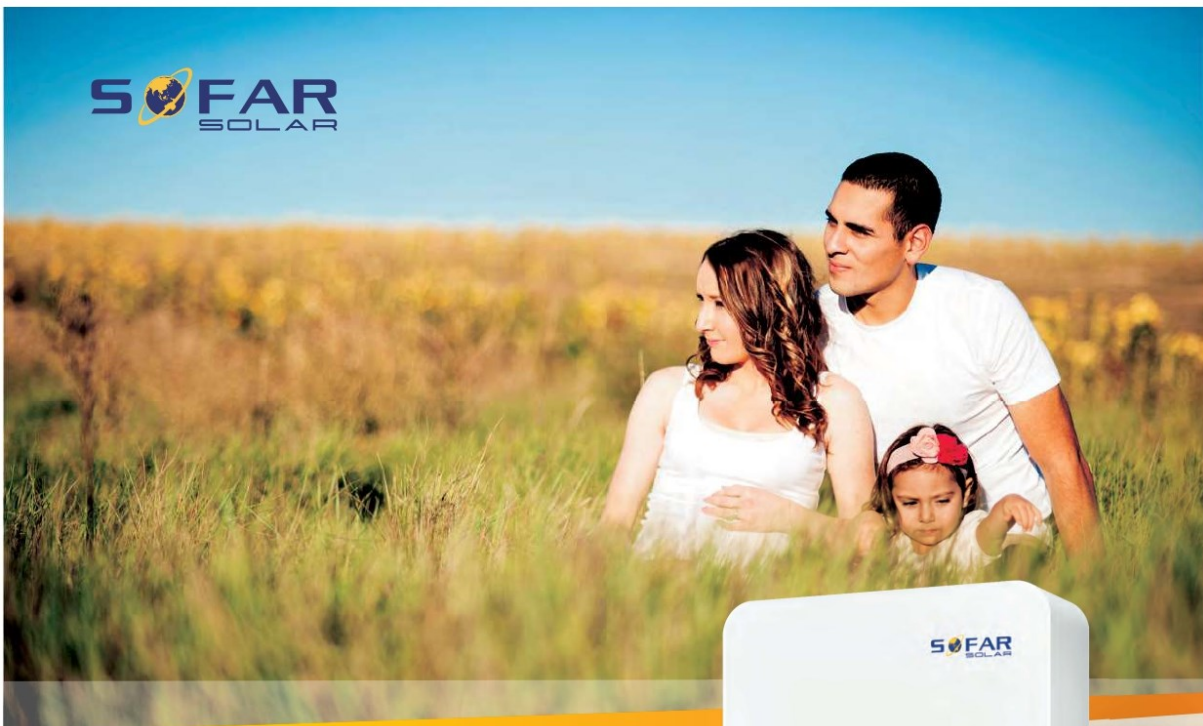
CAUTION: READ SAFETY AND INSTALLATION INSTRUCTIONS BEFORE USING THE PRODUCT.

© 2021 Trina Solar Co., Ltd. All rights reserved. Specifications included in this datasheet are subject to change without notice.

Version number: TSM_EN_2021_LC

www.trinasolar.com

SOFAR
SOLAR




SOFAR 1.1k~3.3kTL-G3


1100/1600/2200/2700/3000/3300

Single-Phase

Single-MPPT



- 1.4** 1.4 DC overload
-  IP65 ingress protection
- 97.7%** Max. efficiency up to 97.7%

-  Light weight, quick and easy to install
- 0** Built-in zero export function
-  Smart monitoring, RS485, Wifi/Ethernet/GPRS(optional)

✉ sales@sofarsolar.com

🌐 www.sofarsolar.com

Datasheet	SOFAR 1100TL-G3	SOFAR 1600TL-G3	SOFAR 2200TL-G3	SOFAR 2700TL-G3	SOFAR 3000TL-G3	SOFAR 3300TL-G3
Input (DC)						
Recommended Max. PV input power	1500Wp	2200Wp	3000Wp	3700Wp	4100Wp	4500Wp
Max. Input voltage	500V	500V	500V	550V	550V	550V
Start-up voltage				70V		
Rated input voltage				360V		
MPPT operating voltage range	50-500V	50-500V	50-500V	50-550V	50-550V	50-550V
Full power MPPT voltage range	110-450V	150-450V	200-450V	250-500V	275-500V	300-500V
Max. Input current MPPT				12A		
Maximum DC input short circuit current per MPPT				15A		
Number of MPPT/ String per MPPT				1/1		
Input terminal type				MC4/H4		
Output (AC)						
Rated power	1100W	1600W	2200W	2700W	3000W	3300W
Max. AC power	1100VA	1600VA	2200VA	2700VA	3000VA	3300VA
Rated Output current	4.8A	7A	9.6A	11.8A	13A	14.3A
Max. Output current	5.3A	7.7A	10.6A	13A	14.5A	16A
Nominal grid voltage	L/N/PE, 220Vac, 230Vac, 240Vac					
Grid voltage range	180Vac-276Vac (According to local standard)					
Nominal frequency	50Hz/60Hz					
Grid frequency range	45~55Hz/54~66Hz (According to local standard)					
THDi	< 3%					
Power factor	1 default (adjustable +/- 0.8)					
Efficiency						
Max. Efficiency	97.5%	97.5%	97.5%	97.7%	97.7%	97.7%
European weighted efficiency	96.9%	96.9%	96.9%	97.2%	97.2%	97.2%
Protection						
Anti-Islanding protection				Yes		
DC reverse polarity protection				Yes		
Over temp protection				Yes		
Leakage current protection				Yes		
Over voltage protection				Yes		
Over current protection				Yes		
Earth fault protection				Yes		
SPD	MOV: Type III standard					
Communication						
Standard communication mode	RS485, WiFi/GPRS/Ethernet(optional), USB					
General Data						
Topology	Transformerless					
Ambient temperature range	-30°C~+60°C					
Allowable relative humidity range	0~100%					
Noise	<25dB					
DC switch	optional					
Cooling	Natural					
Max. Operating altitude	2000m					
Dimension[mm]	303*260.5*118	303*260.5*118	303*260.5*118	321*260.5*131.5	321*260.5*131.5	321*260.5*131.5
Support bracket	Wall-mounted					
Weight	5.5kg	5.5kg	5.5kg	6.3kg	6.3kg	6.3kg
Display	LCD+LED					
Degree of protection	IP65					
Warranty	5 years/ 7 years/ 10 years					
Standard						
EMC	EN 61000-6-1, EN 61000-6-3, EN 61000-3-2, EN 61000-3-3					
Safety standards	IEC 61000-6-1, IEC 61000-6-3, IEC 61000-3-2, IEC 61000-3-3, IEC 62116, IEC 61727, IEC 61683, IEC 60068(1,2,14,30), IEC 62109-1/2					
Grid standards	AS 4777, VDE V 0124-100, VDE V 0126-1-1, VDE-AR-N 4105, G83/2, C10/11, RD 1699					

**ANEXO C - Projeto arquitetônico da Estação Tubo Santa Bernadethe, sentido
Praça Carlos Gomes**

